



# Wie kann Grünes Fliegen im Ökosystem Luftfahrt gelingen?

Vertretung des Landes  
Niedersachsens  
beim Bund

Donnerstag,  
11. November 2021

## Wasserstoff - DIE Komponente, die die Luftfahrt dekarbonisieren soll...

Wenn es um Nachhaltigkeit und um die Zukunft der Luftfahrtbranche geht, ist das Thema Wasserstoff kaum noch wegzudenken. Er gilt als Schlüssel zum emissionsfreien Fliegen.

So vielversprechend wie das Element auch klingen mag, stellt er die Luftfahrtindustrie auch vor große Herausforderungen, die nur in Zusammenarbeit & Kooperationen gemeistert werden können.

## In diesem Kontext stellen sich folgende Fragen...

- ...Wird Wasserstoff **die Lösung** zur Klimaneutralität der Luftfahrtbranche sein?
- ...Was sind die größten Herausforderungen bei der Ausweitung eines klimaneutralen **Energie-Ökosystems** und was ist notwendig, um diese zu bewältigen?
- ...Was ist neben emissionsreduzierenden Antriebssystemen noch erforderlich für eine **klimaneutrale Gestaltung** der Luftfahrt?
- ...Welche **Antriebsvarianten** stellen eine Option dar, den Flugverkehr klimaneutral zu gestalten bzw. klimarelevante Emissionen zu senken?





# Programm

Donnerstag,  
11. November 2021

Beginn 11:30 Uhr  
(Einlass 10:30)

Grußwort

**Dr. Niels Kämpny**

Niedersächsisches Ministerium für Wirtschaft, Arbeit,  
Verkehr und Digitalisierung

Referenten

**Prof. Dr.-Ing. Richard Hanke-Rauschenbach**

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Institut  
für Elektrische Energiesysteme

**Prof. Dr.-Ing. Jens Friedrichs**

Technische Universität Braunschweig, Institut für  
Flugantriebe und Strömungsmaschinen

**Nicole Dreyer-Langlet**

Airbus - R&T Deutschland Repräsentantin

**Über Ihre Teilnahme freuen wir uns sehr.**

Im Anschluss an die Veranstaltung möchten wir sie gerne zu einem Mittagsimbiss einladen, der um ca. 13:30 Uhr gereicht wird.

Bei Rückfragen wenden Sie sich bitte an: +49 (0) 40 743 62107

## Anfahrt



Vertretung des Landes  
Niedersachsens beim Bund  
In den Ministergärten 10  
10117 Berlin



Parkplätze stehen unmittelbar am Tagungsort nicht zur Verfügung. Die Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln wird empfohlen.

Bitte beachten Sie, dass bei der gesamten Dauer der Veranstaltung entsprechende Corona-Regeln gelten werden

Wie kann Grünes Fliegen  
im Ökosystem Luftfahrt  
gelingen?



**HERZLICH  
WILLKOMMEN**

**AIRBUS**



Wie kann Grünes Fliegen  
im Ökosystem Luftfahrt  
gelingen?



## AGENDA

Begrüßung

**Gunnar Groß**

Airbus, General Secretary

Grußwort Niedersachsen

**Dr. Niels Kämpny**

Abteilungsleiter Industrie und Maritime Wirtschaft

### Expertenpanel / Fachvorträge

**Prof. Dr.-Ing. Richard Hanke-Rauschenbach: Ökosystem**

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Institut für Elektrische  
Energiesysteme

**Prof. Dr.-Ing. Jens Friedrichs: Antriebssysteme**

Technische Universität Braunschweig, Institut für Flugantriebe und  
Strömungsmaschinen

**Nicole Dreyer-Langlet: Sicht Airbus**

Airbus, Geschäftsführerin / R&T Deutschland Repräsentantin

### Im Anschluss: Panel-Diskussion / Fishbowl

Ca. 13:30: Gemeinsamer Lunch



Wie kann Grünes Fliegen  
im Ökosystem Luftfahrt  
gelingen?



# Grußwort

**Dr. Niels Kämpny**

Abteilungsleiter Industrie und Maritime  
Wirtschaft, Niedersächsisches  
Wirtschaftsministerium



Wie kann Grünes Fliegen  
im Ökosystem Luftfahrt  
gelingen?

## Airbus-Purpose:

“Pioneering sustainable aerospace for a safe and united world”

## LEITFRAGEN der heutigen Veranstaltung:

- ...Wird Wasserstoff **die Lösung** zur Klimaneutralität der Luftfahrtbranche sein?
- ...Was sind die größten Herausforderungen bei der Ausweitung eines klimaneutralen **Energie-Ökosystems** und was ist notwendig, um diese zu bewältigen?
- ...Was ist neben emissionsreduzierenden Antriebssystemen noch erforderlich für eine **klimaneutrale Gestaltung** der Luftfahrt?
- ...Welche **Antriebsvarianten** stellen eine Option dar, den Flugverkehr klimaneutral zu gestalten bzw. klimarelevante Emissionen zu senken?



Wie kann Grünes Fliegen  
im Ökosystem Luftfahrt  
gelingen?



# Ökosystem

**Prof. Dr.-Ing. Richard  
Hanke-Rauschenbach**

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität  
Hannover, Institut für Elektrische  
Energiesysteme





# Bereitstellung von grünem Wasserstoff für die Transformation des Flugverkehrs hin zur Klimaneutralität

J. Hoelzen, B. Bensmann, A. Bensmann, R. Hanke-Rauschenbach

Airbus-Event “Grünes Fliegen”, 11.11.21 Berlin

CONFIDENTIAL AND PROPRIETARY

Any use of this material without specific permission of the Institute of Electrical Energy Systems at Leibniz University Hannover is strictly prohibited

*Picture from airbus.com*



# Gliederung

- 1 Rolle von Wasserstoff im Gesamtenergiesystem
- 2 Wasserstoffbereitstellung für den Flugverkehr und Kostenabschätzungen
- 3 Forschungsbedarfe und Ausblick



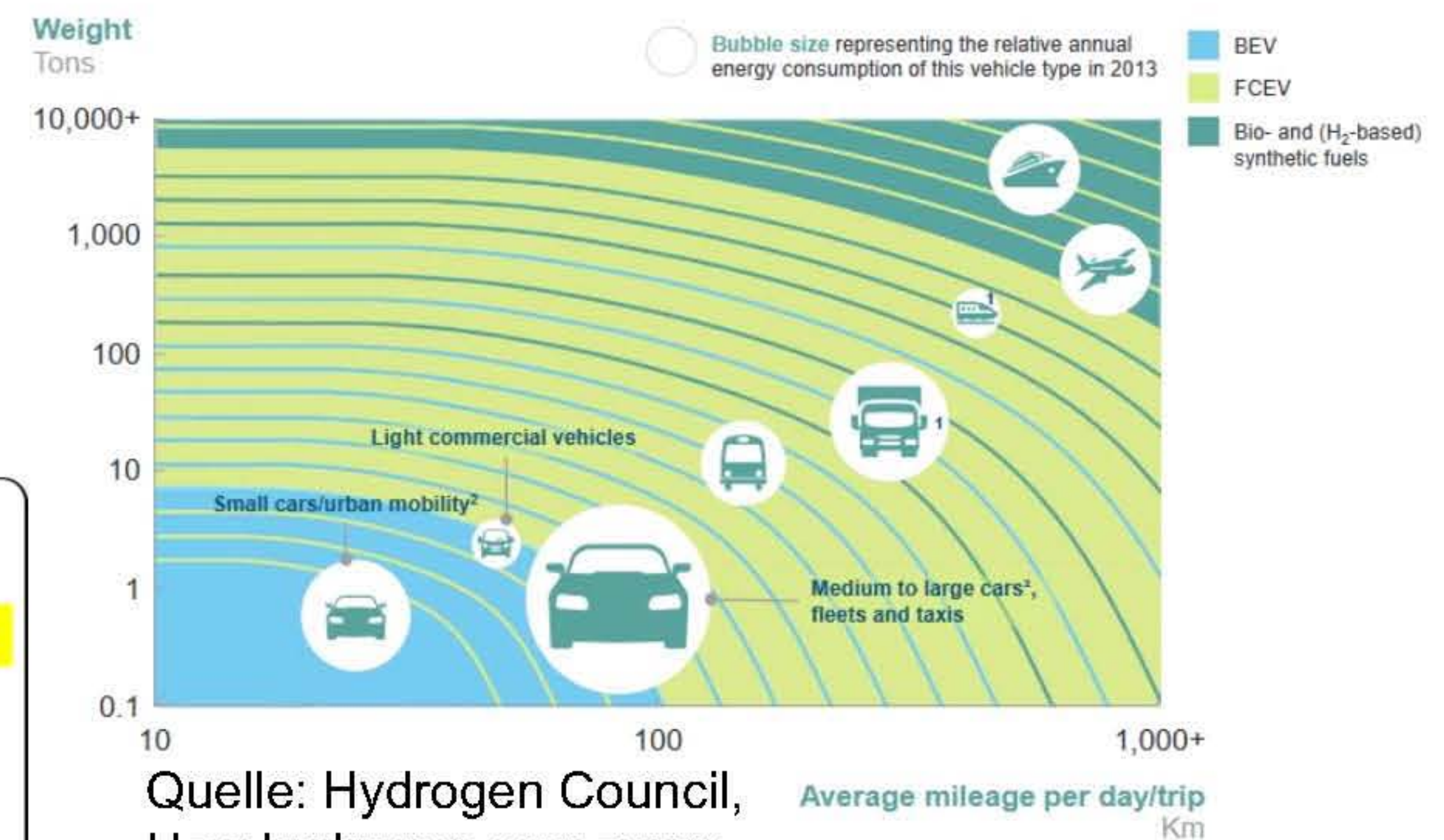
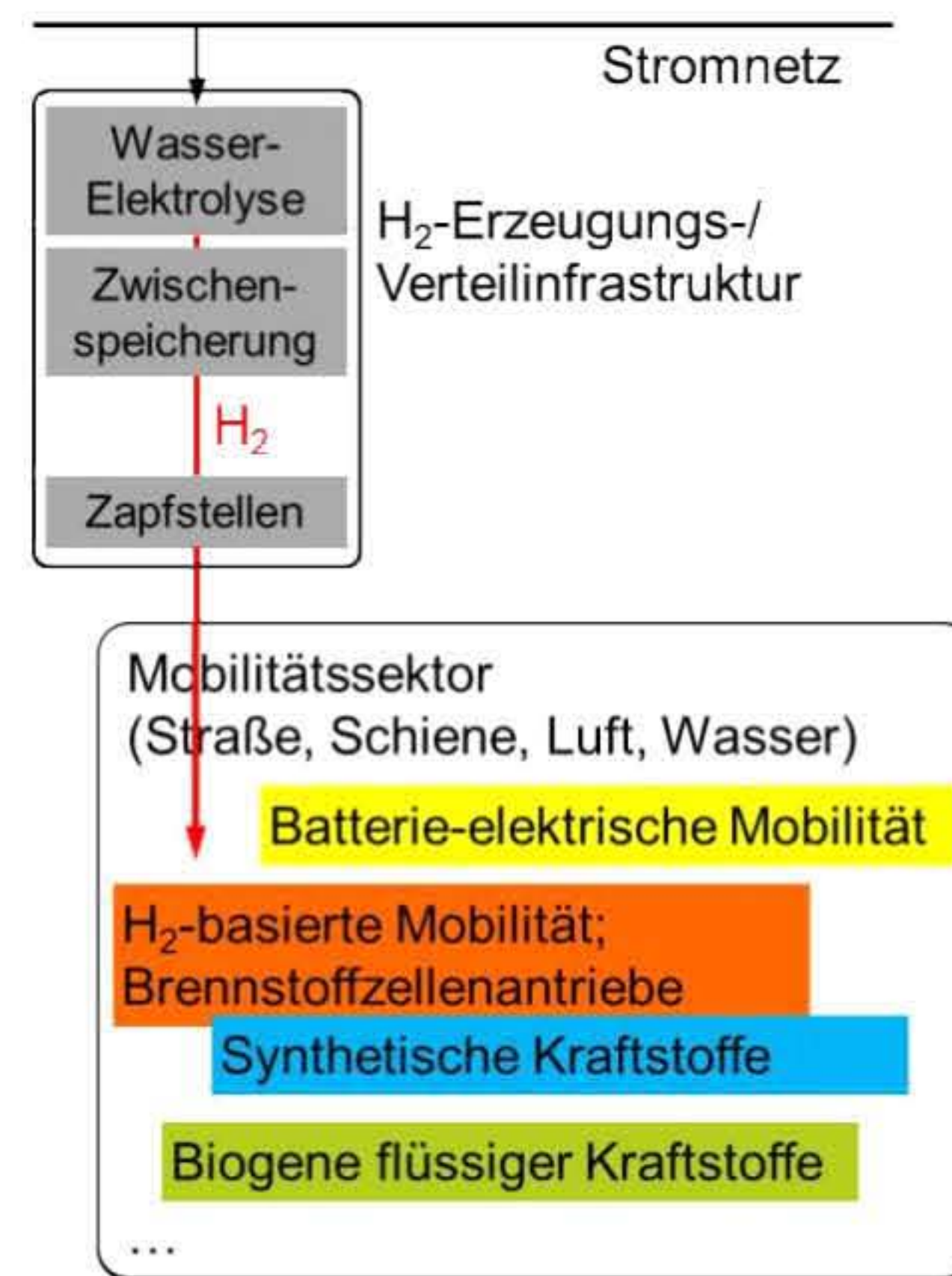


# Wasserstoff wird im stationären Energiesystem eine wichtige Rolle beigemessen

## Funktionalitäten von Wasserstoff im künftigen Energiesystem

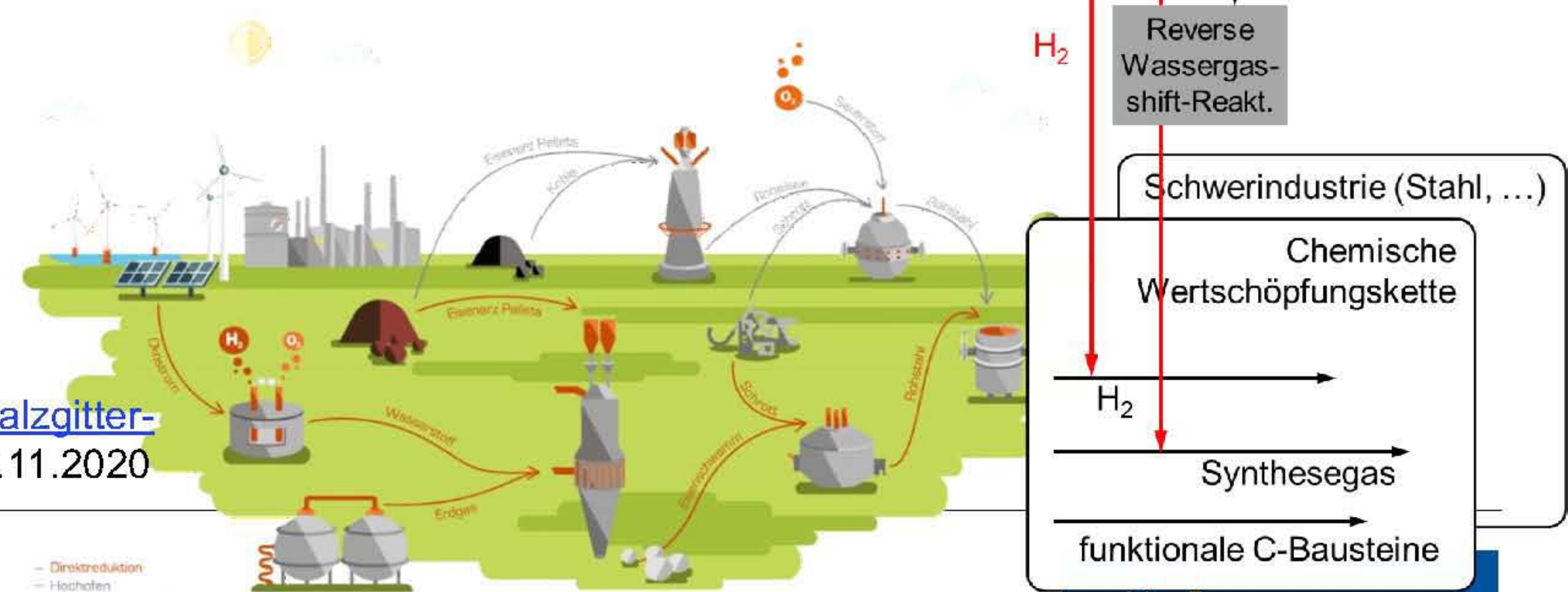
1. Lösungselement zu Defossilisierung der Mobilität
2. Lösungselement zur Substitution fossilstämmiger Rohstoffe in der Grundstoff-/ Schwerindustrie
3. Lösungselement zur Defossilisierung des Wärmesektors
4. Lösungselement zur Langzeitspeicherung von erneuerbarer Energie
5. Lösungselement zur volkswirtschaftlichen Optimierung des Stromnetzausbaus

Wasserstoff wird dabei dauerhaft in Konkurrenz zu alternativen Technologien stehen, die oft einen höheren Wirkungsgrad aber dafür weniger Flexibilität bieten



Quelle: Hydrogen Council, How hydrogen empowers the energy transition, 2017

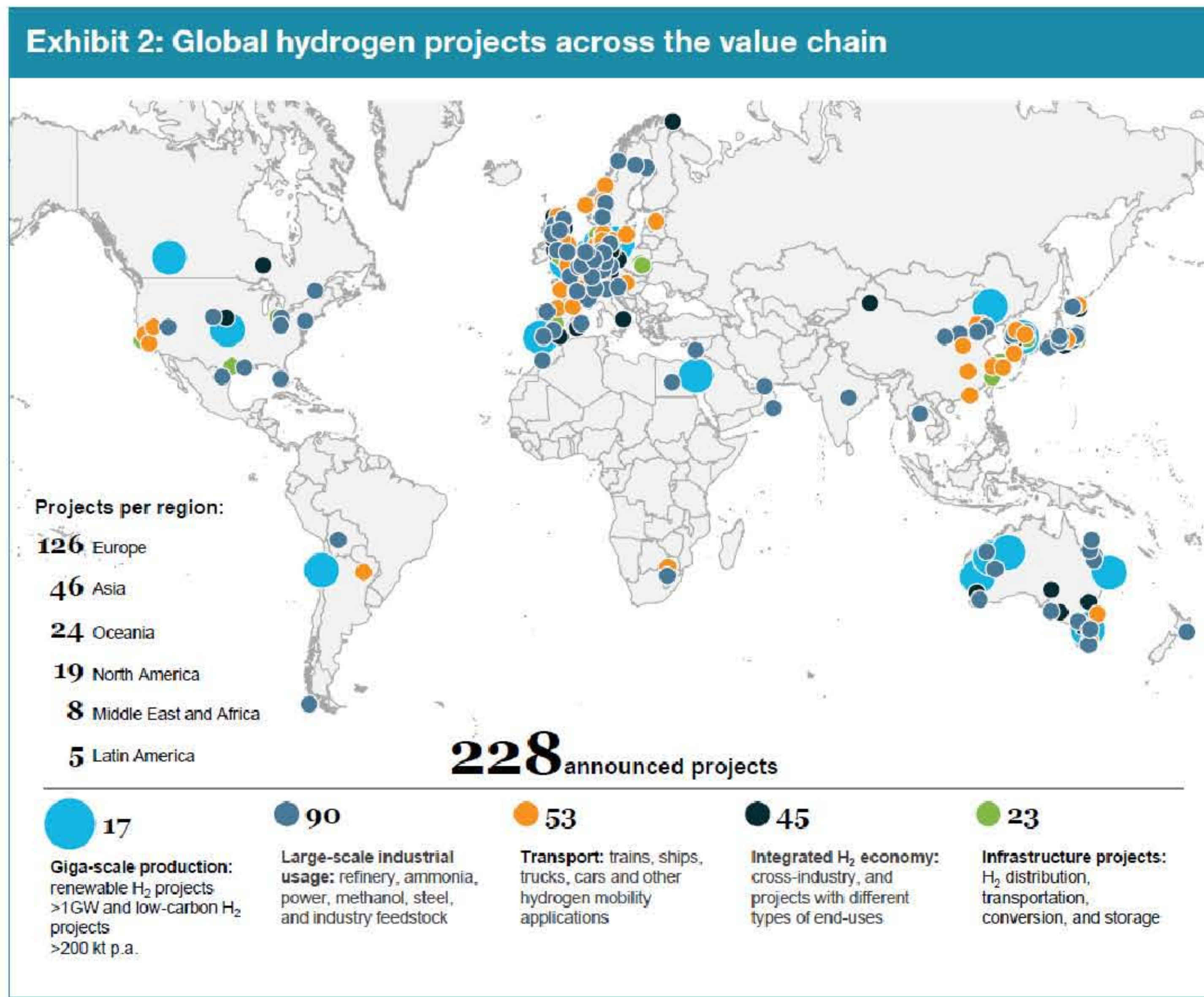
Quelle: <https://salcos.salzgitter-ag.com/>, abgerufen 17.11.2020





# Globale Wasserstoffinitiativen treiben Wettbewerbsfähigkeit von H2 u.a. als Antriebssystem – starker Industriefokus auf H2 Konzepte in Luftfahrt

Rapider Ausbau einer globalen H2 Infrastruktur mit mehr als USD 300 Mrd. Investments...

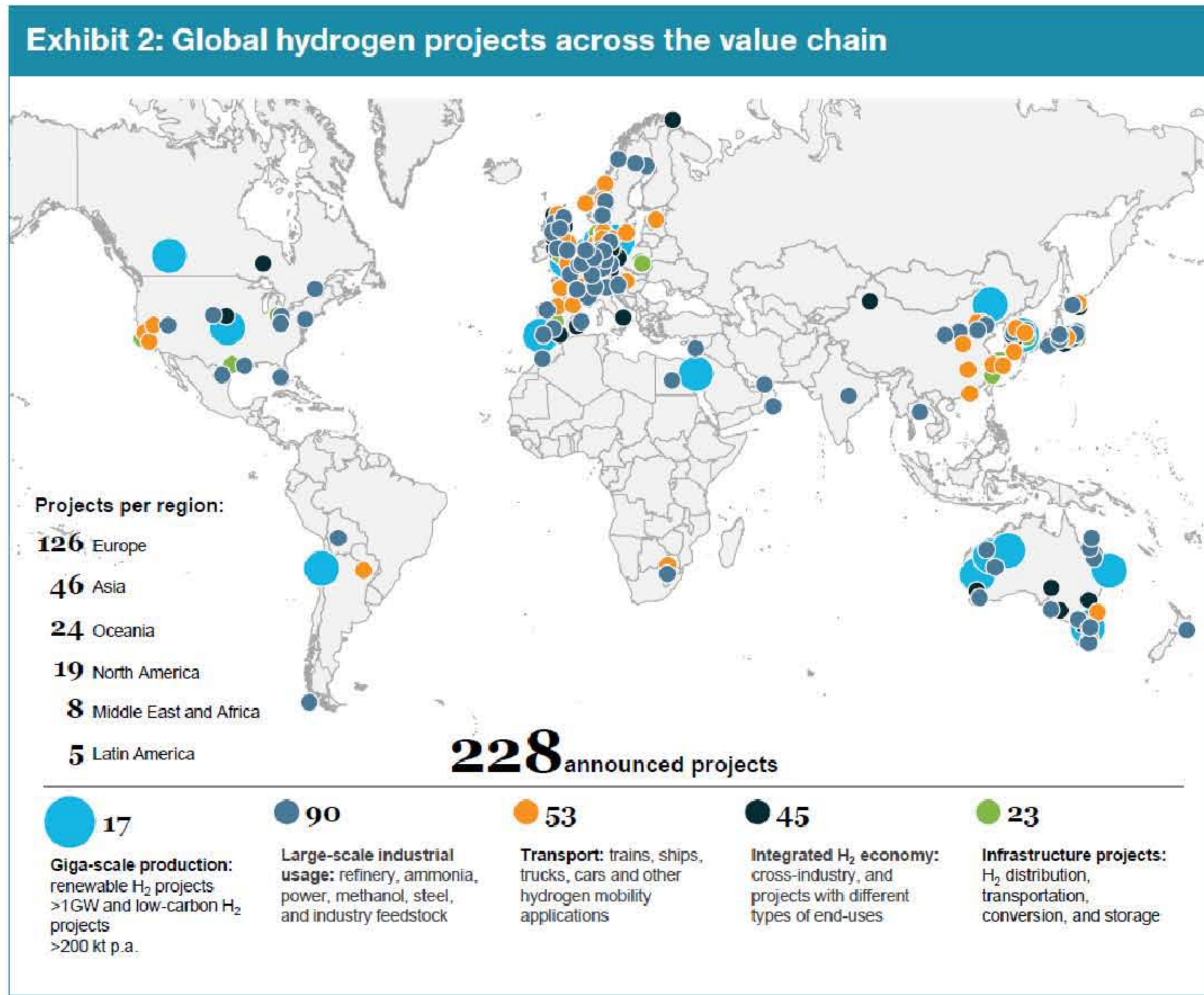




# Globale Wasserstoffinitiativen treiben Wettbewerbsfähigkeit von H2 u.a. als Antriebssystem – starker Industriefokus auf H2 Konzepte in Luftfahrt

Rapider Ausbau einer globalen H2 Infrastruktur mit mehr als USD 300 Mrd. Investments...

...hat auch den Luftfahrtsektor "beflügelt" und H2 als Antriebstechnologie zurück auf die Agenda gebracht.





# Gliederung

- 1 Rolle von Wasserstoff im Gesamtenergiesystem
- 2 Wasserstoffbereitstellung für den Flugverkehr und Kostenabschätzungen
- 3 Forschungsbedarfe und Ausblick







# Several H2 supply routes possible – Main difference to other sectors is the need for H2 liquefaction

Qualitative overview of potential fuel supply topologies

## Components of green H2 supply



**Green H2 production**  
through renewable energy  
plants and electrolysis



**Liquefaction**



**Storage** (GH2, LH2)  
above and under ground



**Transport** via truck,  
pipeline, boat on longer or  
shorter distances



**Aircraft refueling** with  
LH2 trucks or pipeline &  
hydrant system

1. H2 import and transport in form of LOHC, NH3 or metal hydrides not shown here

Sources: pictures taken from company websites and Clean Sky JU & FCH JU [2]



# Several H2 supply routes possible – Main difference to other sectors is the need for H2 liquefaction

Qualitative overview of potential fuel supply topologies



## Components of green H2 supply



**Green H2 production** through renewable energy plants and electrolysis



**Liquefaction**



**Storage** (GH2, LH2) above and under ground

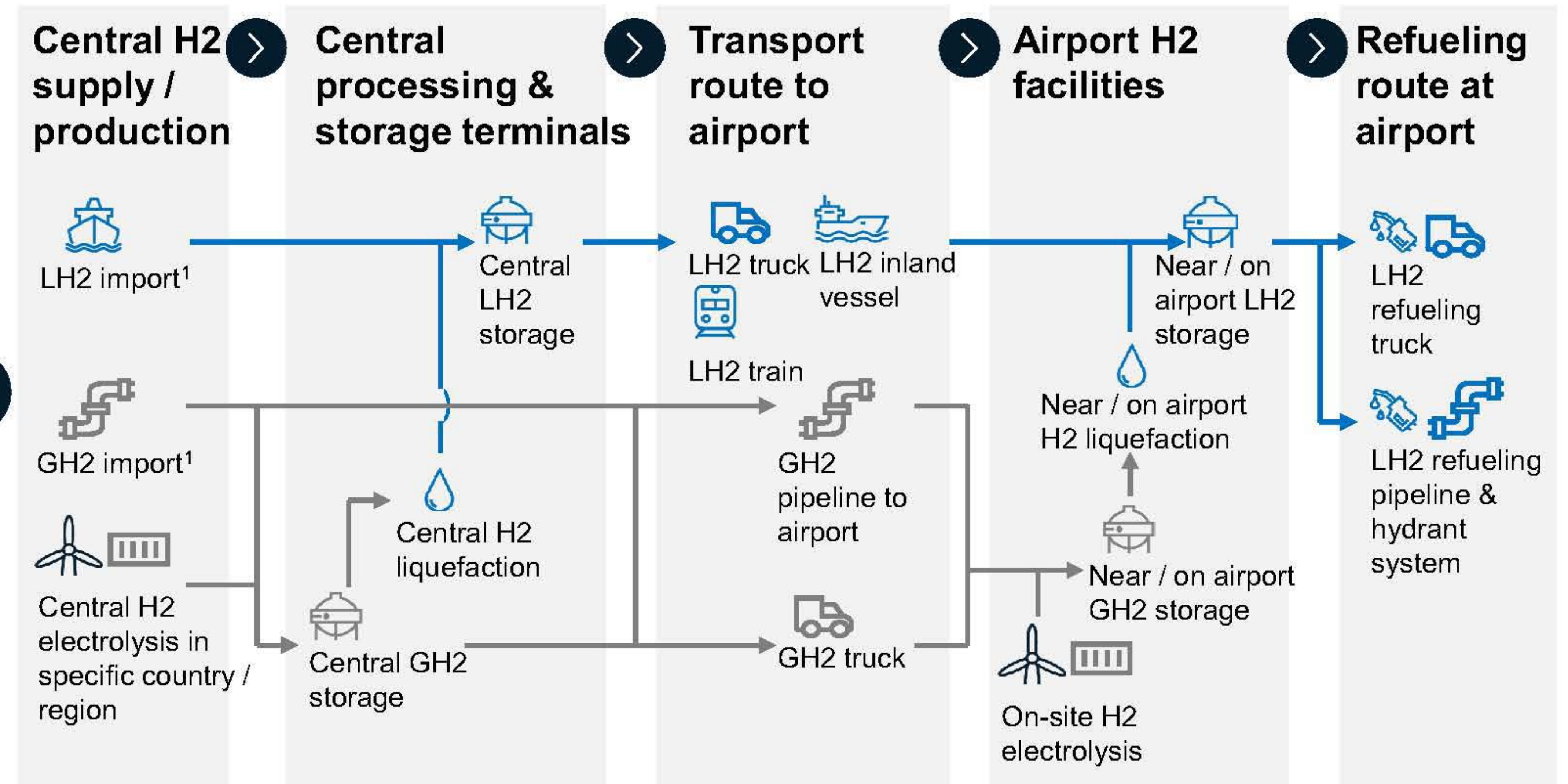


**Transport** via truck, pipeline, boat on longer or shorter distances



**Aircraft refueling** with LH2 trucks or pipeline & hydrant system

## Potential green H2 supply routes to refuel aircraft



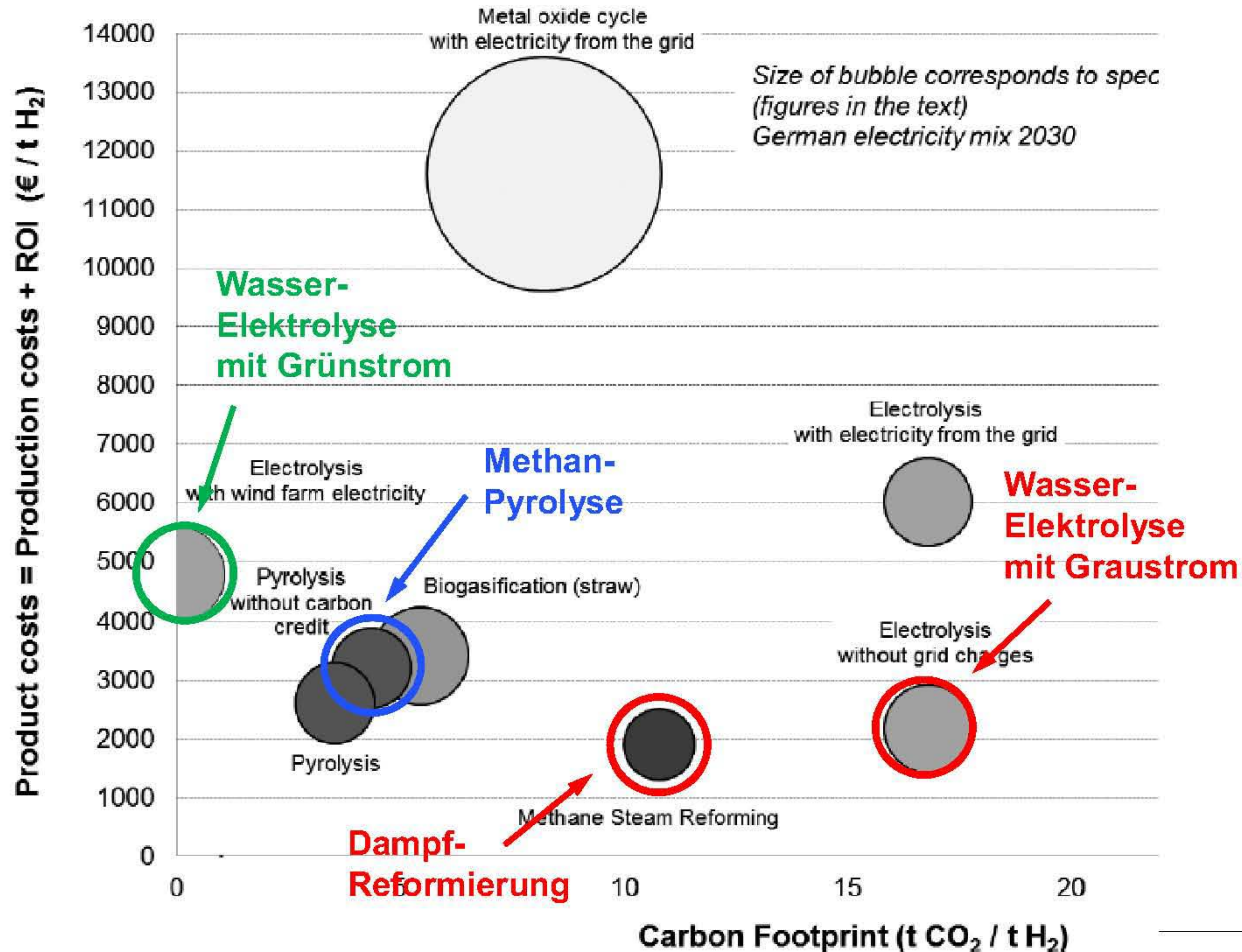
1. H2 import and transport in form of LOHC, NH3 or metal hydrides not shown here

Sources: pictures taken from company websites and Clean Sky JU & FCH JU [2]



# Wasserstoff-Gestehungsrouten unterscheiden sich maßgeblich hinsichtlich CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und Kosten

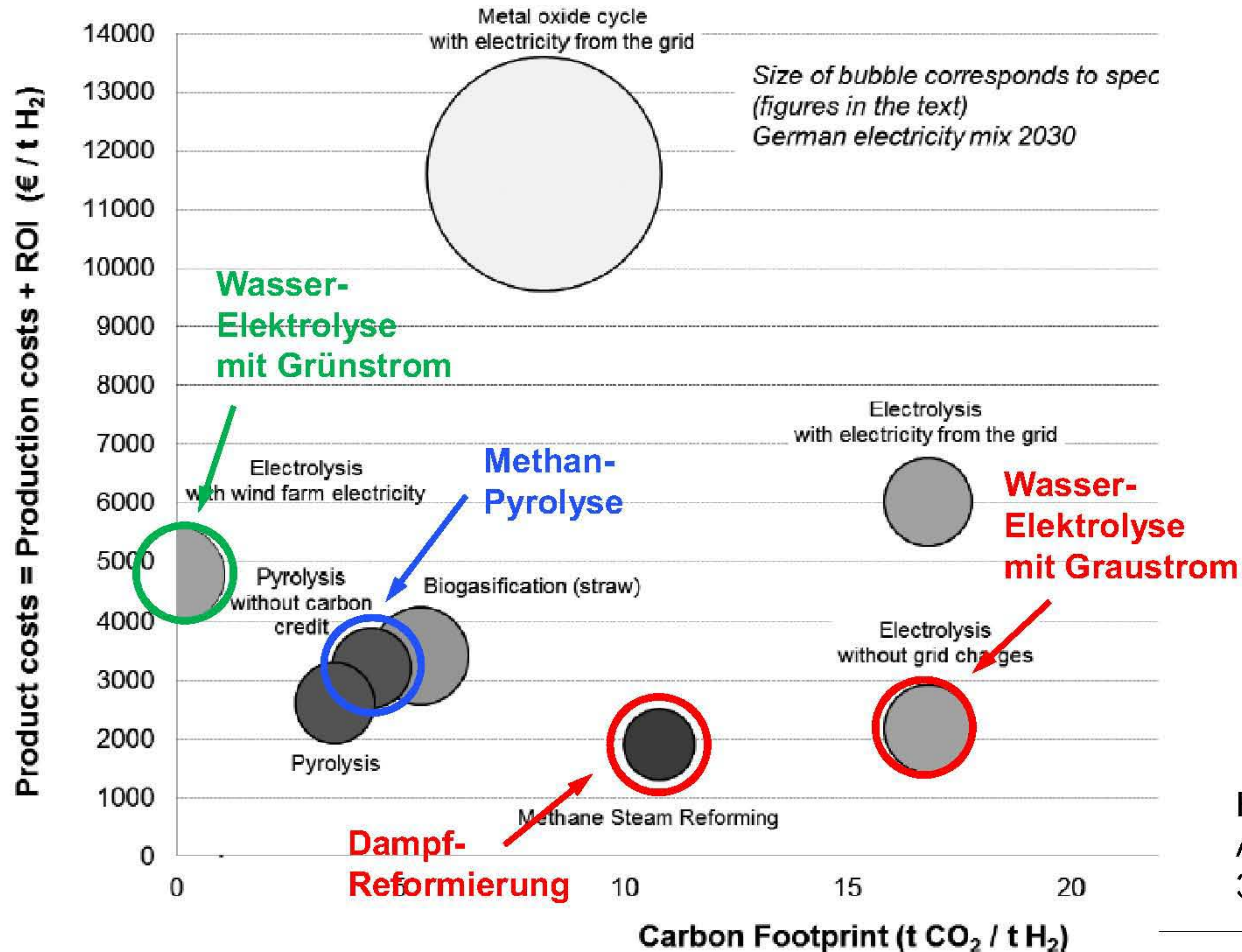
Übersicht: Wasserstoff-Gestehungsrouten



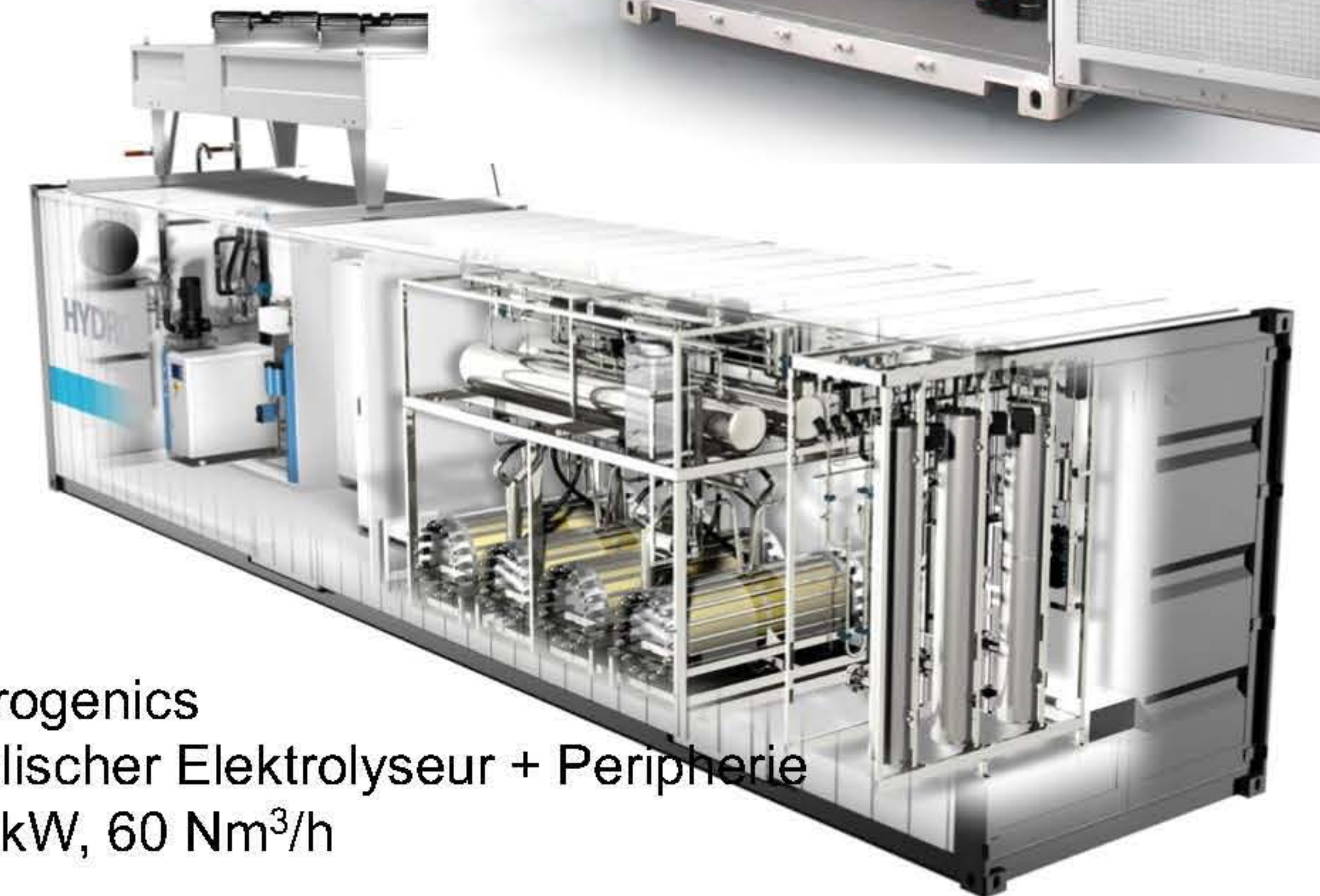


# Wasserstoff-Gestehungsrouten unterscheiden sich maßgeblich hinsichtlich CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und Kosten

Übersicht: Wasserstoff-Gestehungsrouten



ITM  
PEM Elektrolyseur + Peripherie  
300 kW – 1 MW Container  
60 Nm<sup>3</sup>/h @ 300 kW



Hydrogenics  
Alkalischer Elektrolyseur + Peripherie  
330 kW, 60 Nm<sup>3</sup>/h



# Only few studies found providing a quantitative cost view on green H2 supply for aviation – further detailed analyses required



Quantitative overview from literature review

## Older research:

**Detailed analysis** of both H2 aircraft technology and H2 supply concepts from Brewer, Alder, Cryoplane, Sefain, Haglind – however, no optimization of different supply paths for green H2 found

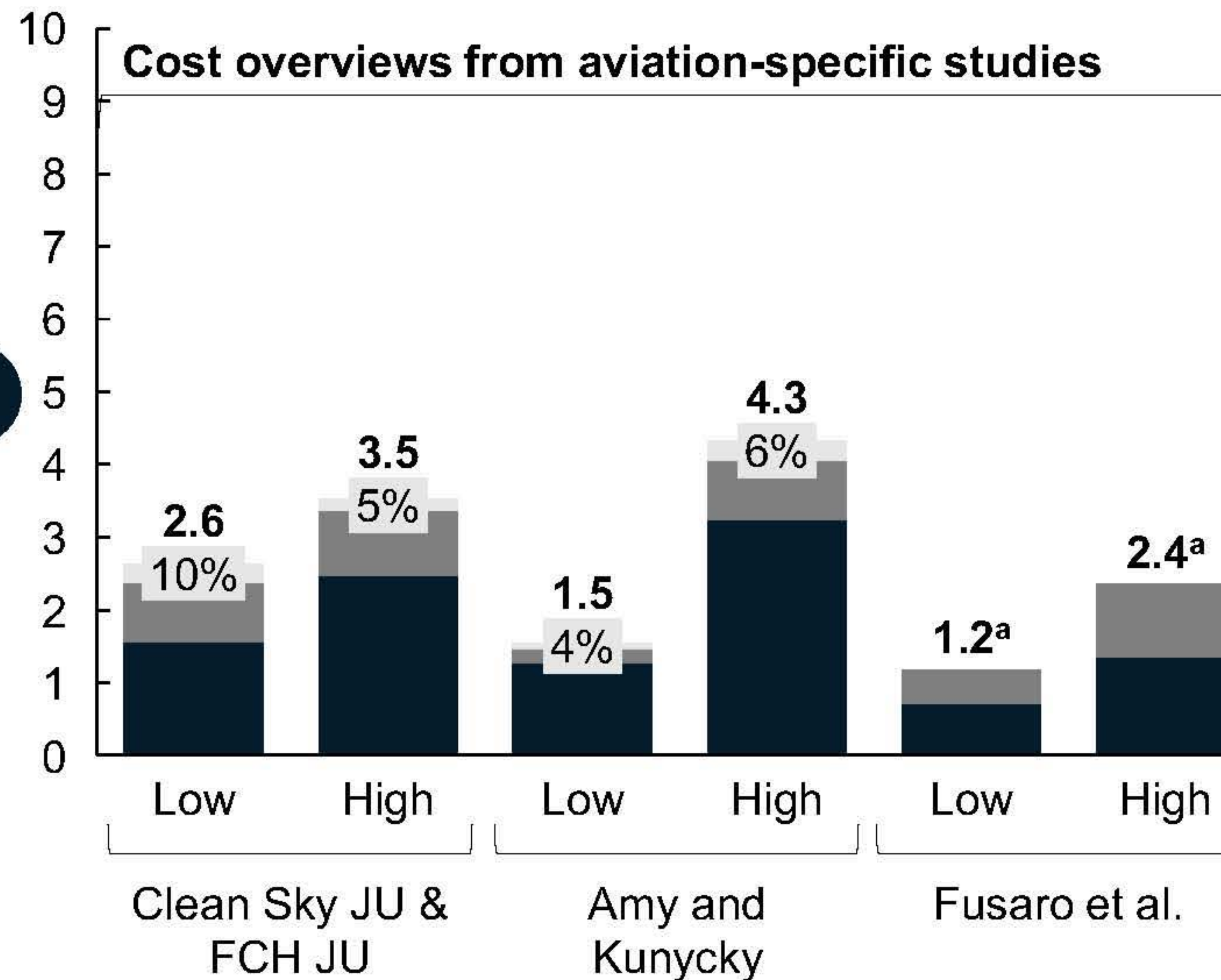
## Newer research:

Updated perspectives and new insights especially on H2 aircraft technology – only few cost views for green H2 supply in aviation

## H2 supply cost insights from previous research

LH2 cost delivered (USD<sub>2020</sub>/kgH2)

Transport, storage & refueling Liquefaction Electrolysis



a. Transport, storage or refueling costs not included in study

b. Refueling costs not considered, since no LH2 application



# Only few studies found providing a quantitative cost view on green H2 supply for aviation – further detailed analyses required



Quantitative overview from literature review

## Older research:

**Detailed analysis** of both H2 aircraft technology and H2 supply concepts from Brewer, Alder, Cryoplane, Sefain, Haglind – however, no optimization of different supply paths for green H2 found

## Newer research:

Updated perspectives and new insights especially on H2 aircraft technology – only few cost views for green H2 supply in aviation

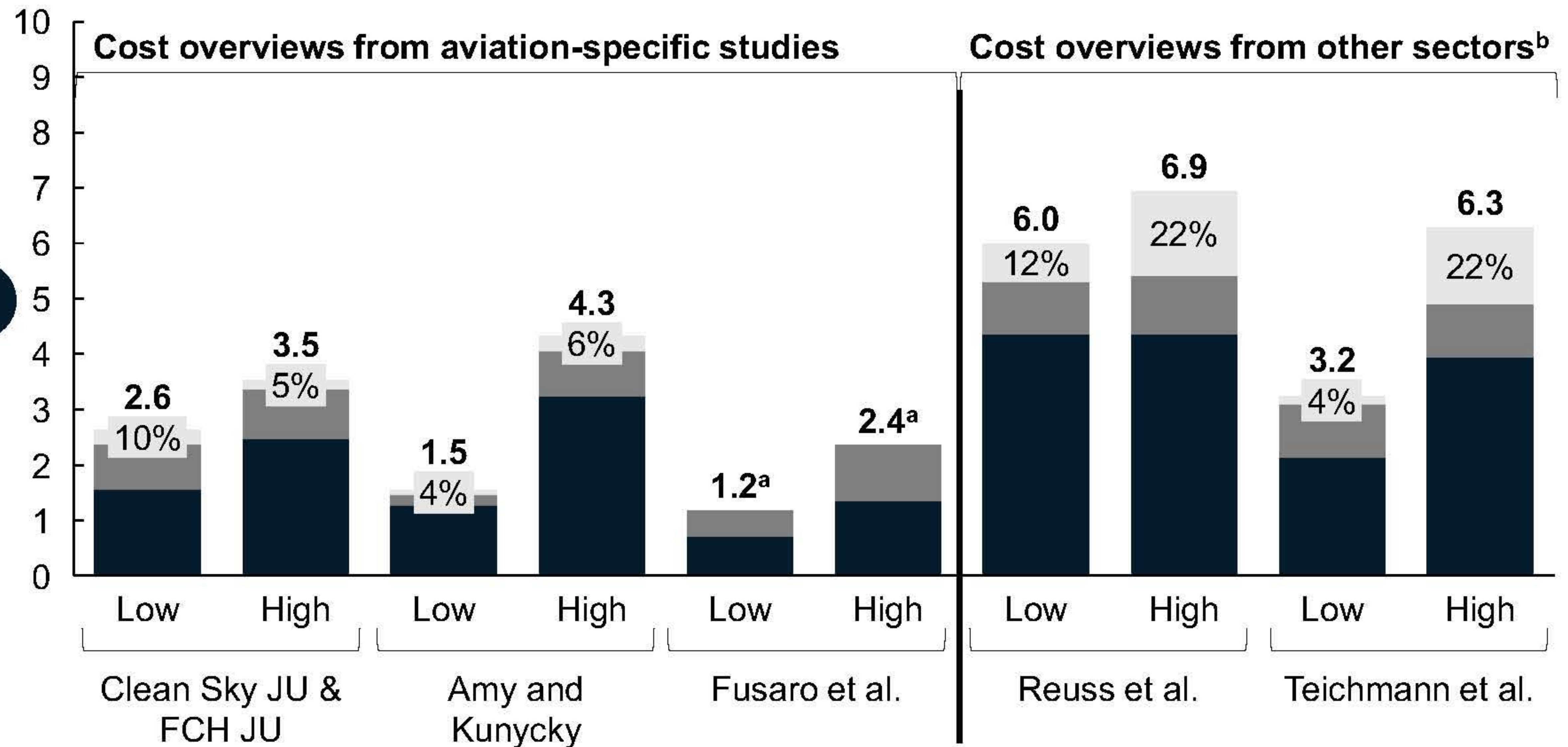
## Other research:

First H2 energy system analyses found around airports but without considering H2 supply for aircraft propulsion – relevant cost insights for LH2 supply only in other sectors

## H2 supply cost insights from previous research

LH2 cost delivered (USD<sub>2020</sub>/kgH2)

Transport, storage & refueling Liquefaction Electrolysis



a. Transport, storage or refueling costs not included in study

b. Refueling costs not considered, since no LH2 application





# Resulting LH2 costs at the dispenser in most cases significantly more expensive than reference kerosene costs

Cost analyses from literature: total LH2 fuel

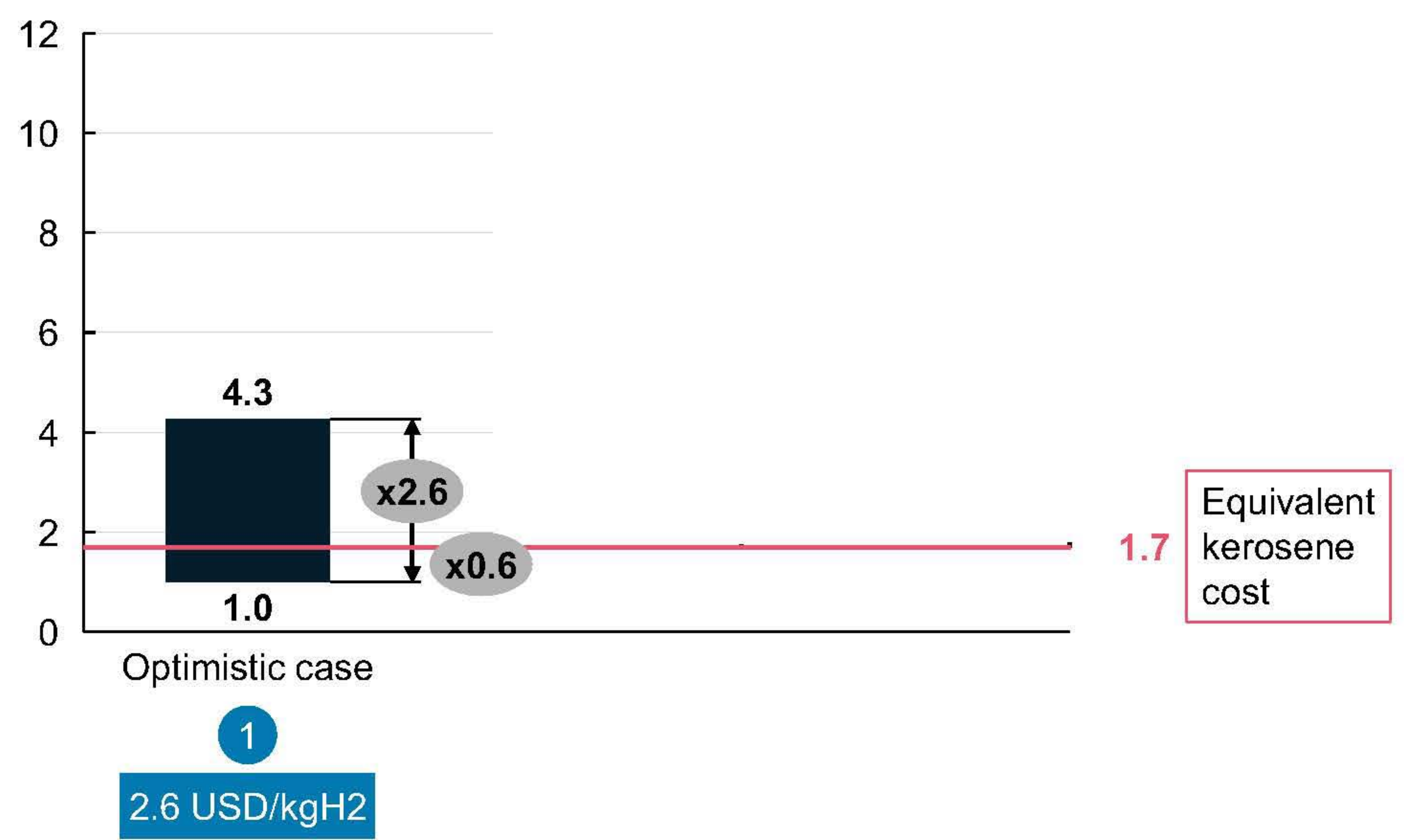
x Average LH2 costs

## Resulting LH2 fuel costs at the dispenser

- **Summing up** the cost ranges from literature for green H2 and liquefaction clustered in 3 ranges
- Plus, adding a **margin for transport, storage and refueling costs**
  - 5% for lower end
  - 20% for higher end
- Compared to kerosene costs<sup>1</sup> **only lower end of optimistic case results in a more competitive fuel cost with 1.0 USD/kgH2**
  - all average LH2 costs slightly to significantly more expensive



LH2 cost delivered (USD<sub>2020</sub>/kgH2)



<sup>1</sup> Average Jet A-1 price from 2019 of 0.6 USD/kg, forecast with high uncertainty and potentially changed costs



# Resulting LH2 costs at the dispenser in most cases significantly more expensive than reference kerosene costs



Cost analyses from literature: total LH2 fuel

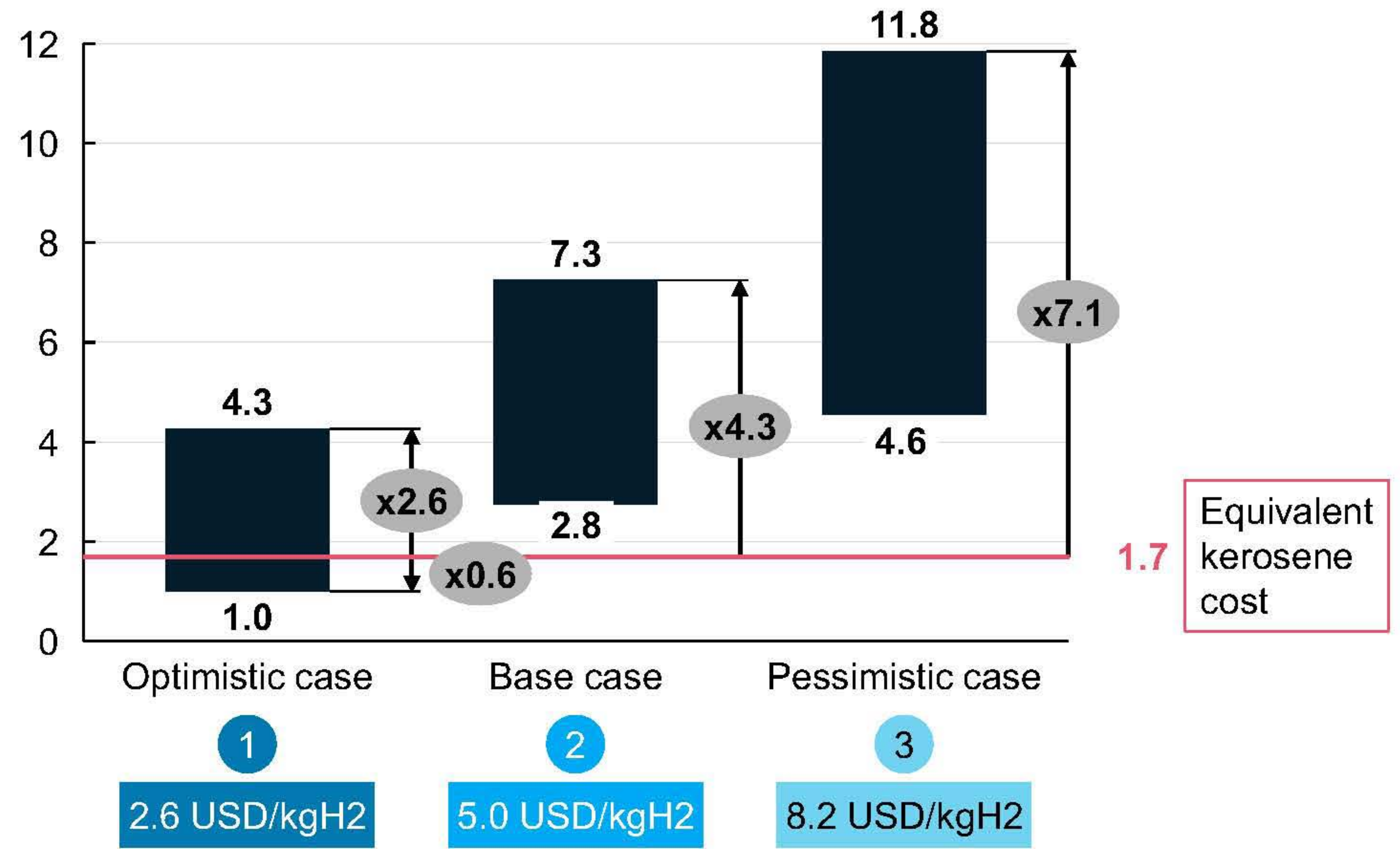
## Resulting LH2 fuel costs at the dispenser

- **Summing up** the cost ranges from literature for green H2 and liquefaction clustered in 3 ranges
- Plus, adding a **margin for transport, storage and refueling costs**
  - 5% for lower end
  - 20% for higher end
- Compared to kerosene costs<sup>1</sup> **only lower end of optimistic case results in a more competitive fuel cost with 1.0 USD/kgH2**
  - all average LH2 costs slightly to significantly more expensive

<sup>1</sup> Average Jet A-1 price from 2019 of 0.6 USD/kg, forecast with high uncertainty and potentially changed costs



LH2 cost delivered (USD<sub>2020</sub>/kgH2)





# DOC model used to analyze effects of introducing H2-powered aircraft

Direct operating cost (DOC) model

## DOC cost factors and potential change with H2-powered aircraft



- Affected by H2 aircraft technology
- Affected by H2 supply infrastructure
- Rather not affected by H2 aviation

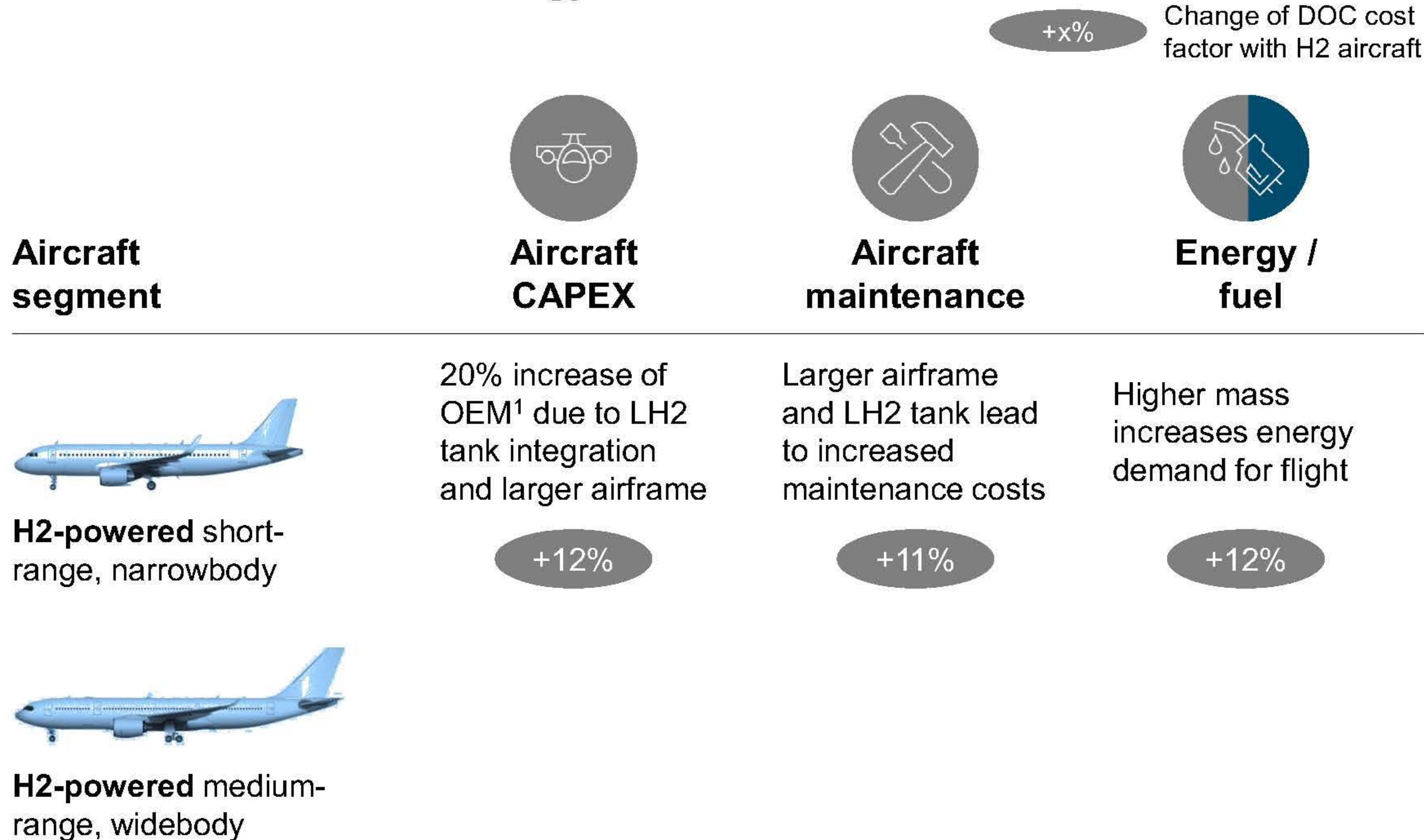
Detailed analyses to follow of effects from:

- A H2 aircraft technology
- B H2 supply infrastructure



# Cost increase with H2 aircraft technology due to larger airframe and H2 propulsion

Effects of H2 aircraft technology on DOC factors



## Insights



- Integration of **H2 combustion** engines and **LH2 tanks on-board** the aircraft
- H2 aircraft with **same design** and standard mission for comparison
- **No change in flight cycles** (utilization of aircraft) due to same mission profile

Note: pictures shown as an example only – new aircraft designs with 2035-projected conventional technology;

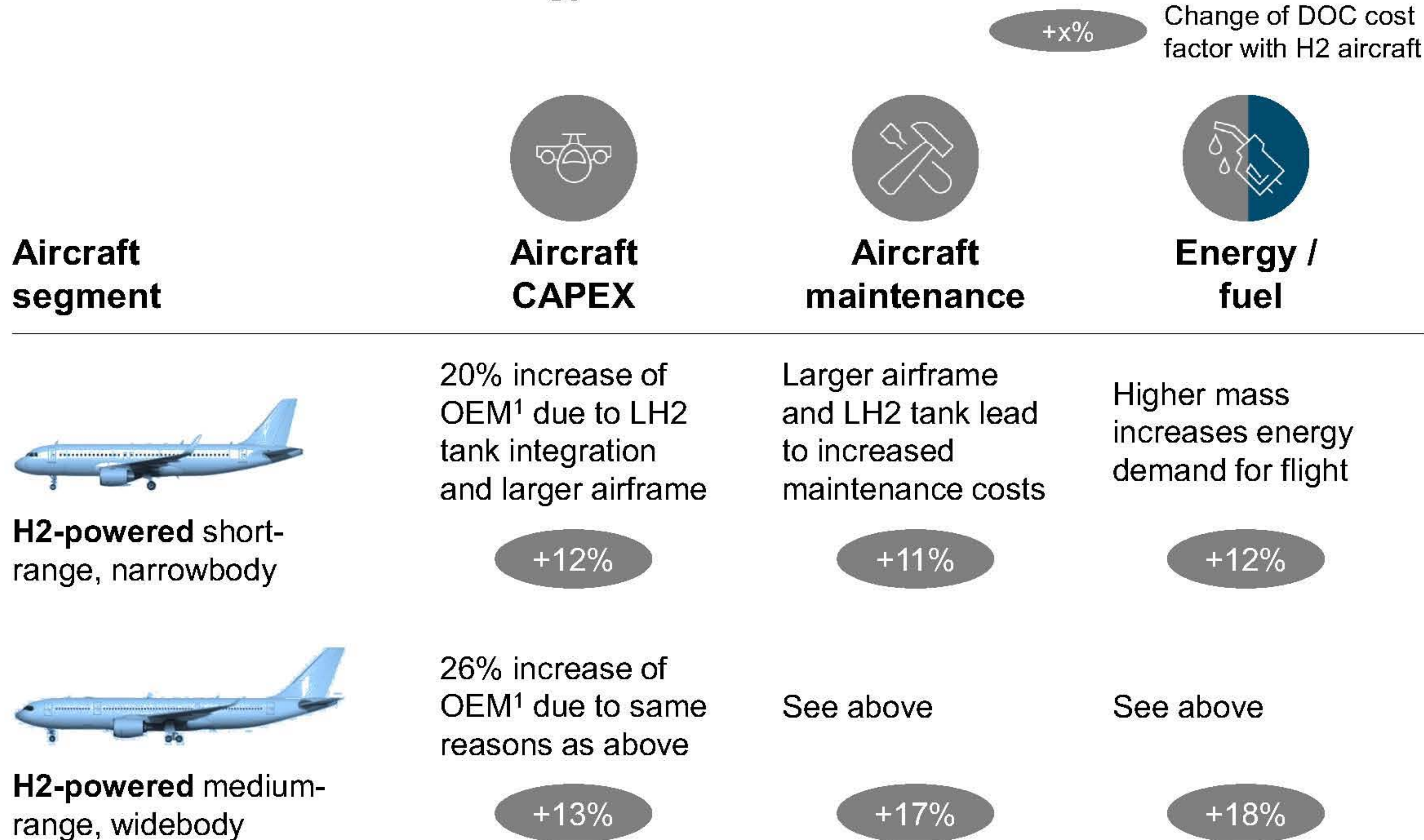
1. Operating empty mass

Source: pictures taken from norebbo.com, DLR study results



# Cost increase with H2 aircraft technology due to larger airframe and H2 propulsion

Effects of H2 aircraft technology on DOC factors



## Insights



- Integration of **H2 combustion** engines and **LH2 tanks on-board** the aircraft
- H2 aircraft with **same design** and standard mission for comparison
- **No change in flight cycles** (utilization of aircraft) due to same mission profile

Note: pictures shown as an example only – new aircraft designs with 2035-projected conventional technology;

1. Operating empty mass

Source: pictures taken from norebbo.com, DLR study results

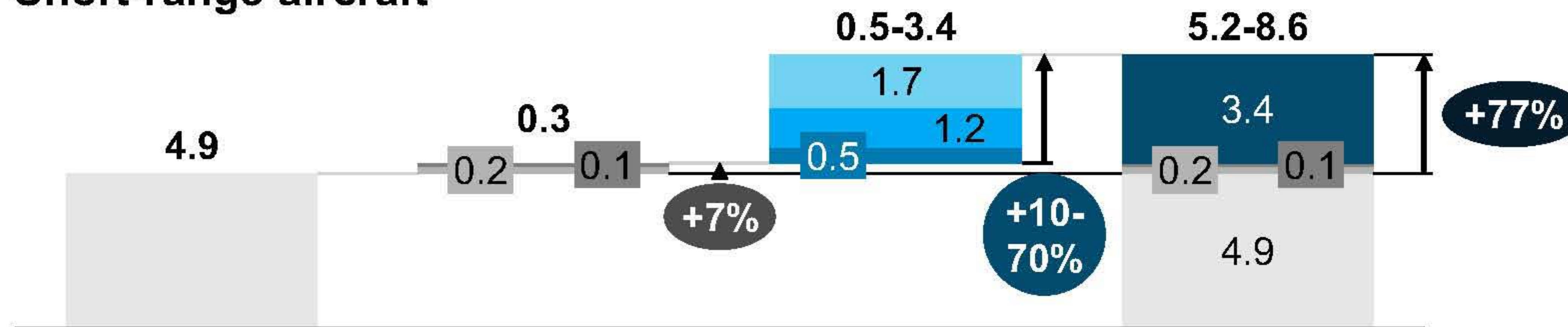


# Low-cost, green H2 supply key for competitiveness of H2-powered aviation

## Conclusions

Resulting total DOC, in USD<sub>2020</sub> per 100 ASK

### (A) Short-range aircraft



### (B) Medium-range aircraft



## Insights



- **Total DOC** of a H2-powered aircraft could **increase by 17-25%** in an optimistic LH2 fuel cost price of 2.6 USD/kgH2
- **Main cost increase driven by LH2 supply** costs and not aircraft technology – especially in base and pessimistic fuel cost cases
- **In a very best fuel cost** case of 1.0 USD/kgH2 the total DOC of the selected **H2 aircraft become competitive** to kerosene aircraft
- **Competitiveness analysis comes with high uncertainty** due to variable kerosene costs and potentially emission costs

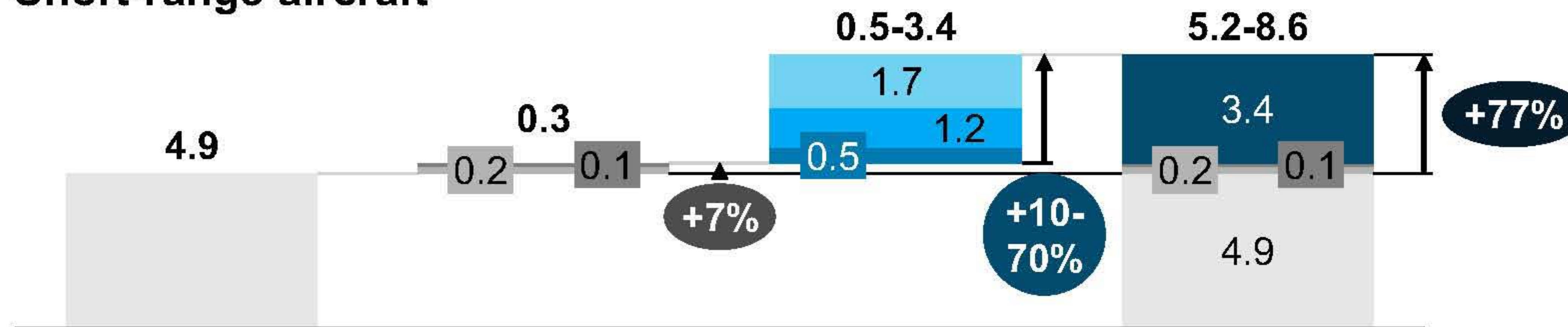


# Low-cost, green H2 supply key for competitiveness of H2-powered aviation

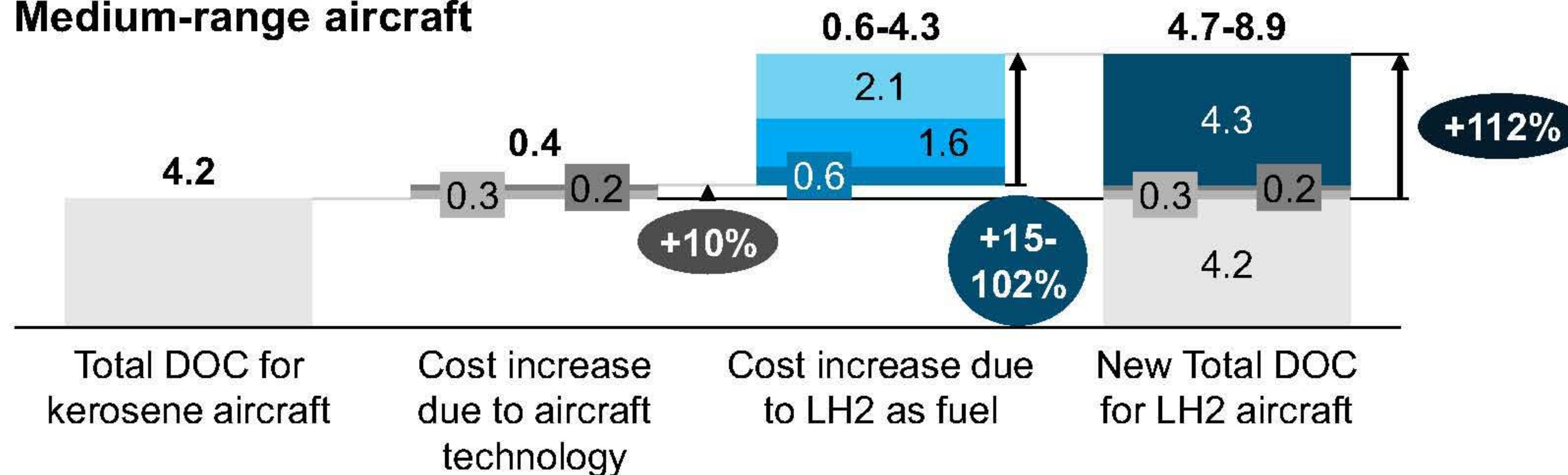
## Conclusions

Resulting total DOC, in USD<sub>2020</sub> per 100 ASK

### A Short-range aircraft



### B Medium-range aircraft



## Insights



- Total DOC of a H2-powered aircraft could increase by 17-25% in an optimistic LH2 fuel cost price of 2.6 USD/kgH2
- Main cost increase driven by LH2 supply costs and not aircraft technology – especially in base and pessimistic fuel cost cases
- In a very best fuel cost case of 1.0 USD/kgH2 the total DOC of the selected H2 aircraft become competitive to kerosene aircraft
- Competitiveness analysis comes with high uncertainty due to variable kerosene costs and potentially emission costs



# Several supply and refueling topologies available – as an example, gaseous H2 supply with on-site liquefaction is chosen

Topologies for LH2 refueling at airports

## Supply to airport:

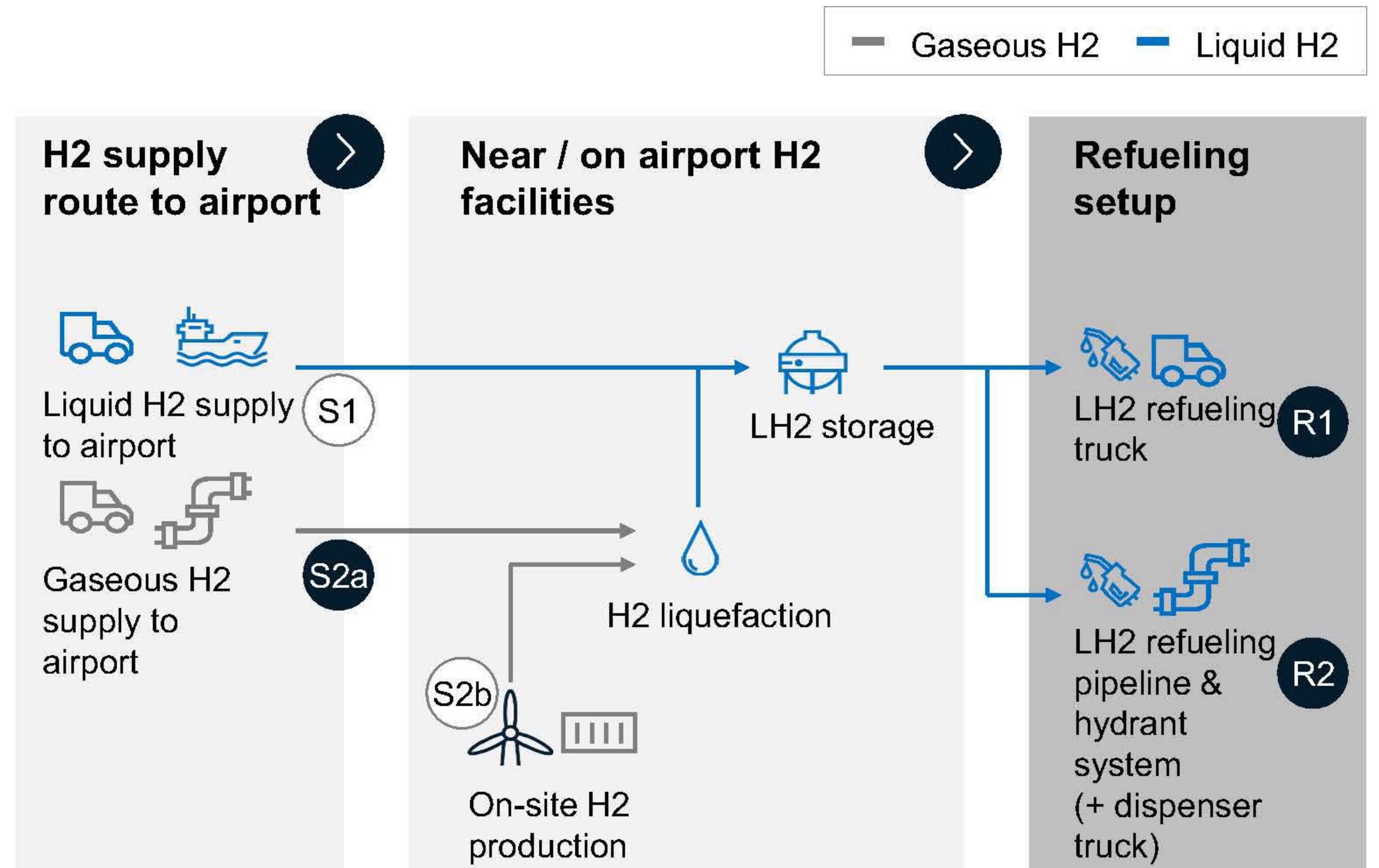
- H2 delivered in liquid or gaseous form (S1, S2a) depending on already existing infrastructure (e.g., H2 backbone gas pipeline)

## Near / on airport H2 facilities:

- Potential to produce H2 on-site (S2b)
- H2 liquefaction required if gaseous H2 is delivered or produced on-site
- LH2 storage facilities for buffer and reliability of supply

## Refueling setup:

- LH2 truck refueling incl. dispenser unit
- LH2 refueling pipeline & hydrant system – dispenser trucks to connect aircraft and hydrant

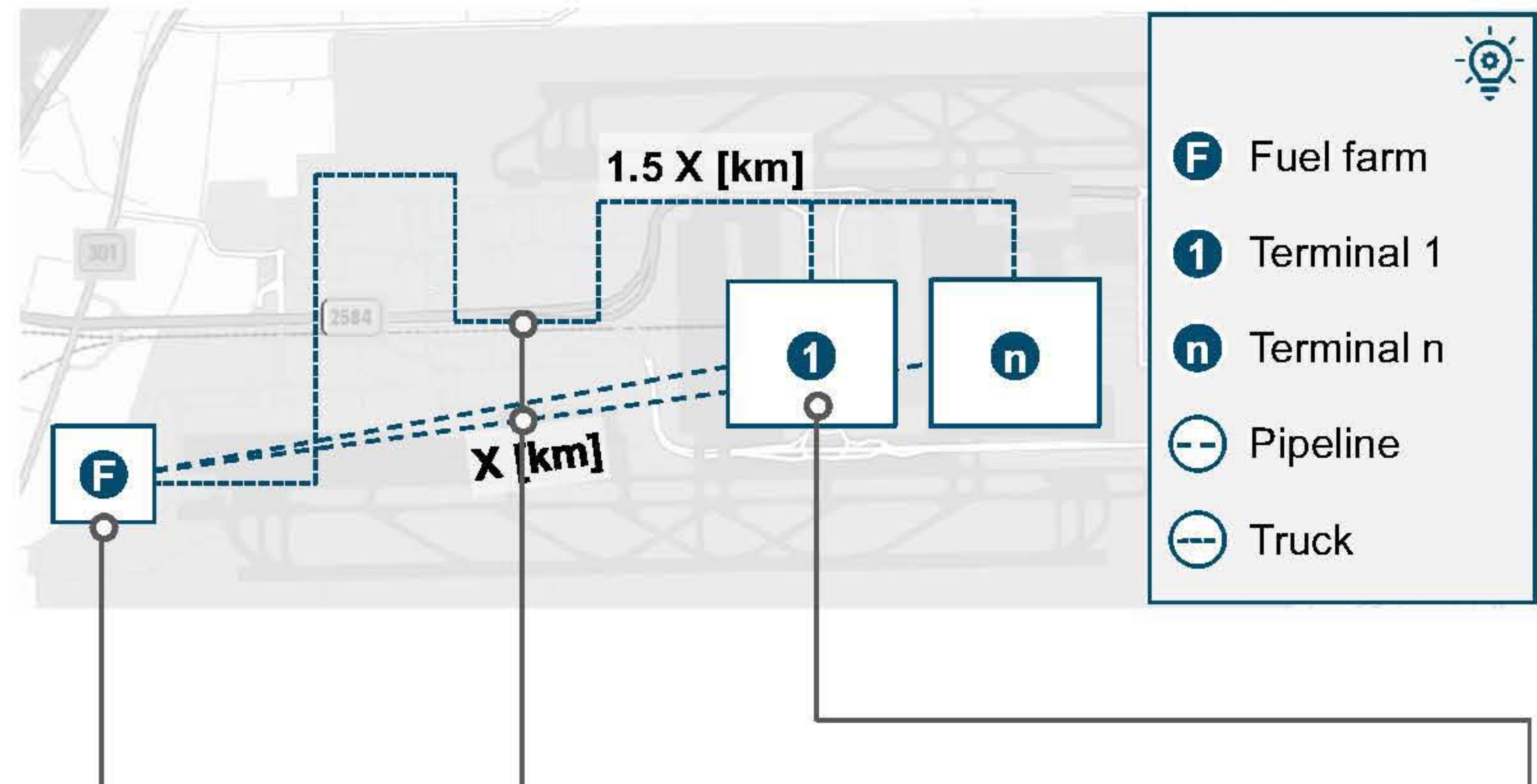




# Trucks or pipeline used to transport LH2 from central storage to aircraft refueling sites

Insights on geospatial context

## LH2 refueling design at generic airport



**3 km** chosen as **average distance x** in this study

### LH2 fuel farm

- Gaseous H2 delivered through pipeline to fuel farm then converted in H2 liquefaction
- LH2 storages also placed here

### Transmission / refueling setup

- LH2 refueling truck with longer distances – use of existing roads
- LH2 pipeline with direct route, but as closed circular pipeline
- Cryopumps used for both modes

### LH2 demand at aircraft stands

- Gates clustered in terminals – in this study, **no consideration of different terminals or gates**
- Extra mobile dispensing units (if pipelines used) parked at gates

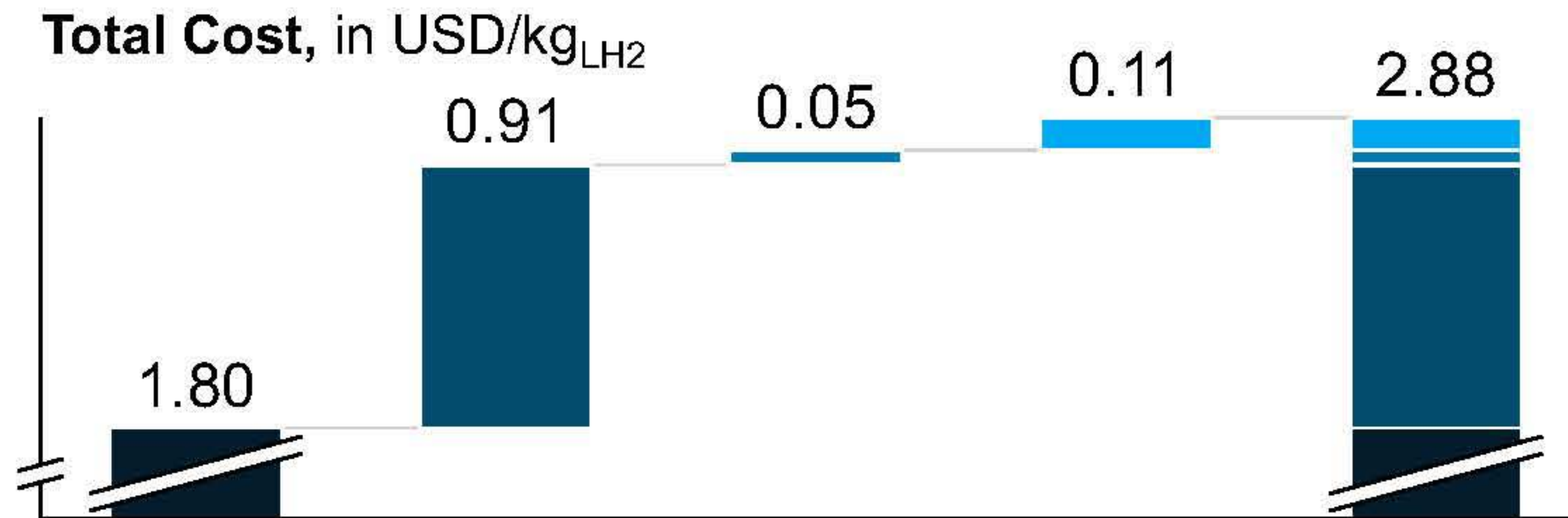


# LH2 refueling pipeline & hydrant system might only be necessary at larger airports

Detailed LH2 cost break-downs

1

**Hamburg:**  
LH2 truck  
refueling  
(80,000  
t<sub>LH2</sub> p.a.)



- Invest transport: **USD 6 Mn** (pipeline alternative: USD 30 Mn)
- Number of required trucks: 10

2

**Frankfurt:**  
LH2  
pipeline &  
hydrant  
(400,000  
t<sub>LH2</sub> p.a.)

■ Hydrogen ■ Liquefaction ■ Storage ■ Transport

## Insights



- All component costs include **CAPEX** and **OPEX** (incl. electricity demand, H2 losses etc.)
- **Refueling pipeline slightly more economic choice** for larger LH2 demands – limited scaling effects, since mobile dispenser unit still required
- Even though cost difference is small, **pipeline might be enabling technology** factor to avoid further traffic congestions due to large number of refueling trucks at busy airports

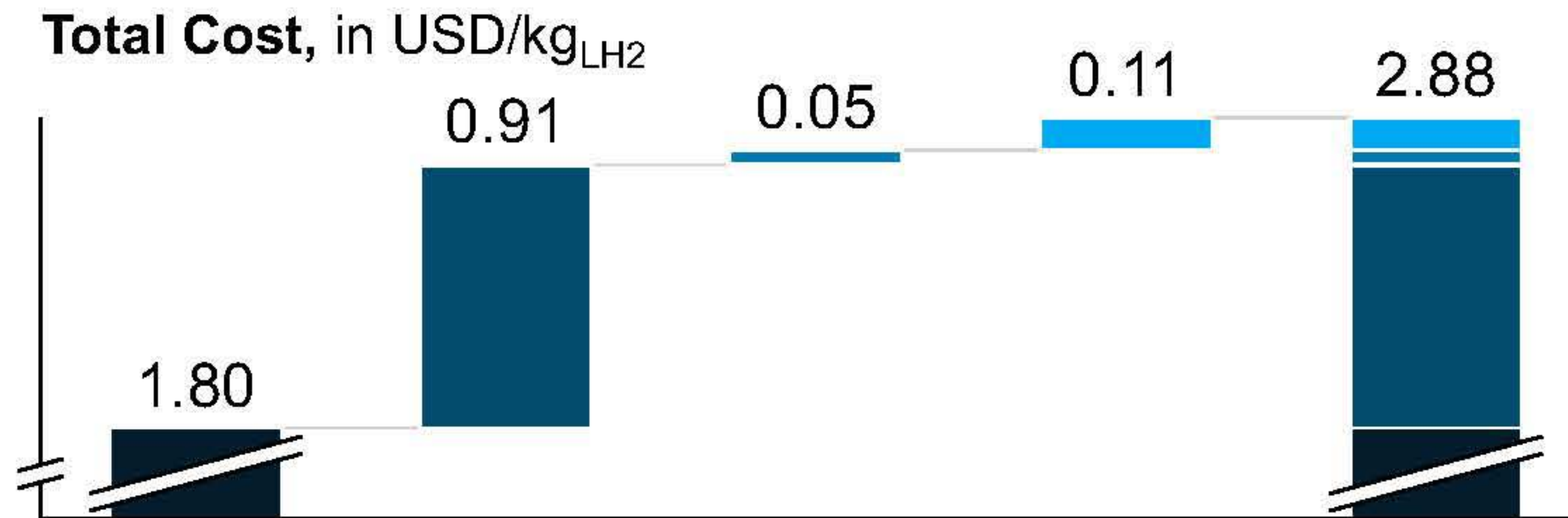


# LH2 refueling pipeline & hydrant system might only be necessary at larger airports

Detailed LH2 cost break-downs

1

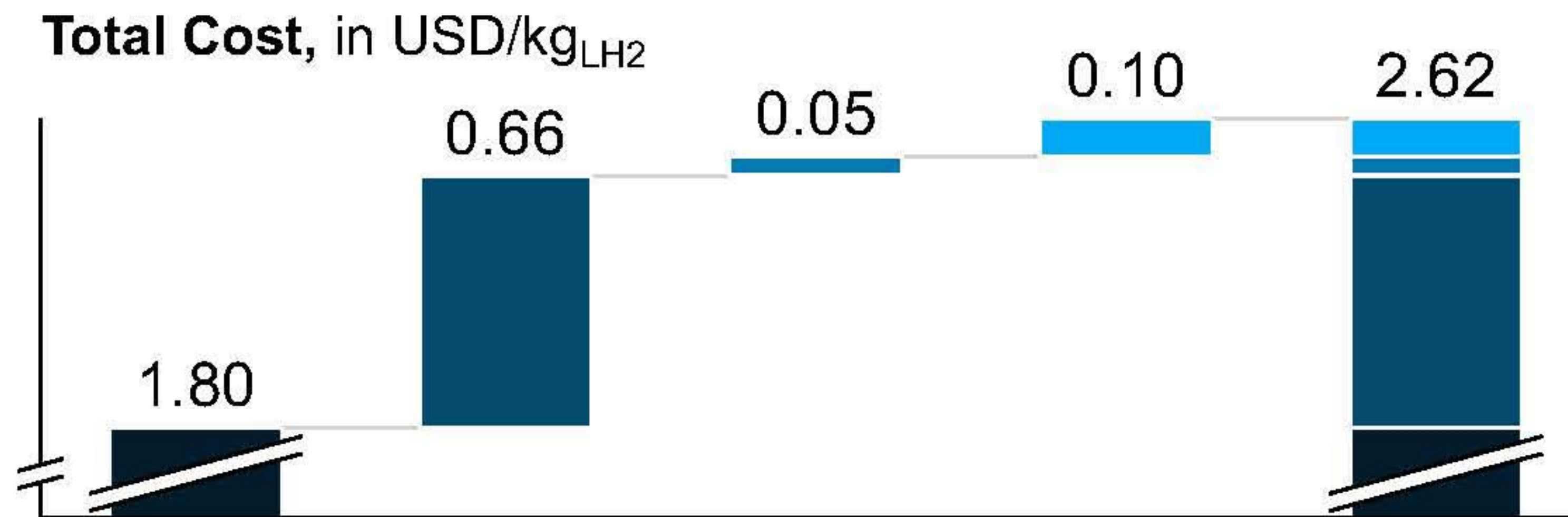
**Hamburg:**  
LH2 truck  
refueling  
(80,000  
t<sub>LH2</sub> p.a.)



- Invest transport: **USD 6 Mn** (pipeline alternative: USD 30 Mn)
- Number of required trucks: 10

2

**Frankfurt:**  
LH2  
pipeline &  
hydrant  
(400,000  
t<sub>LH2</sub> p.a.)



- Invest transport: **USD 55 Mn** (truck alternative: USD 31 Mn for 49 trucks)

■ Hydrogen ■ Liquefaction ■ Storage ■ Transport

## Insights



- All component costs include **CAPEX** and **OPEX** (incl. electricity demand, H2 losses etc.)
- Refueling pipeline **slightly more economic choice** for larger LH2 demands – limited scaling effects, since mobile dispenser unit still required
- Even though cost difference is small, **pipeline might be enabling technology** factor to avoid further traffic congestions due to large number of refueling trucks at busy airports



# Gliederung

- 1 Rolle von Wasserstoff im Gesamtenergiesystem
- 2 Wasserstoffbereitstellung für den Flugverkehr und Kostenabschätzungen
- 3 Forschungsbedarfe und Ausblick





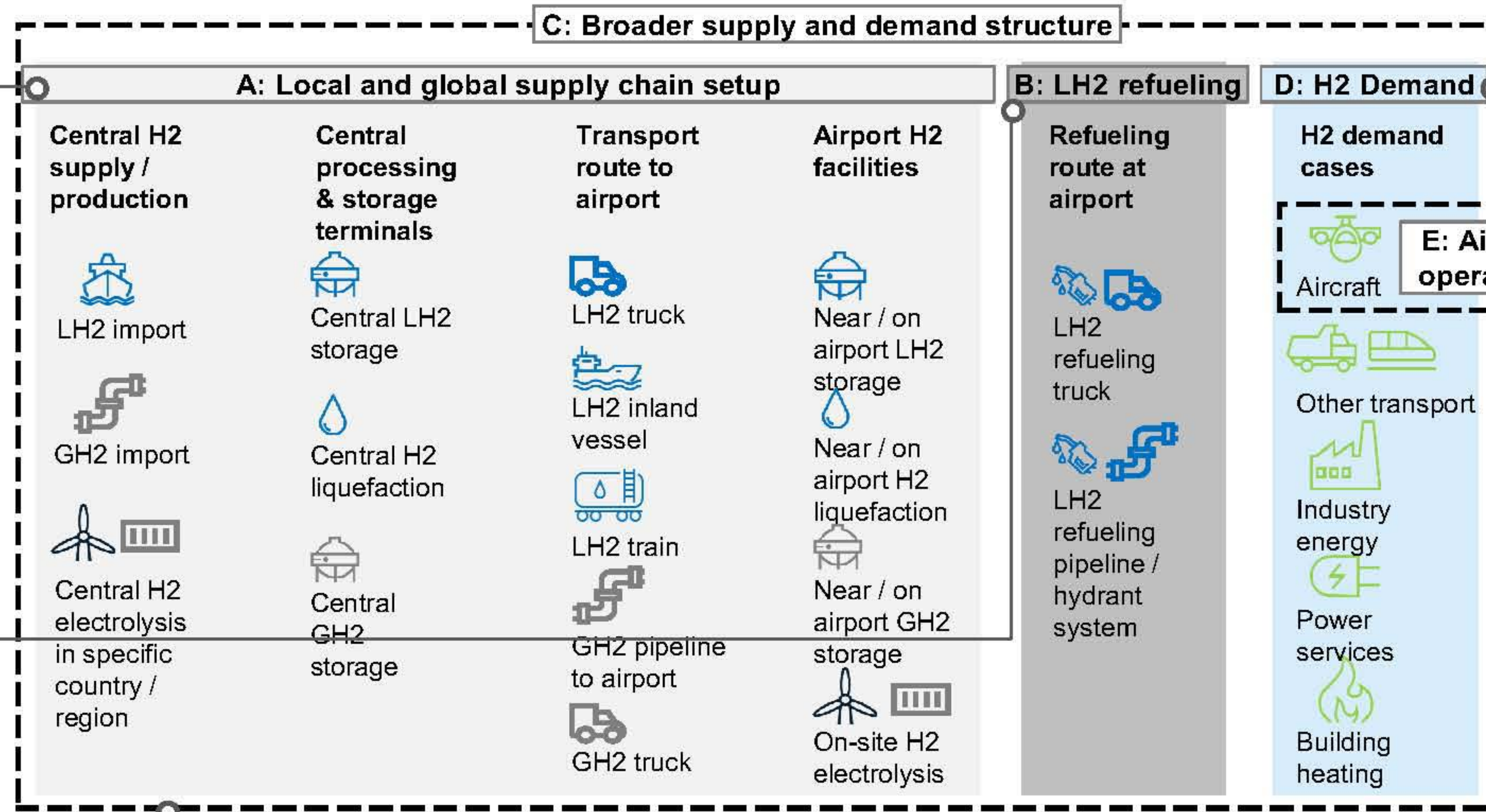
# Current and future research efforts

## A LH2 supply

Optimization studies of supply chain setups for low-cost, green LH2 supply at airports incl. geospatial aspects

## B LH2 refueling

Refueling as enabling technology brick for larger LH2 demands required – lack of demonstration and optimization studies



## D (L)H2 demand

Design studies of H2 hub energy systems increasing H2 demands especially in transition phase towards larger scale LH2 demands

## E Airline ops

Impact study of H2-powered aircraft and LH2 supply on air traffic routing and operations

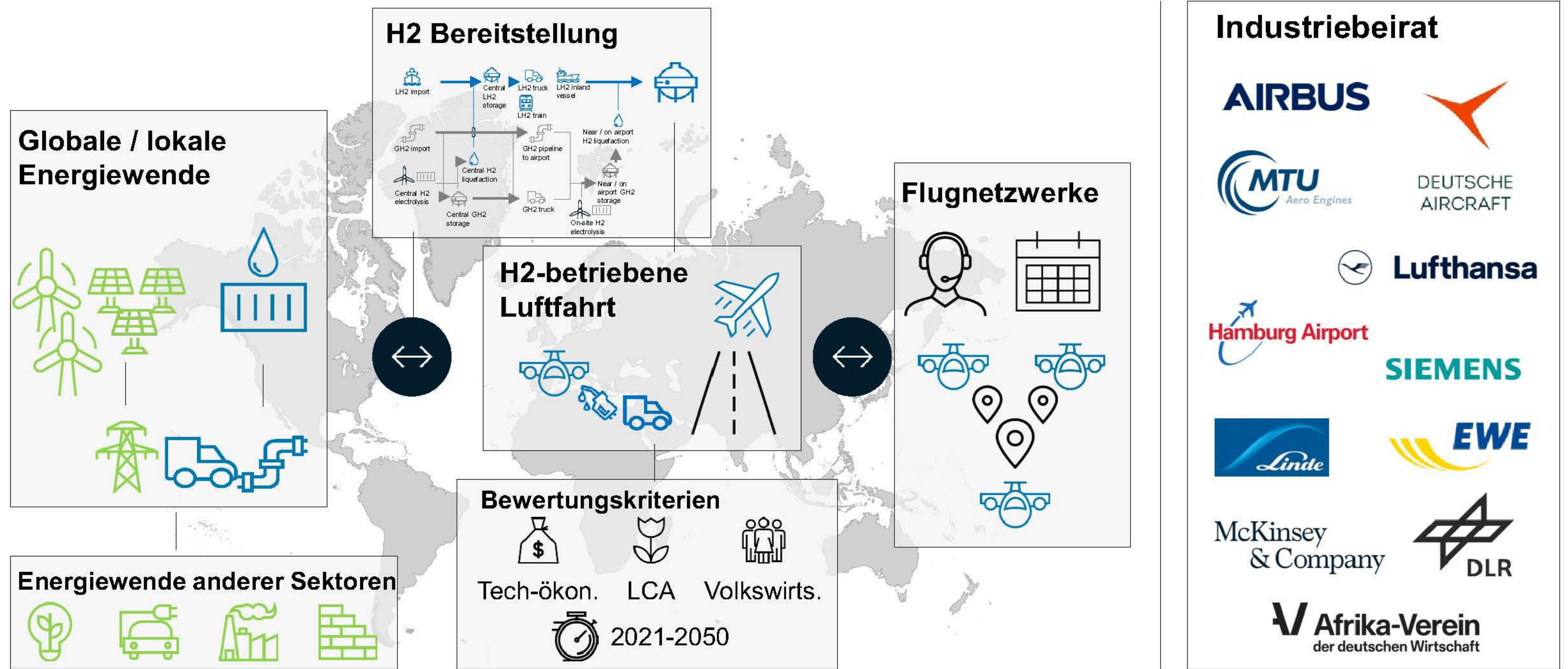
## C Broader supply and demand structure

Investigation of broader energy transition context and the role of LH2 supply for H2-powered air transport – globally but also on a regional level



# Ausblick: Projekt HyNEAT - Bereitstellung von LH2 für die Luftfahrt mit Schnittstellen zur Energiewende und Flugplanung

Überblick zum Projekt HyNEAT (1/2)





# Ausblick: Projekt HyNEAT - Bereitstellung von LH2 für die Luftfahrt mit Schnittstellen zur Energiewende und Flugplanung

Überblick zum Projekt HyNEAT (2/2)



## Übergeordnete Forschungsfragen

- Wie sieht eine **optimale, langfristig wettbewerbsfähige LH2 Bereitstellungskette** für die Luftfahrt aus? Welche Rolle spielt diese aus makroökonomischer Sicht für eine "Industrie-Nation" wie Deutschland?
- Wie groß sind lokale vs. globale **LH2 Bedarfe** der Luftfahrt und wie können diese im Kontext der **Energiewende integriert** werden?
- Welche **Flugrouten** könnten mit H2 Flugzeugen betrieben werden und was sind die Einflüsse unterschiedlicher LH2 Kosten auf die **Netzwerkplanung** von Airlines?
- Übergeordnet / auf dem Weg dorthin: Wie sehen **Transformationspfade** für die Industrie / Politik aus, um LH2 in der Luftfahrt zu ermöglichen?



## Liefergegenstände

- Übersicht der **Anforderungen an globale und lokale Bereitstellungskonzepte** von LH2 für die Luftfahrt – techno-ökonomische sowie volkswirtschaftliche Implikationen für ausgewählte Regionen
- Bewertung des **Zusammenspiels mit der Energiewende** sowie Identifikation von Synergien oder Konflikten / Engpässen
- Analyse der **Auswirkung** einer LH2 Infrastruktur auf **Flugnetzwerke** von Airlines





# Vielen Dank für Ihr Interesse!

Contact:

Julian Hölzen: [hoelzen@ifes.uni-hannover.de](mailto:hoelzen@ifes.uni-hannover.de)

Richard Hanke-Rauschenbach: [hanke-rauschenbach@ifes.uni-hannover.de](mailto:hanke-rauschenbach@ifes.uni-hannover.de)

CONFIDENTIAL AND PROPRIETARY

Any use of this material without specific permission of the Institute of Electrical Energy Systems at Leibniz University Hannover is strictly prohibited

*Picture from airbus.com*



Wie kann Grünes Fliegen  
im Ökosystem Luftfahrt  
gelingen?

# Antriebssysteme

**Prof. Dr.-Ing. Jens  
Friedrichs**

Technische Universität Braunschweig,  
Institut für Flugantriebe und  
Strömungsmaschinen





Technische  
Universität  
Braunschweig



## Antriebssysteme mit (und ohne) Wasserstoff

Wie kann Grünes Fliegen im Ökosystem Luftfahrt gelingen?

Jens Friedrichs



# Agenda

## 1) Herausforderungen und Motivationen

- Emissionen
- Energiekosten
- Effizienz – Antrieb und Flugzeug

## 2) Ansätze & Lösungen

- One solutions does not fit all...
- Wasserstoff-Antriebssysteme und Brennstoffzellen
- Tank und andere Subsysteme
- Kosten – Produktion, Wartung, DOC

## 3) Zusammenfassung



# Agenda

## 1) Herausforderungen und Motivationen

- Emissionen
- Energiekosten
- Effizienz – Antrieb und Flugzeug

## 2) Ansätze & Lösungen

- One solutions does not fit all...
- Wasserstoff-Antriebssysteme und Brennstoffzellen
- Tank und andere Subsysteme
- Kosten – Produktion, Wartung, DOC

## 3) Zusammenfassung



# Herausforderung - Emissionen

- Nicht alle alternativen Antriebe sind gleichermaßen nachhaltig
- „Operatives Ranking“
  1. Batterie-elekt. Fliegen
  2. H2 – BSZ – elekt. Fliegen
  - 3: H2 – direkt burning
  - 4: SAF
  - 5: State-of-the-art

	effects from NO <sub>x</sub> (O <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub> )	aerosol effects	contrails and contrail cirrus cover	contrails and contrail cirrus radiative forcing	indirect cloud effects	
market-based measures (CORSIA, ICAO)	=	=	=	=	=	↗ stronger impact than conventional
biofuels, PTL	=	↓	=	↓	↓	= same impact as conventional
e2flight: H <sub>2</sub> drives gas turbine or diesel engine	↓	↓	↗	?	↓	↓ smaller impact than conventional
e2flight: H <sub>2</sub> for fuel cells	0	0	↗	?	0	0 no impact
e2flight: batteries	0	0	0	0	0	? impact not known

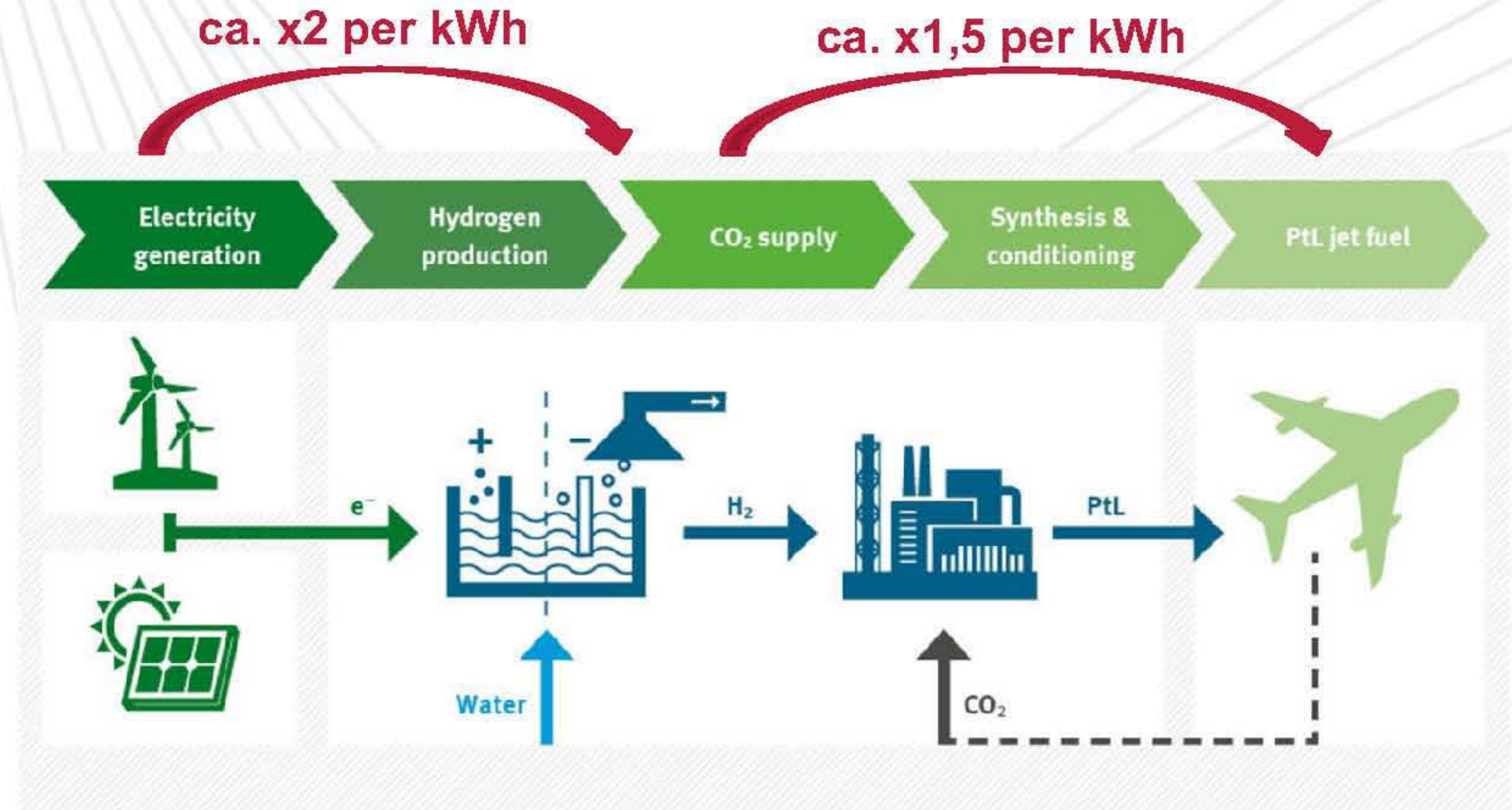
only emissions from operations considered  
Source [5]



# Herausforderung - Energiekosten

## “Grüner” Strom als Basis

- PtG via Elektrolyse verdoppelt die Kosten (Transport und Verflüssigung on top +40%)
- PtL-SAF via Fischer-FT oder Methanol Synthese
- Kosten pro kWh ca. 3-4fach vs. Ausgangs-kWh und sehr prozess-sensitiv



Power-to-liquids production (generic scheme), Source [6]

→ „Veredelung der kWh“ treibt Kosten

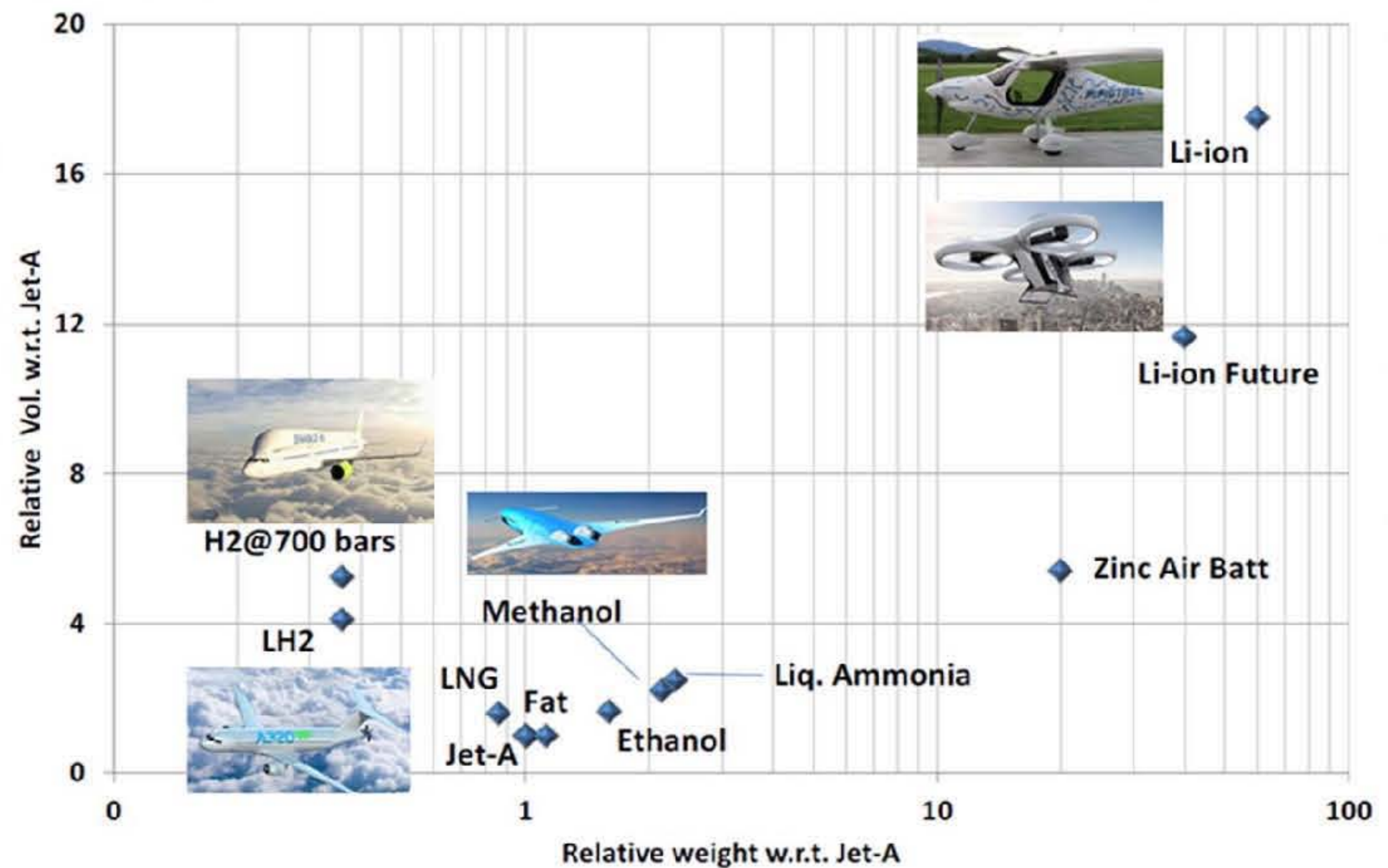
→ Luftfahrt-H<sub>2</sub> muss flüssig sein



# Herausforderungen - Energiedichte

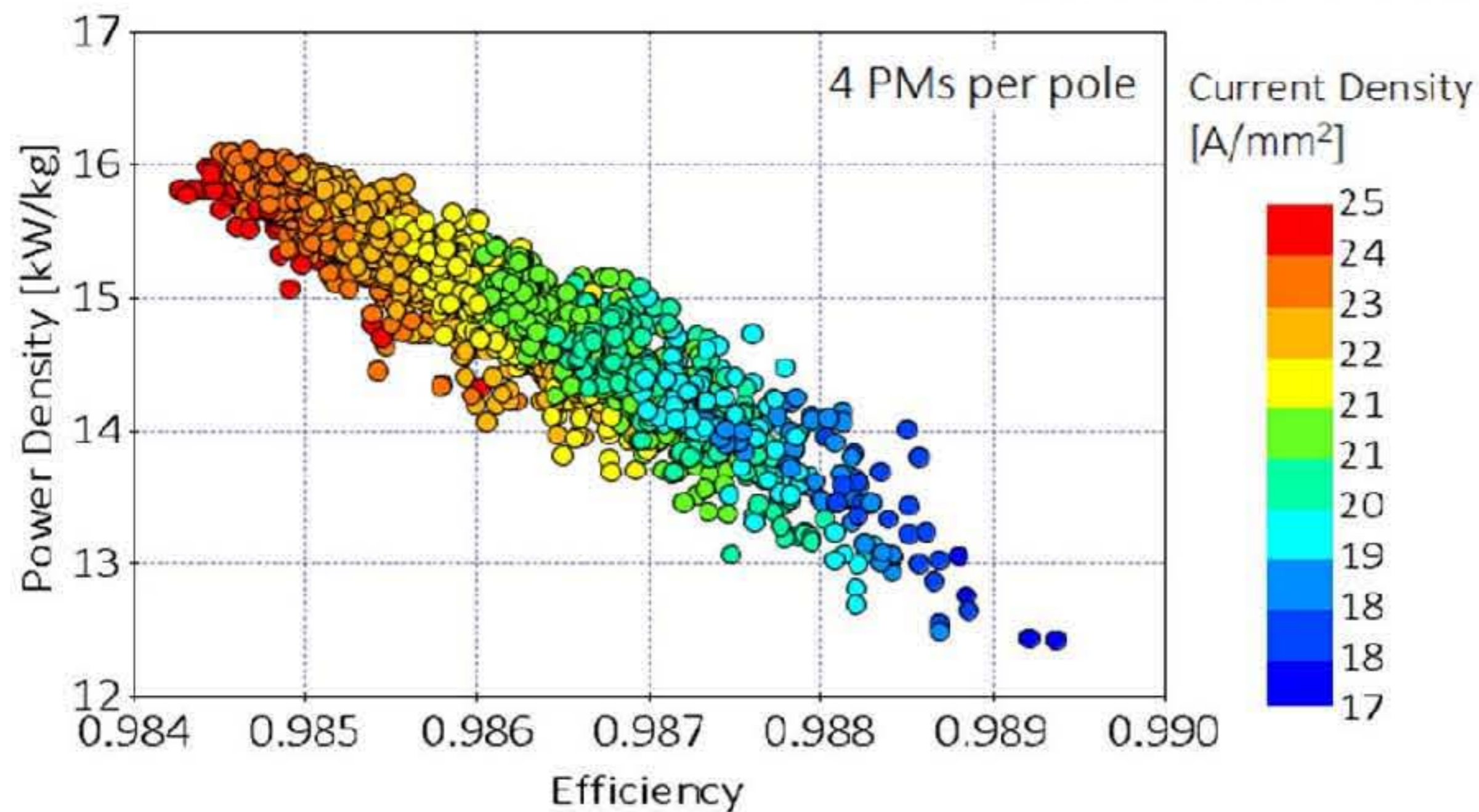
- Energiedichte (gravimetrisch & volumetrisch) wird elektrisches Fliegen signifikant begrenzen  
→ auch langfristig  
→ auch mit Brennstoffzellen
- Batterie-elektrisches Fliegen ist Fliegen mit konstantem Gewicht
- Brennstoffzellen-Fliegen fast auch

→ Wirkungsgradsteigerung von Antrieb & Flugzeug erforderlich!



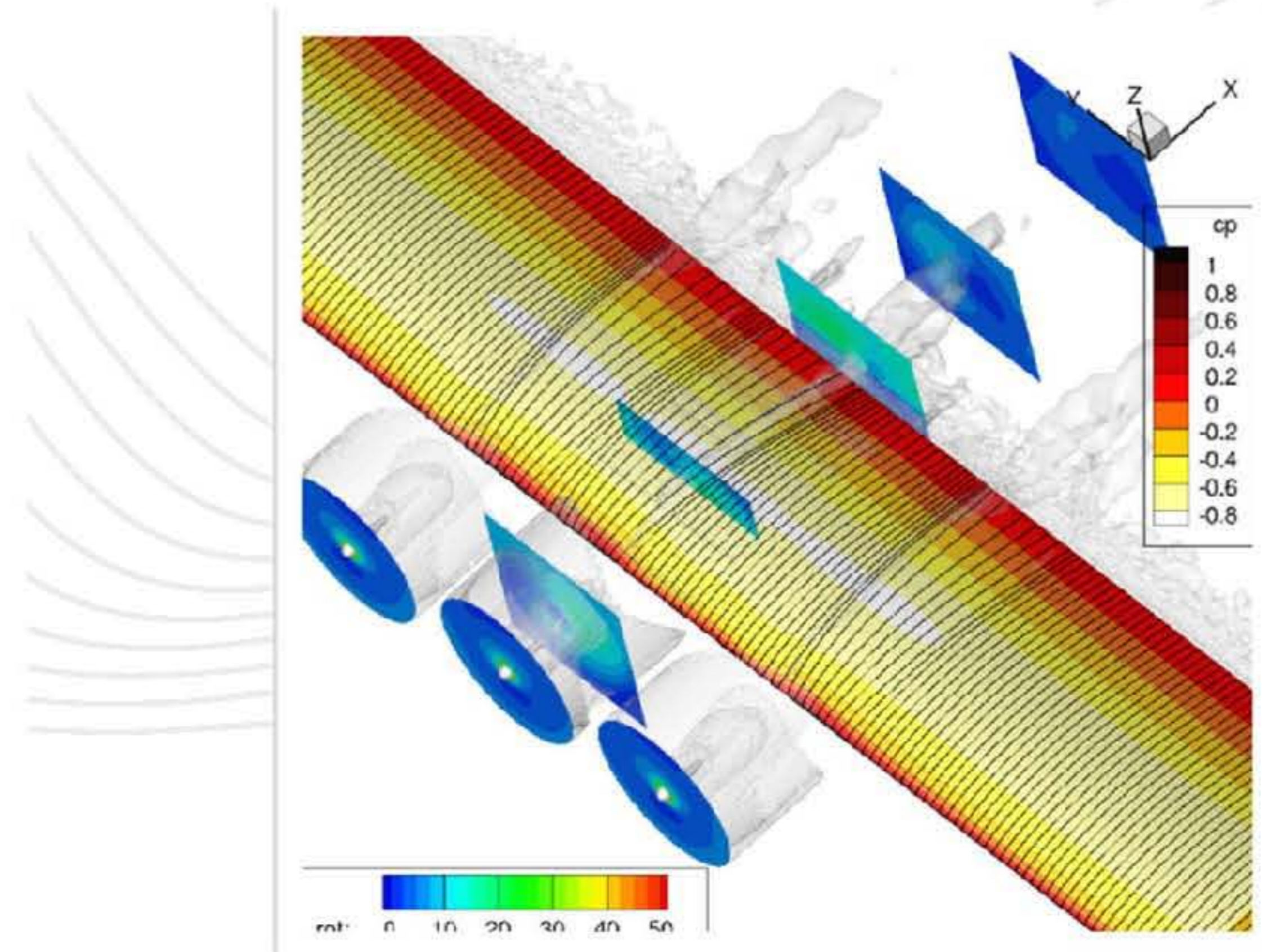


# Herausforderungen – Effizienz Antrieb und Flugzeug



4MW Electric generator, design speed 15.000 rpm, source [8]

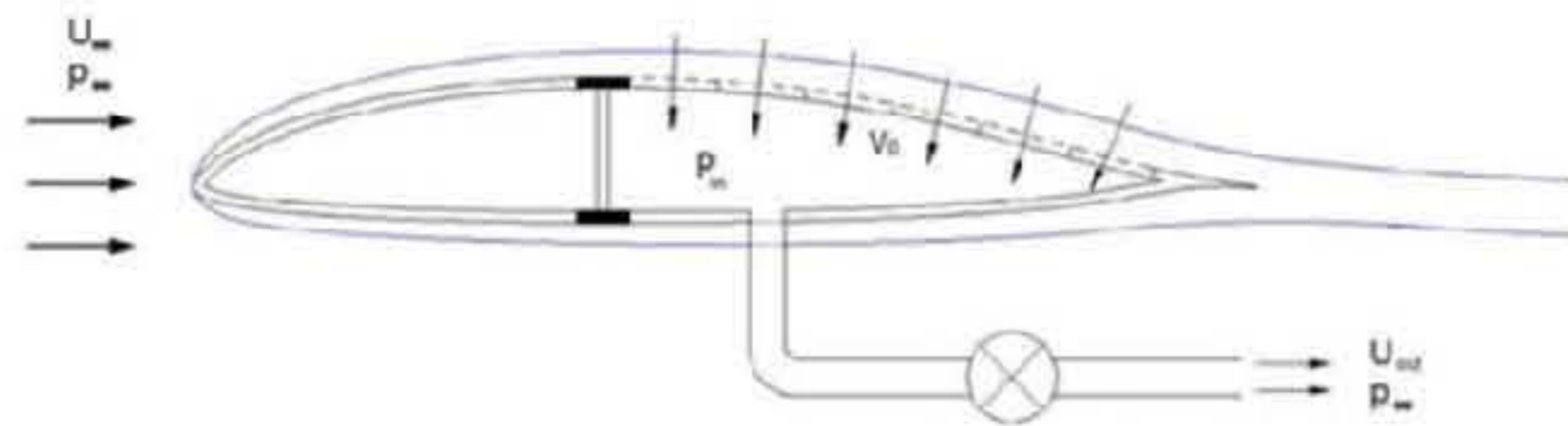
- Starker Anstieg E-Motor-Leistungsdichte über die letzten 5 Jahre (25kW/kg in 2030?)
- Trade-Off Leistungsdichte vs. Wirkungsgrad
- Kühlung als große Herausforderung



- Synergie- und Konfliktpotential an Subsystemgrenzen
- z.B: Antriebsintegration



# Herausforderungen – Effizienz Antrieb und Flugzeug



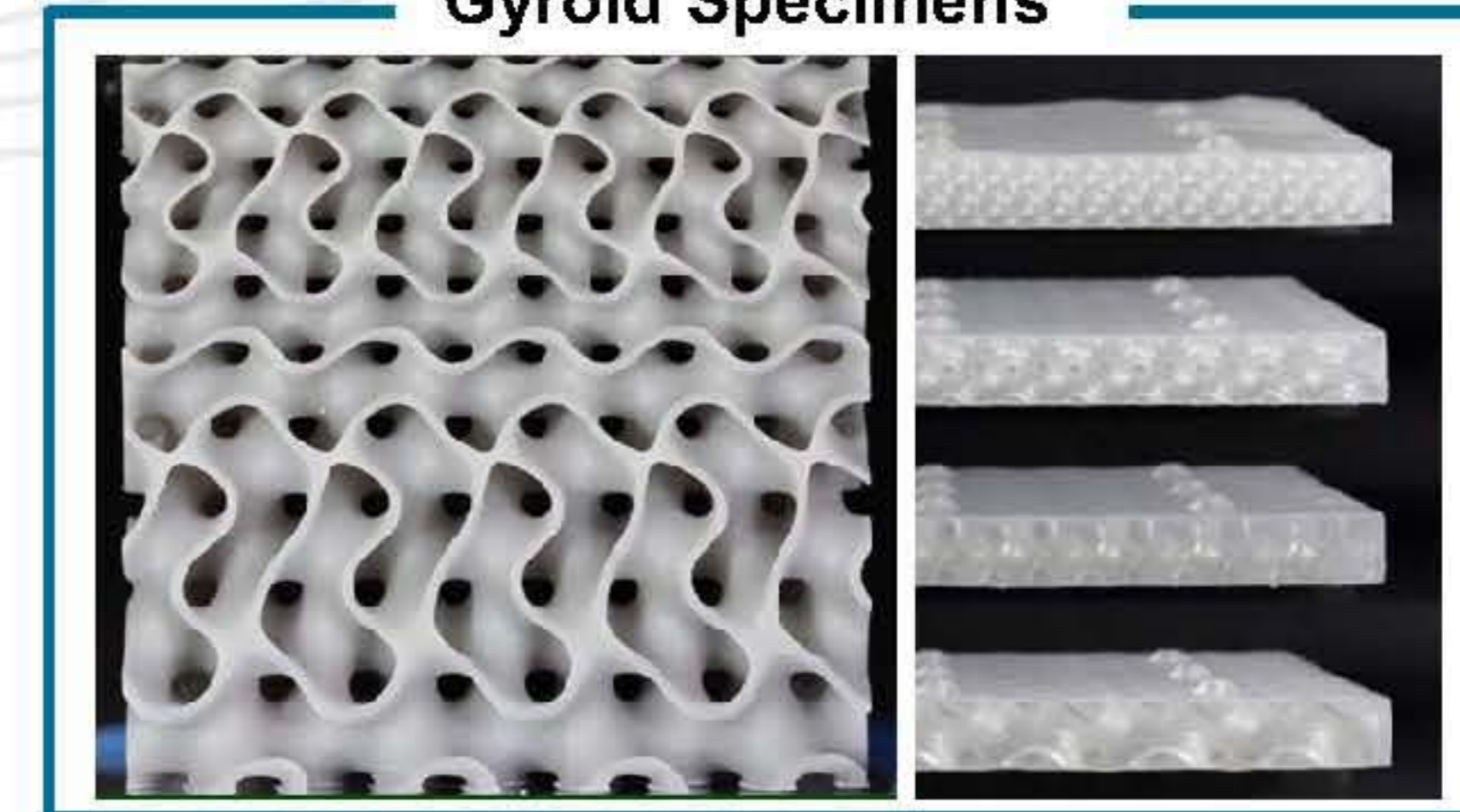
Schematische Darstellung Grenzschichtabsaugung, source [12]

- Methoden für aktive Laminarhaltung
- Produktion mit modernen Verfahren
- Aerodynamische und strukturmechanische Charakterisierung von Innenstrukturen
- Betrieb und MRO

Porous Skin (SLM)



Gyroid Specimens





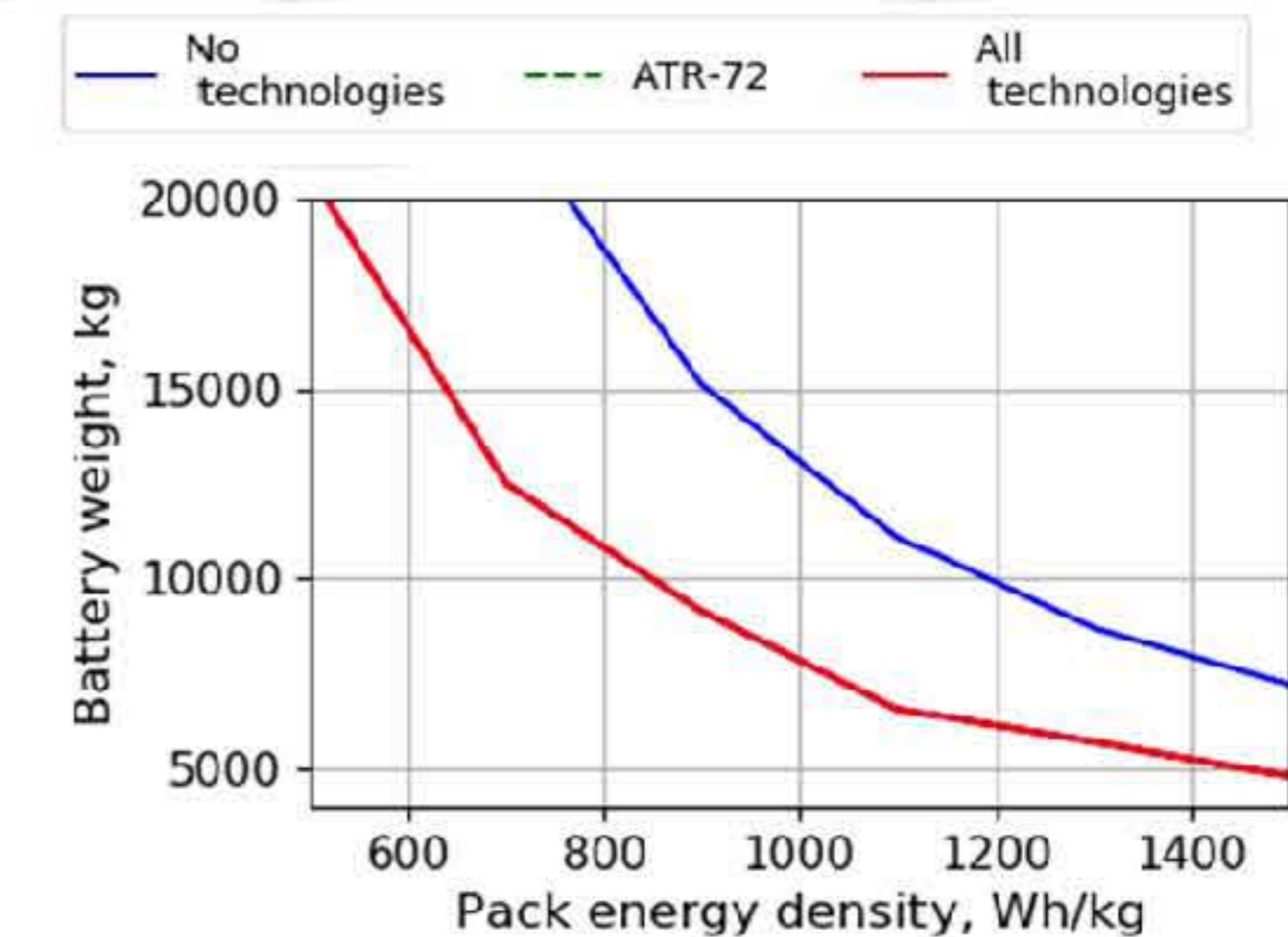
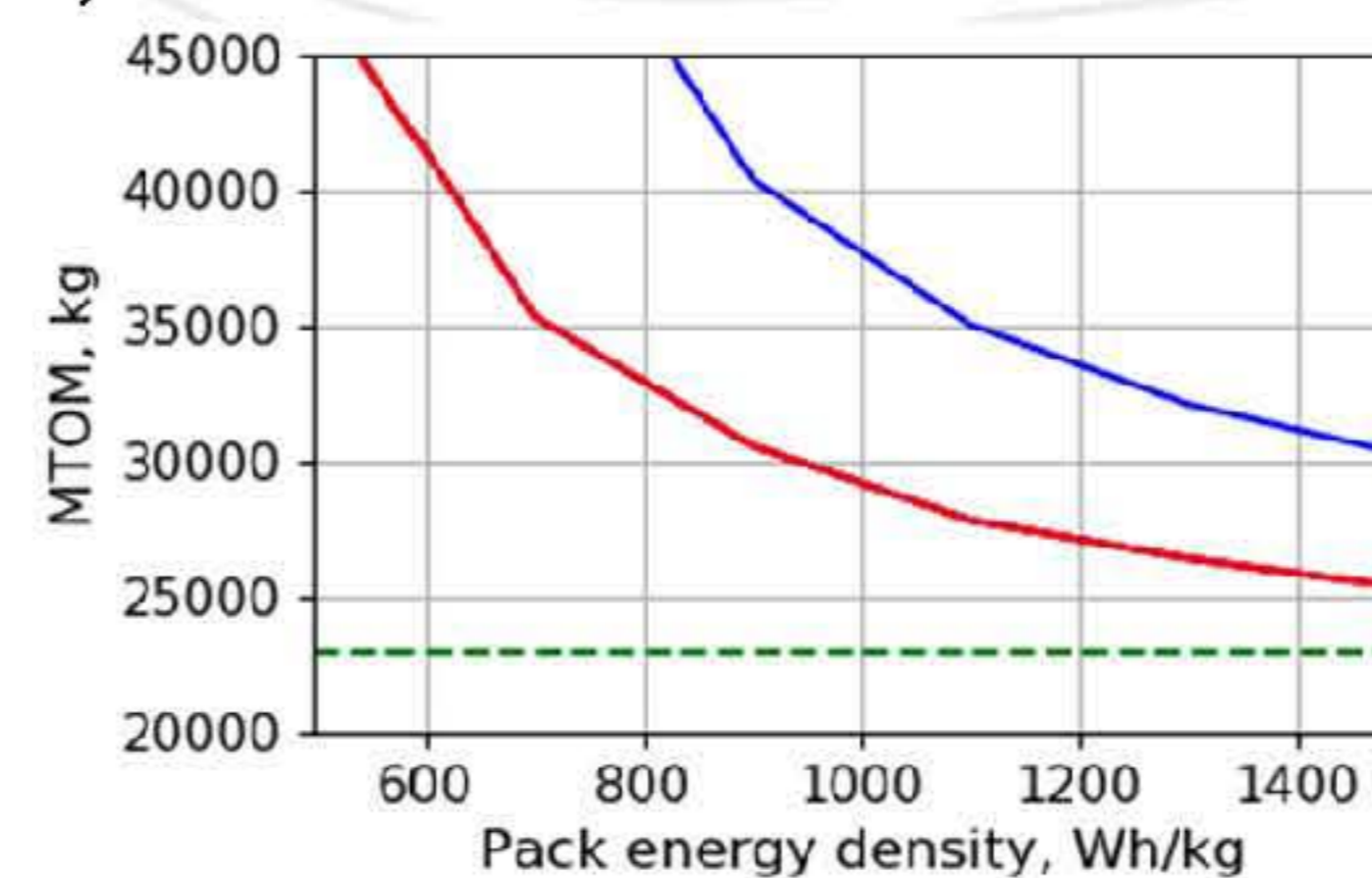
# Herausforderungen – Effizienz Antrieb und Flugzeug

- **Neue Antriebe müssen den kompletten AC-Neuentwurf nach sich ziehen (können)**
- Auch neue Technologien zur Verbrauchsreduzierung außerhalb der elektrischen Propulsoren, z.B.
  - aktive Laminarhaltung
  - aktives Lastmanagement (Böenkontrolle)
  - Flügel hoher Streckung

→ **Integrale, systemische Betrachtung**



Short range study, 1000km, Ma=0,42) [9]





# Agenda

## 1) Herausforderungen und Motivationen

- Emissionen
- Energiekosten
- Effizienz – Antrieb und Flugzeug

## 2) Ansätze & Lösungen

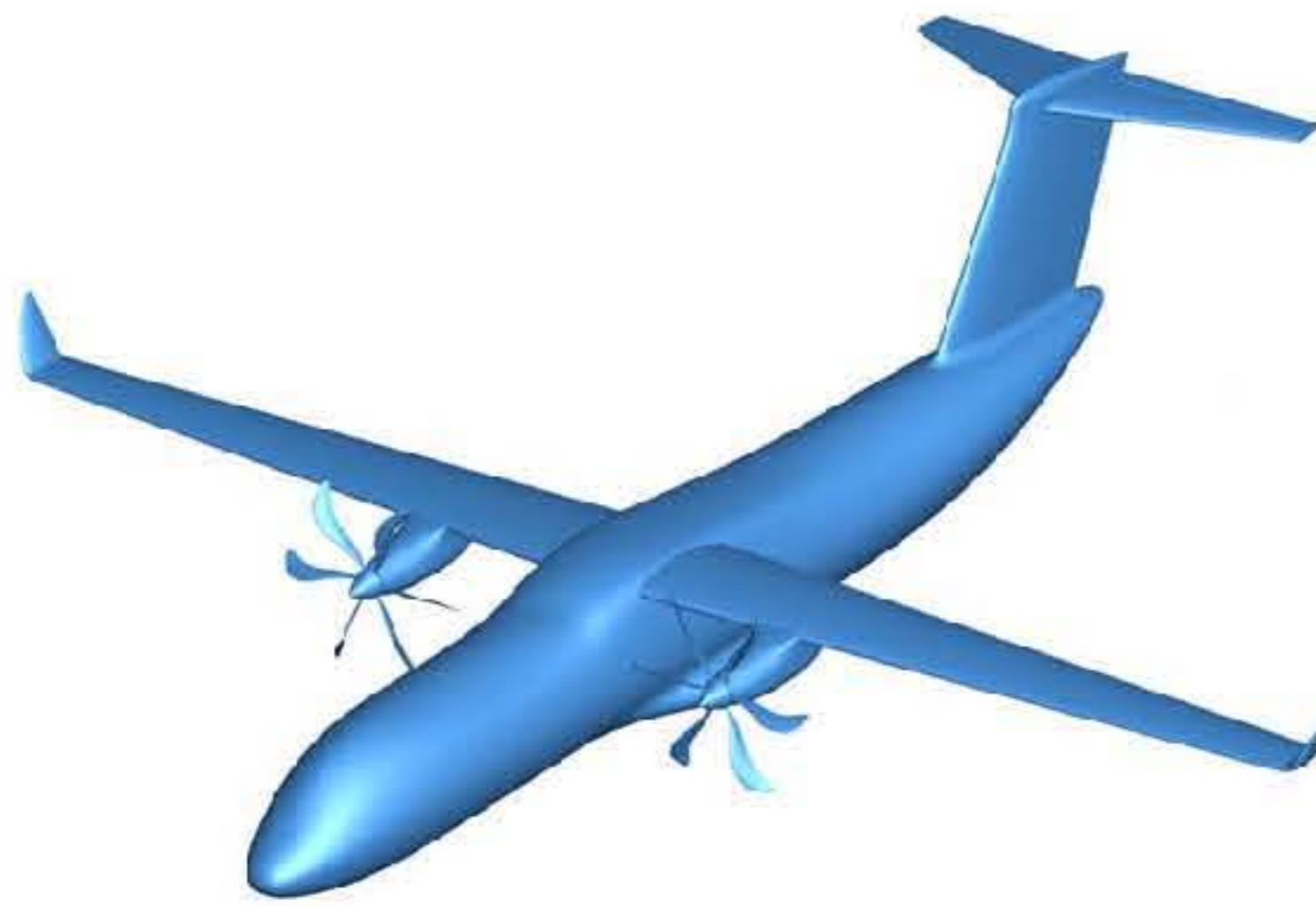
- One solutions does not fit all...
- Wasserstoff-Antriebssysteme und Brennstoffzellen
- Tank und andere Subsysteme
- Kosten – Produktion, Wartung, DOC

## 3) Zusammenfassung



# “Form follows function” – one solution does not fit all...

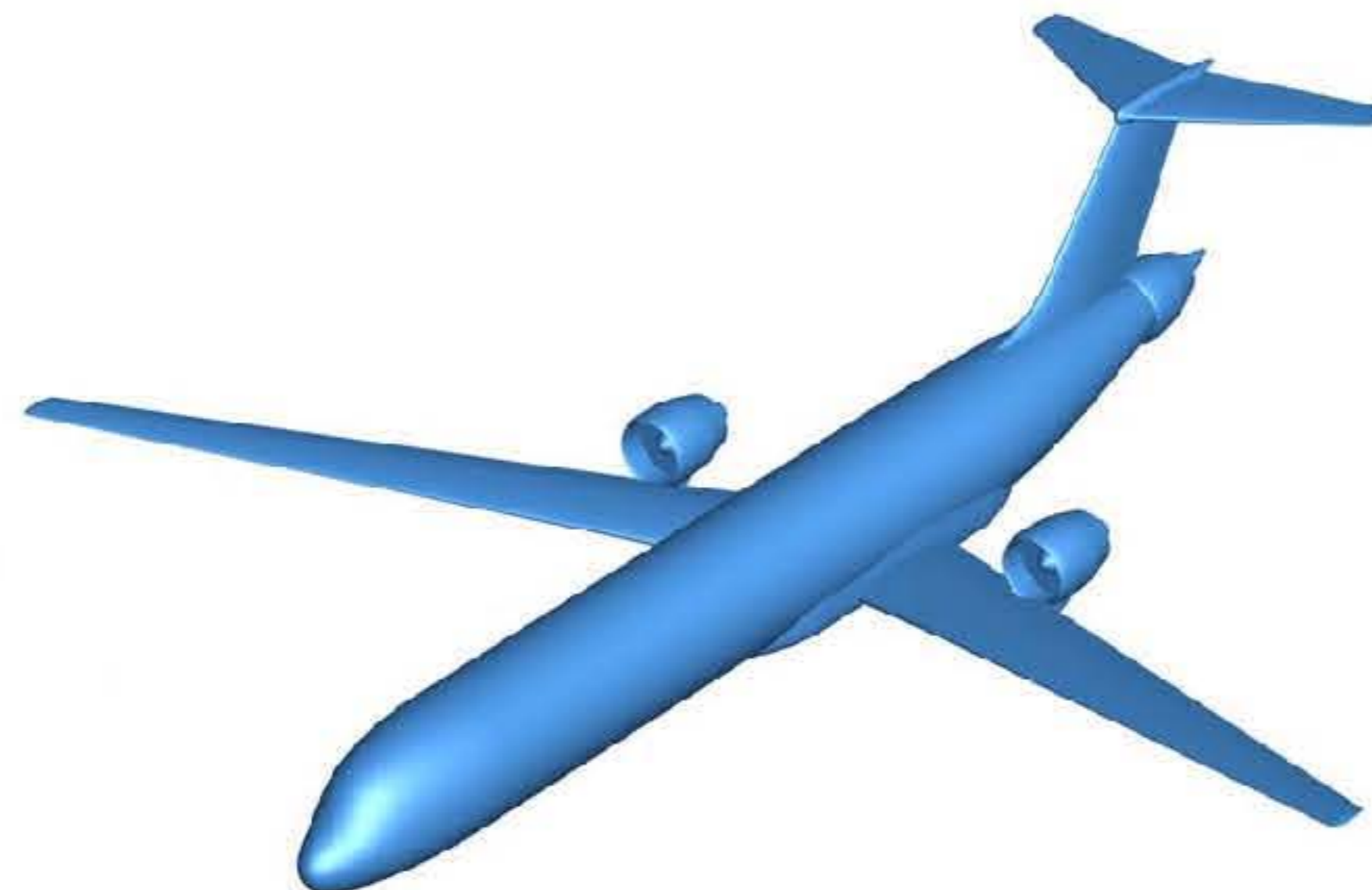
## Regional & Kurzstrecke



### Elektro-hybrid

- Batteriespeicher mit:
- Brennstoffzelle
- H2-Burning

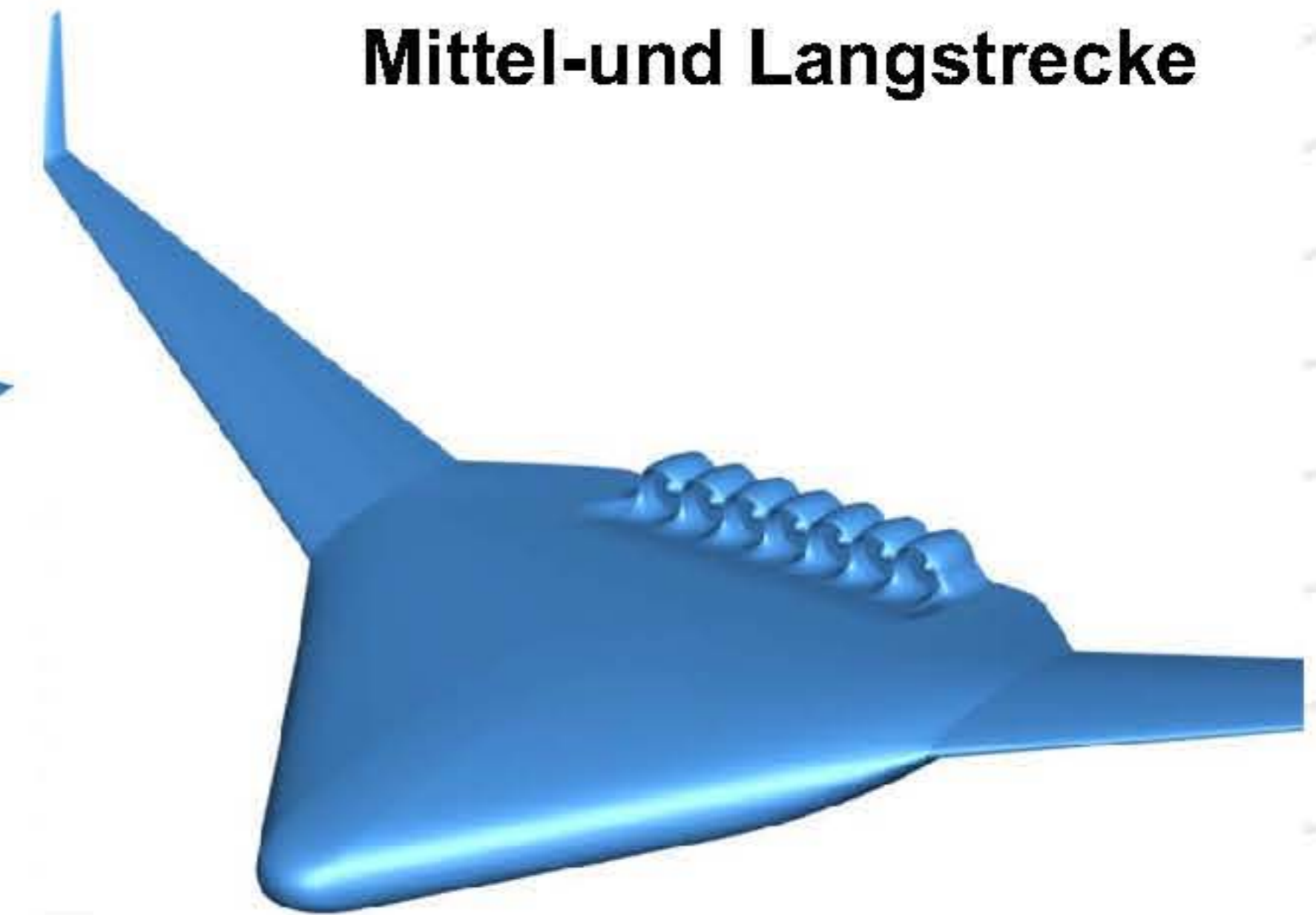
## Kurz- und Mittelstrecke



### Elektro-GT-hybrid

- E-Motor und GT mit:
- Brennstoffzelle
- H2-Burning
- SAF

## Mittel-und Langstrecke



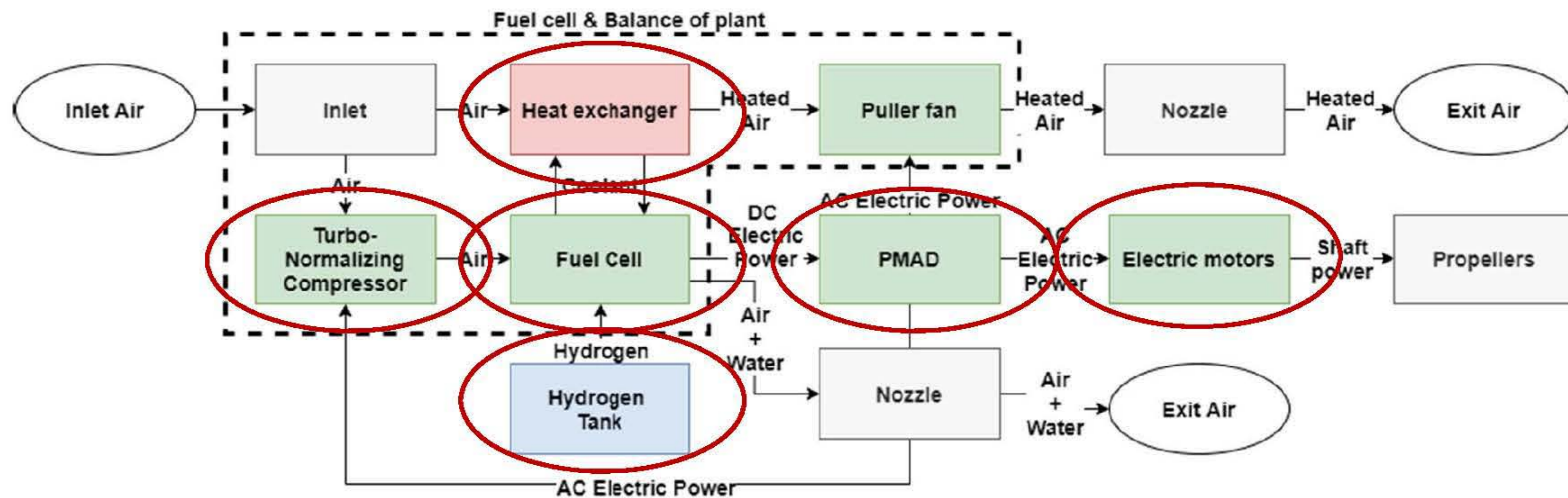
### GT-hybrid

- GT-Compound mit:
- H2-Burning
- SAF



# Wasserstoff-Antriebssysteme in der Luftfahrt...

... nur der Teil, der Mitfliegen soll...



- Sehr viele neue Subsysteme (nicht nur Komponenten), die die Luftfahrt heute nicht kennt
- Wahrscheinlich fehlen auch noch einige...

Bildreferenz [1]



# Welche Brennstoffzelle?

... nur die „typischen Verdächtigen“:

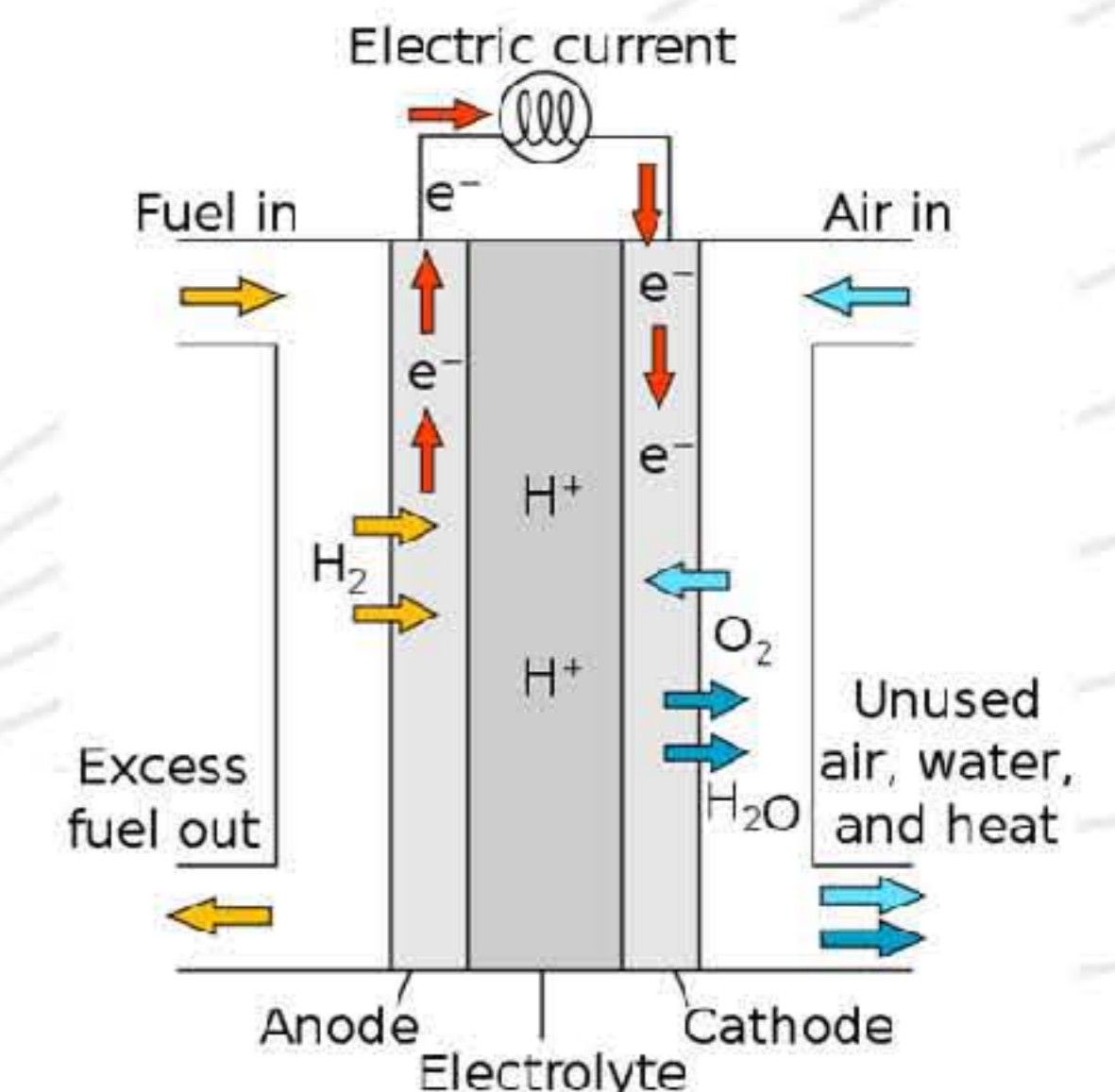
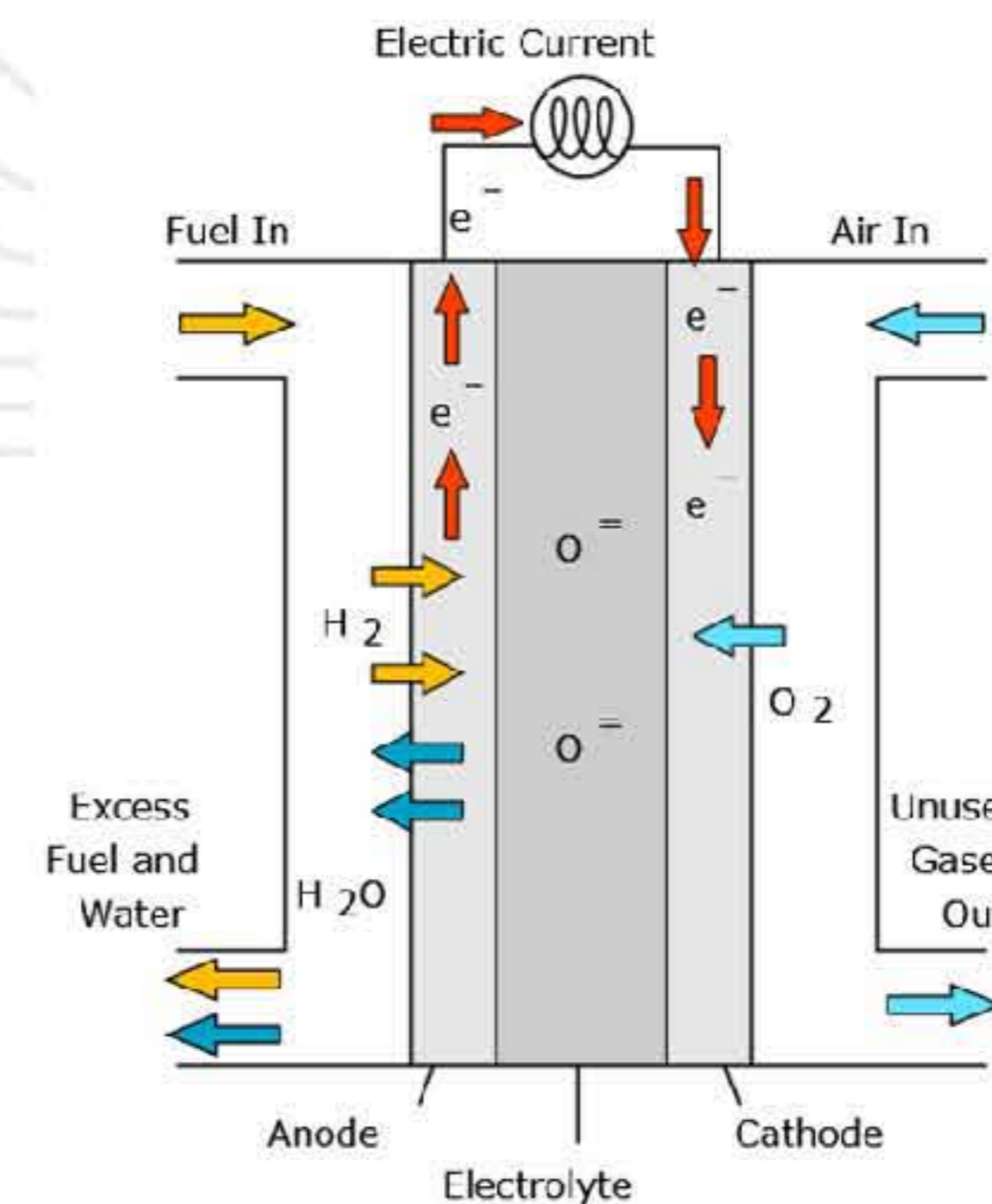
## 1) PEMFC (Proton exchange membrane fuel cell)

- + gute Wirkungsgrade (50-60+%) bei Unterlast
- + gute Leistungsdichte (ca. bis 6kW/kg stack  $\rightarrow$  2,5-3kW/kg System)
- + wenig Volumen, Startzeit
- Betriebstemperatur (80-100°C)  $\rightarrow$  Kühlsystem

## 2) SOFC (Solid oxide fuel cell)

- + gute Wirkungsgrade (stationär vgl. PEMFC)
- + Betriebstemperatur ca. 600-1000°C
- + sehr gut mit Gasturbine kombinierbar
- + brennstoff-flexibel
- mäßig Leistungsdichte
- Startzeit / Zyklenwechselfestigkeit

**$\rightarrow$  ...ist das Rennen wirklich schon entschieden?**



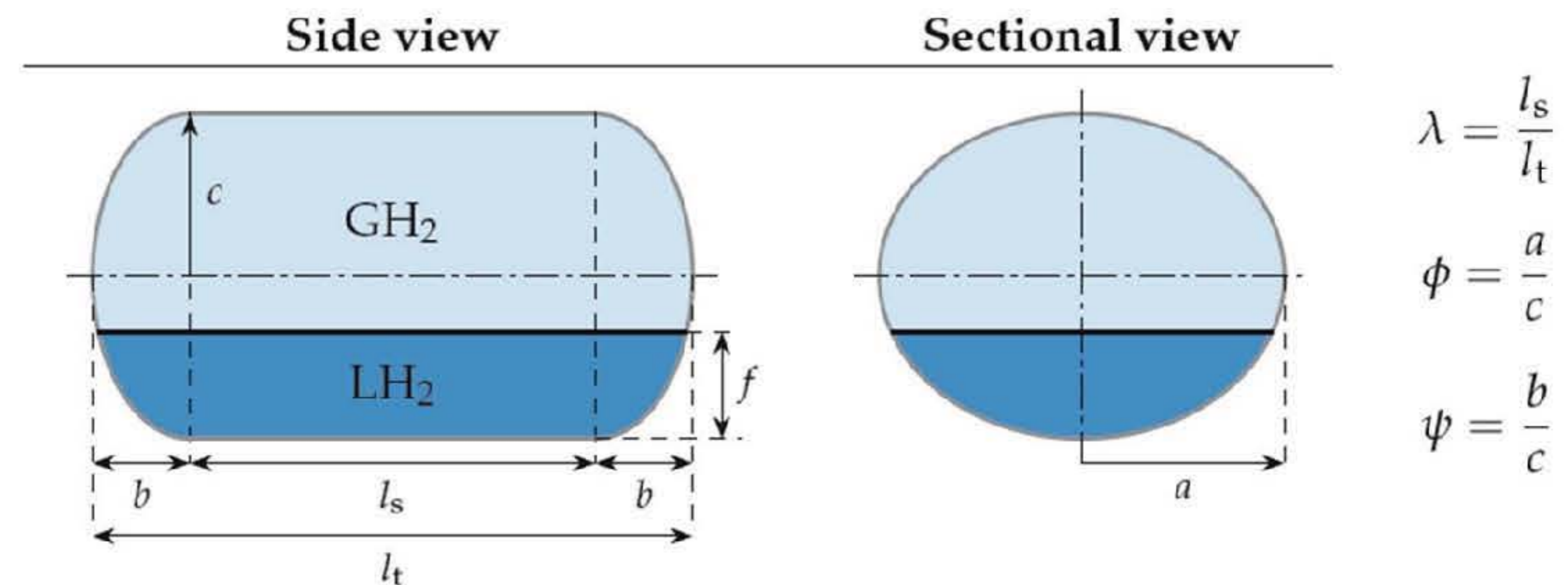
Bildreferenz [2]

Bildreferenz [3]



# Welcher Tank?

- geringe volumetrische Energiedichte von  $H_2$  (ca. 0,25 von Kerosin)
- flüssige (kryogene) Speicherung nötig
- Wärmedämmung
  - Masse vs. Wärmeleitfähigkeit
- Boil-Off / Betriebsführung
  - Druck, Temperatur im Tank
  - Füllgrad (auch Anfang)
  - 2-Phasen-System
  - interne Zirkulation
- Effiziente Integration in das Flugzeug
- Schadensverhalten (Entstehung, Wachstum, Bewertung)



Bildreferenz [4]

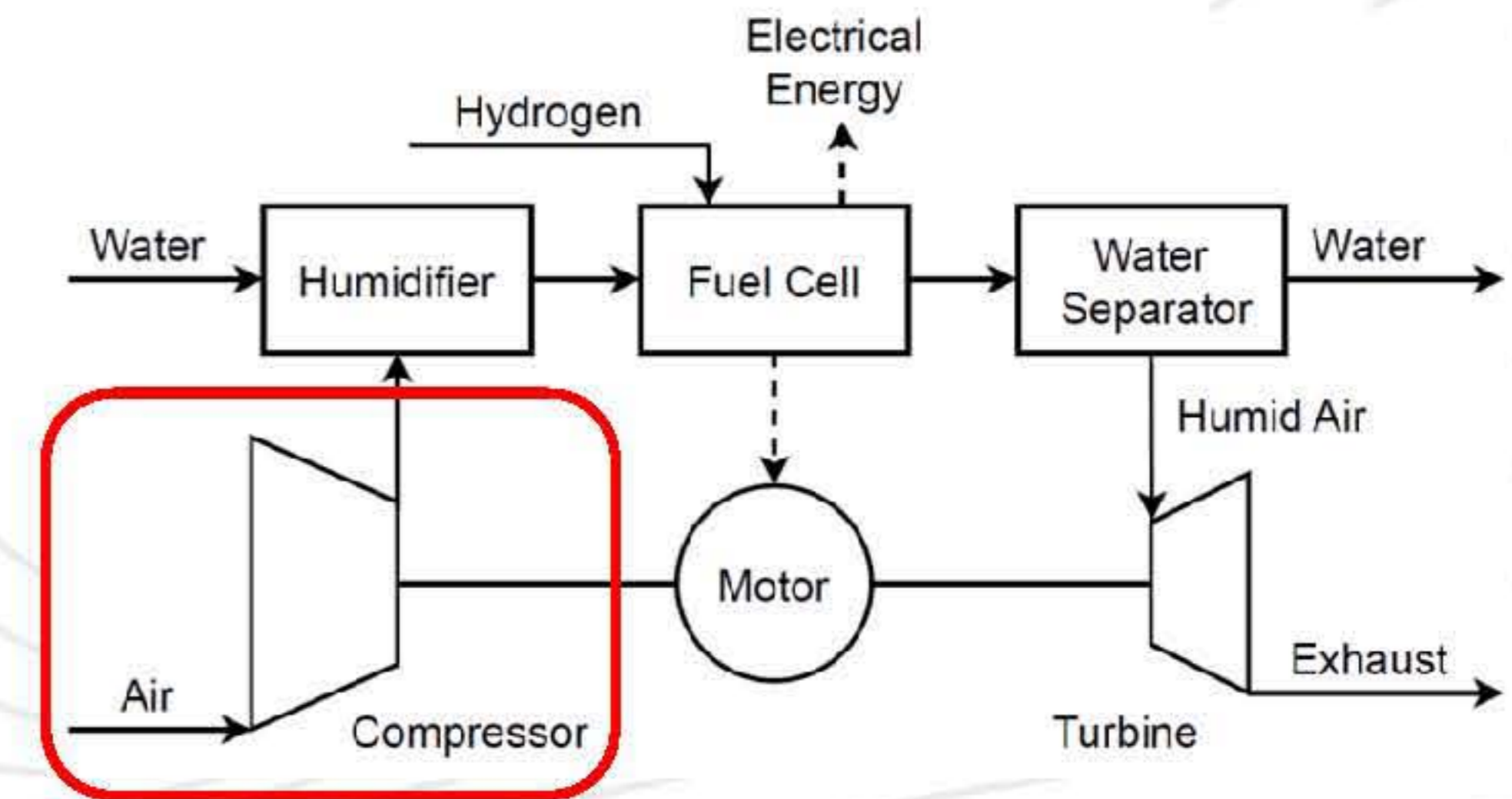
→ Ein ganzes Forschungsfeld für sich allein...



# Welche Subsysteme?

... bestimmt ein Verdichter:

- Brennstoffzellen erfordern konstanten Systemdruck (ca. 0,8 – 1,5bar), sonst Grundlagenforschung
- Umgebungsdruck flughöhenabhängig
- Take-Off ( $p_{FC}=1,5\text{bar}$ ;  $p_{amb}=1,0\text{bar}$ )  
→ Druckverhältnis 1,5; Volumenstrom klein  
→ kleiner Axialkompressor
- Top-of-Climb ( $p_{FC}=1,5\text{bar}$ ;  $p_{amb}=0,1\text{bar}$ )  
→ Druckverhältnis 15, Volumenstrom groß  
→ Radialverdichter, mehrstufiger Axialverdichter  
→ Strategie zur Betriebspunktspreizung ?  
→ Befeuchtung



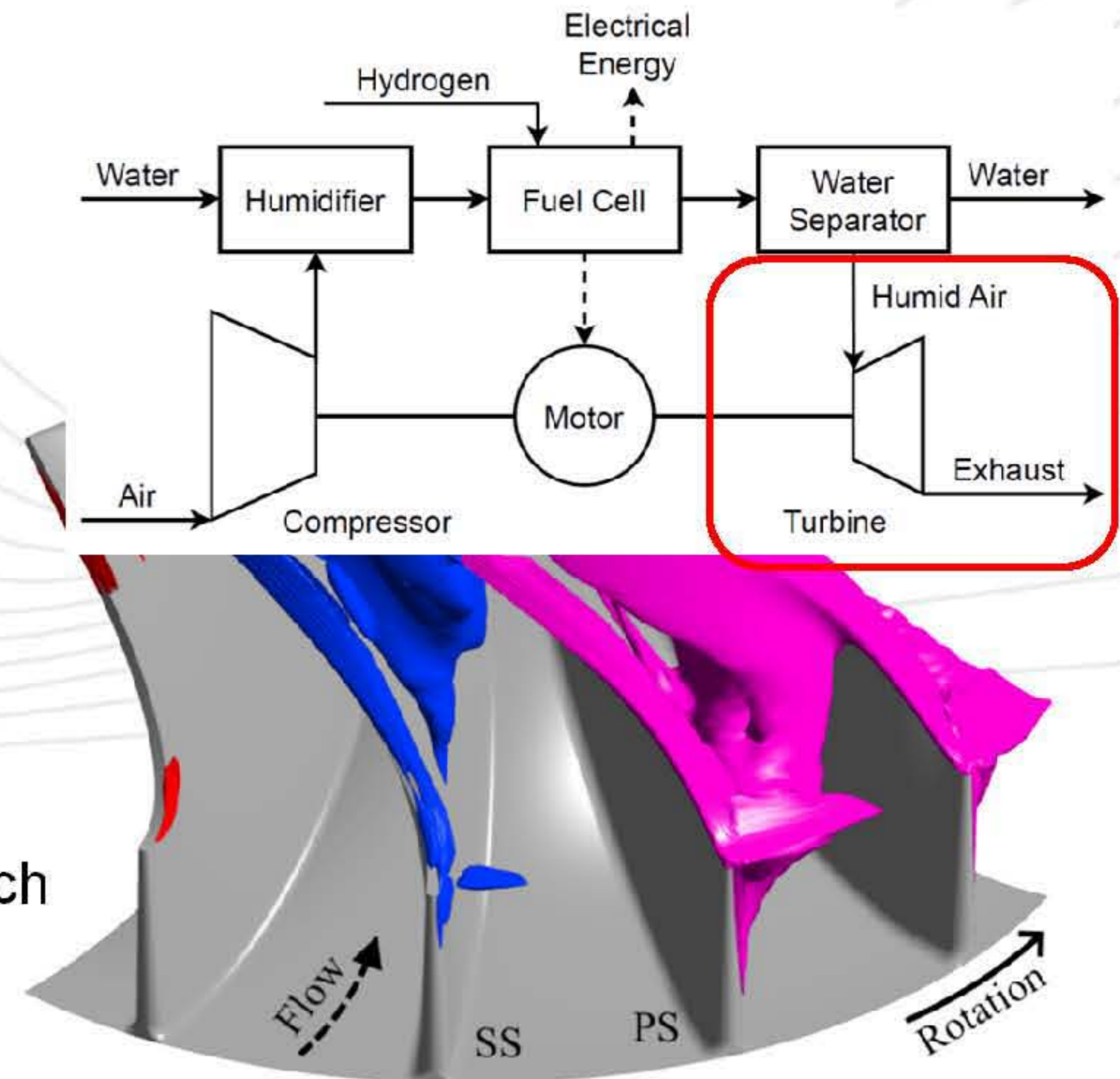
StratoStreamer der Leichtwerk AG (Quelle: Leichtwerk)



# Welche Subsysteme?

... wahrscheinlich auch eine Turbine:

- bei großen Flughöhen steht zunehmend mehr Expansionsarbeit zur Verfügung
- ggf. aber auch mehrstufige Turbinen
- Kondensation ist ein Thema
  - Zuströmung mit hoher rel. Feuchte bis Sättigung
  - Expansion führt zu Kondensation
  - statische Temperatur der Turbinenabströmung erhöht sich
  - erheblichen thermischen Drosselung der Turbine
  - Einfluss auf Leistung und Wirkungsgrad der Turbine



Nukleationszonen im Turbinenrotor in Abhängigkeit von der relativen Feuchte.



# Produktions- und Wartungskosten / DOC

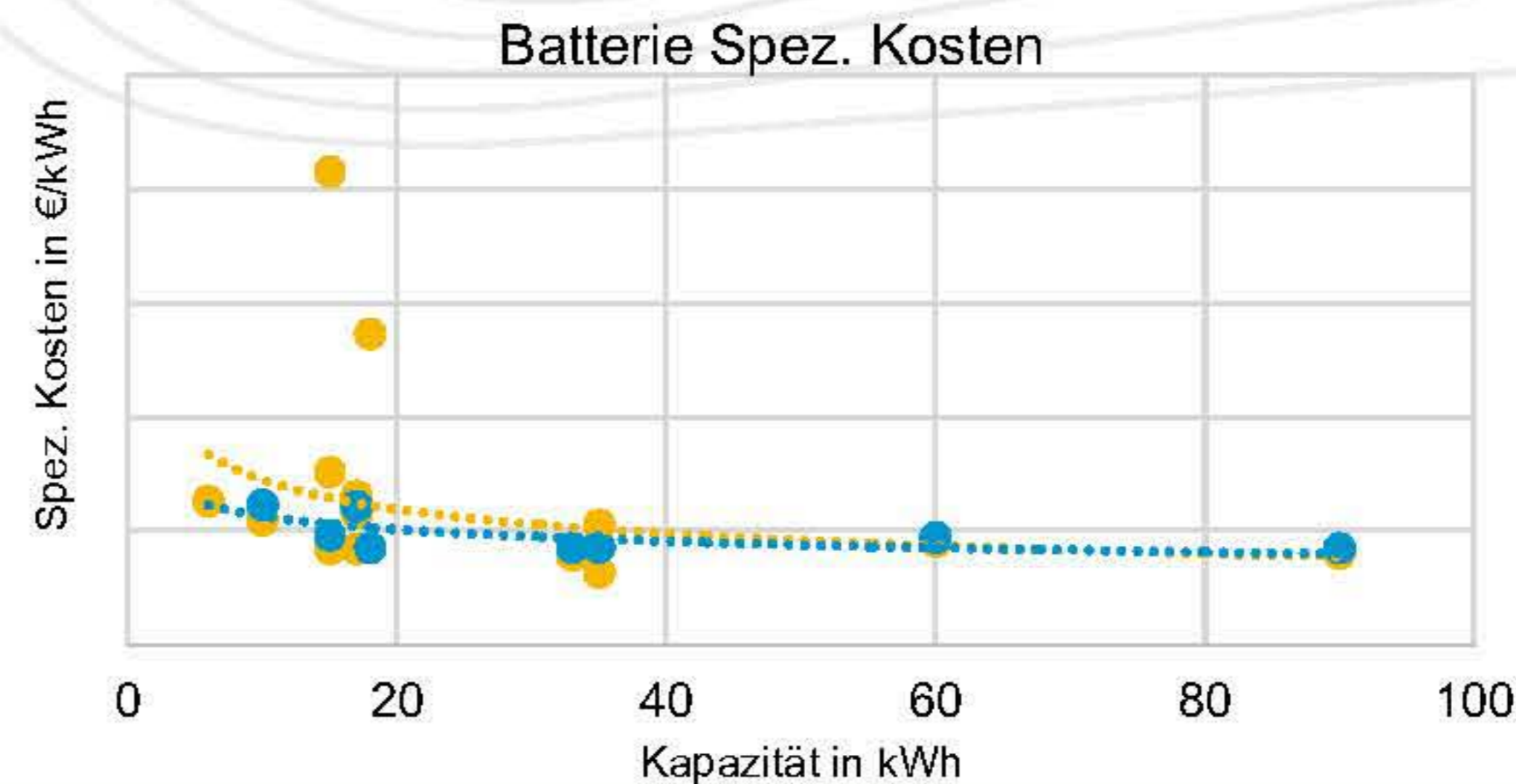
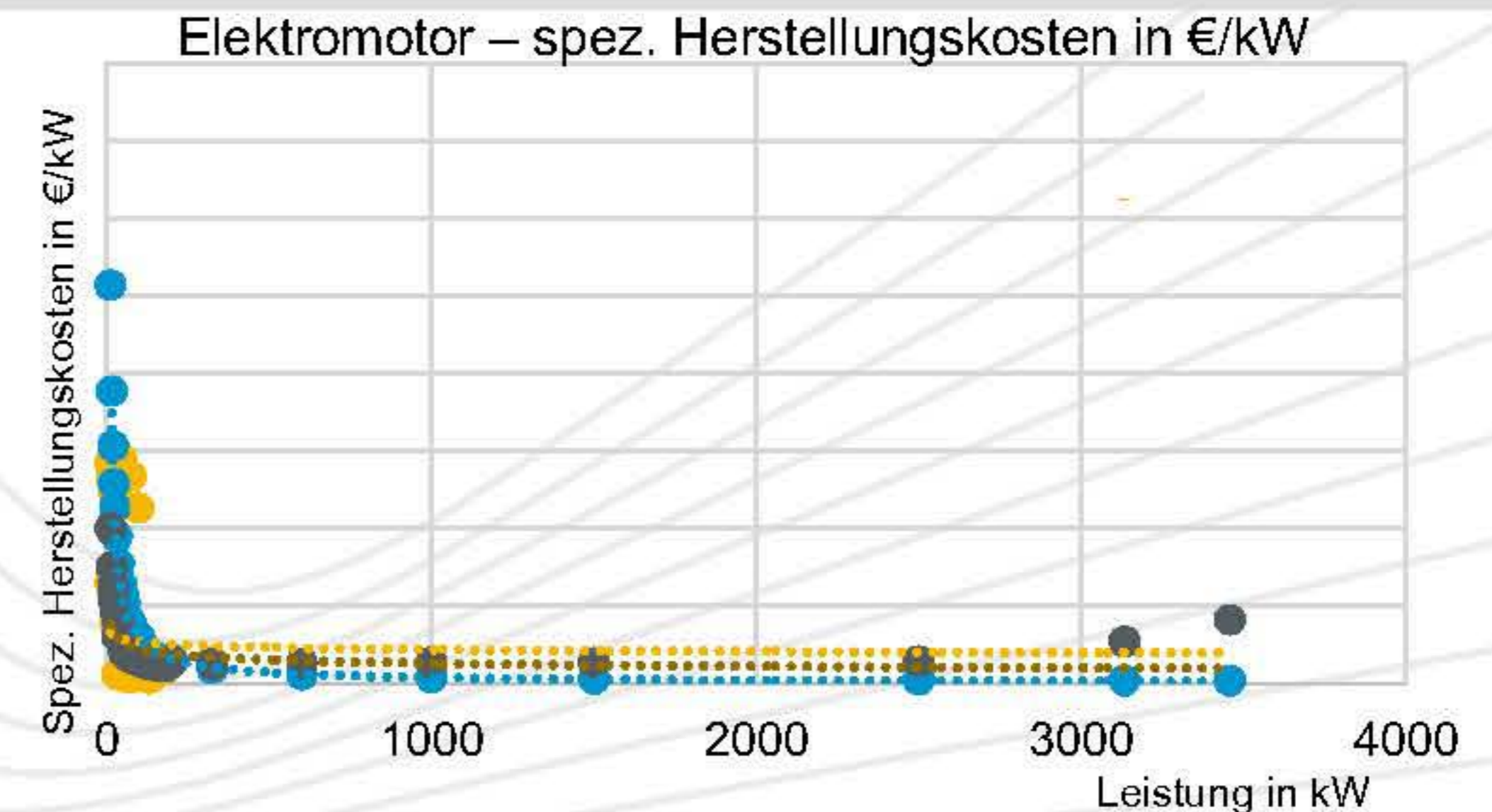
## Elektrische Komponenten in der Luftfahrt

Beispiel E-Motor:

- keine Referenzmaschinen
- Skalierung problematisch wegen „nicht-linearer“ Effekte
  - Kühlung
- - „Luftfahrt“-Zuverlässigkeit

gilt gleichermaßen für:

- Batterien
- Leistungselektronik
- Brennstoffzellen
- Tanks



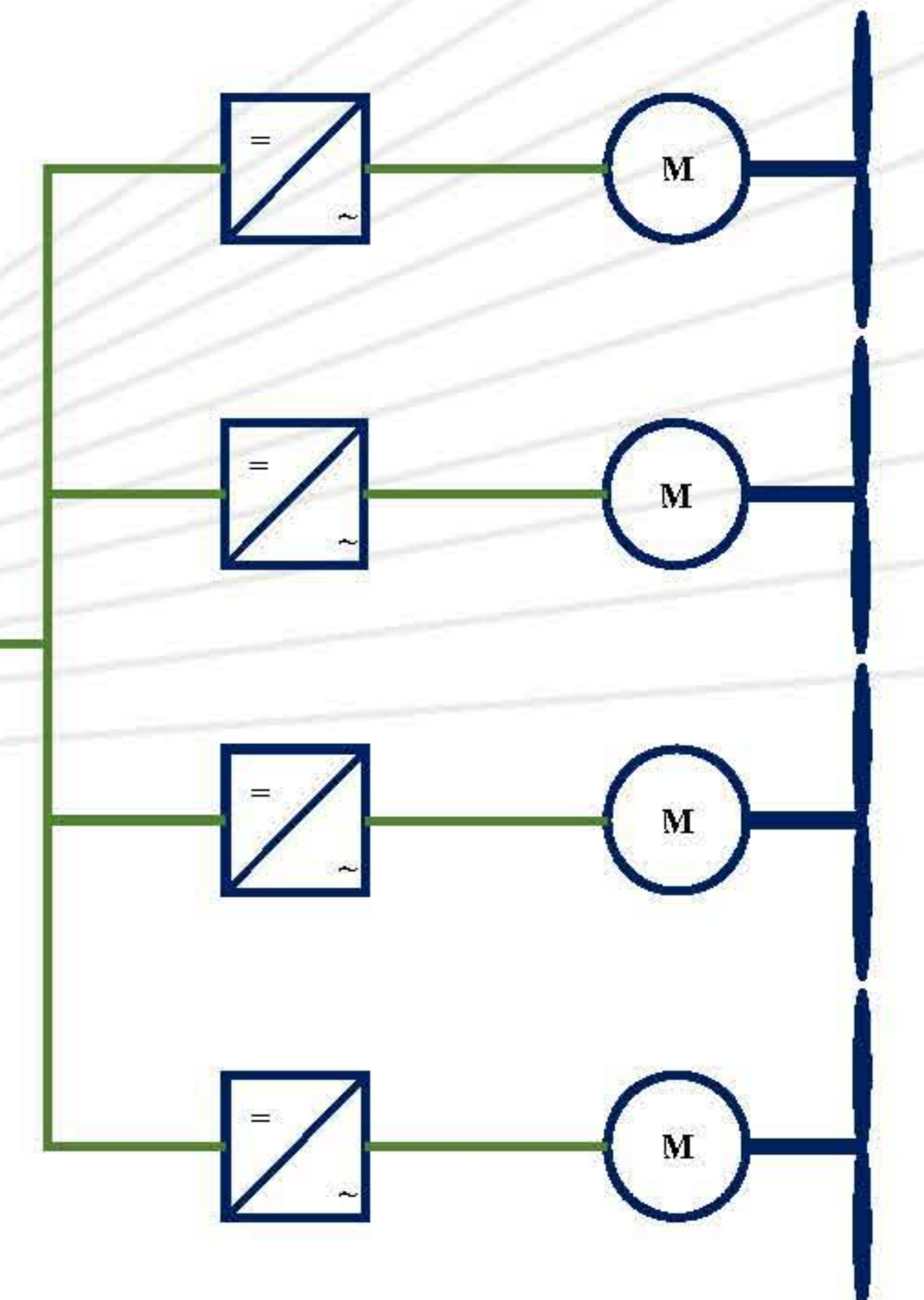
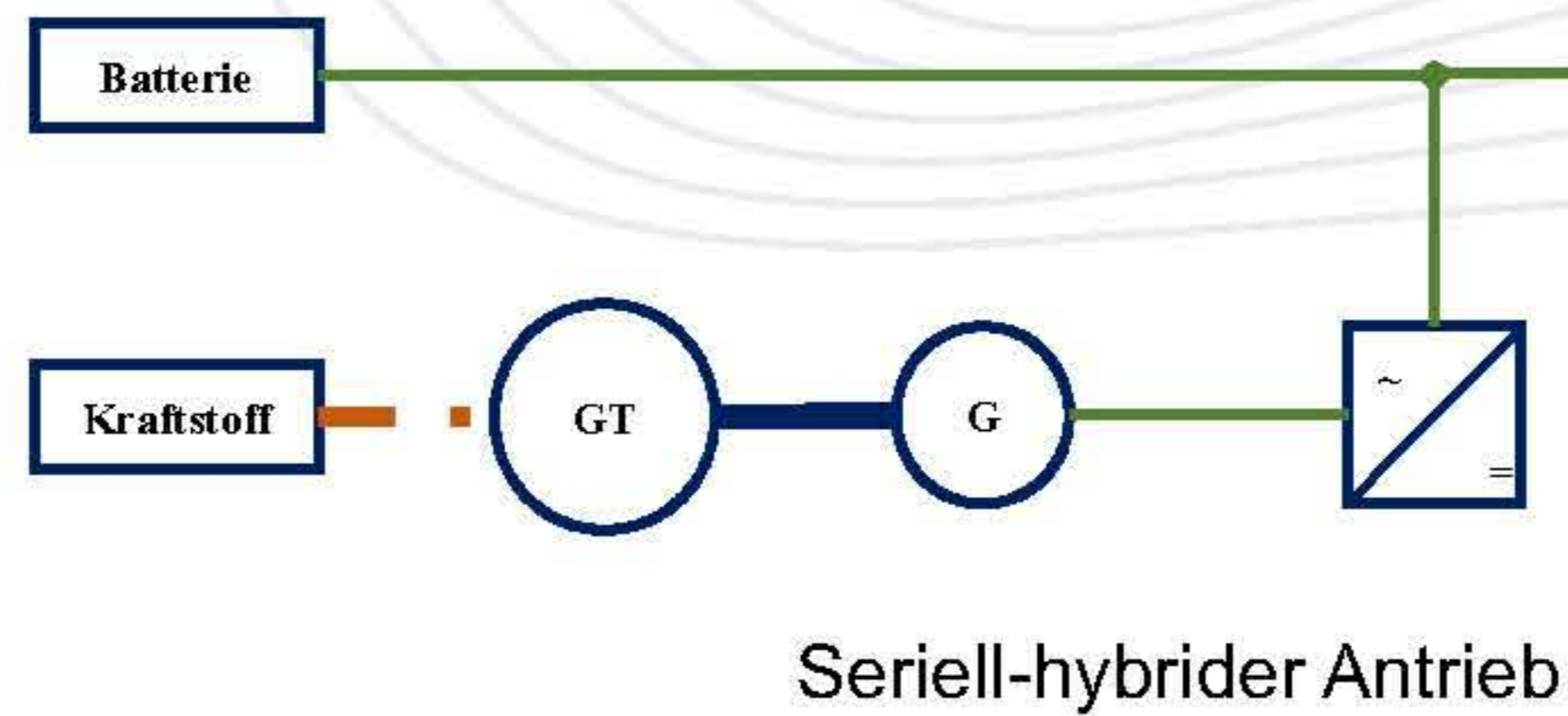
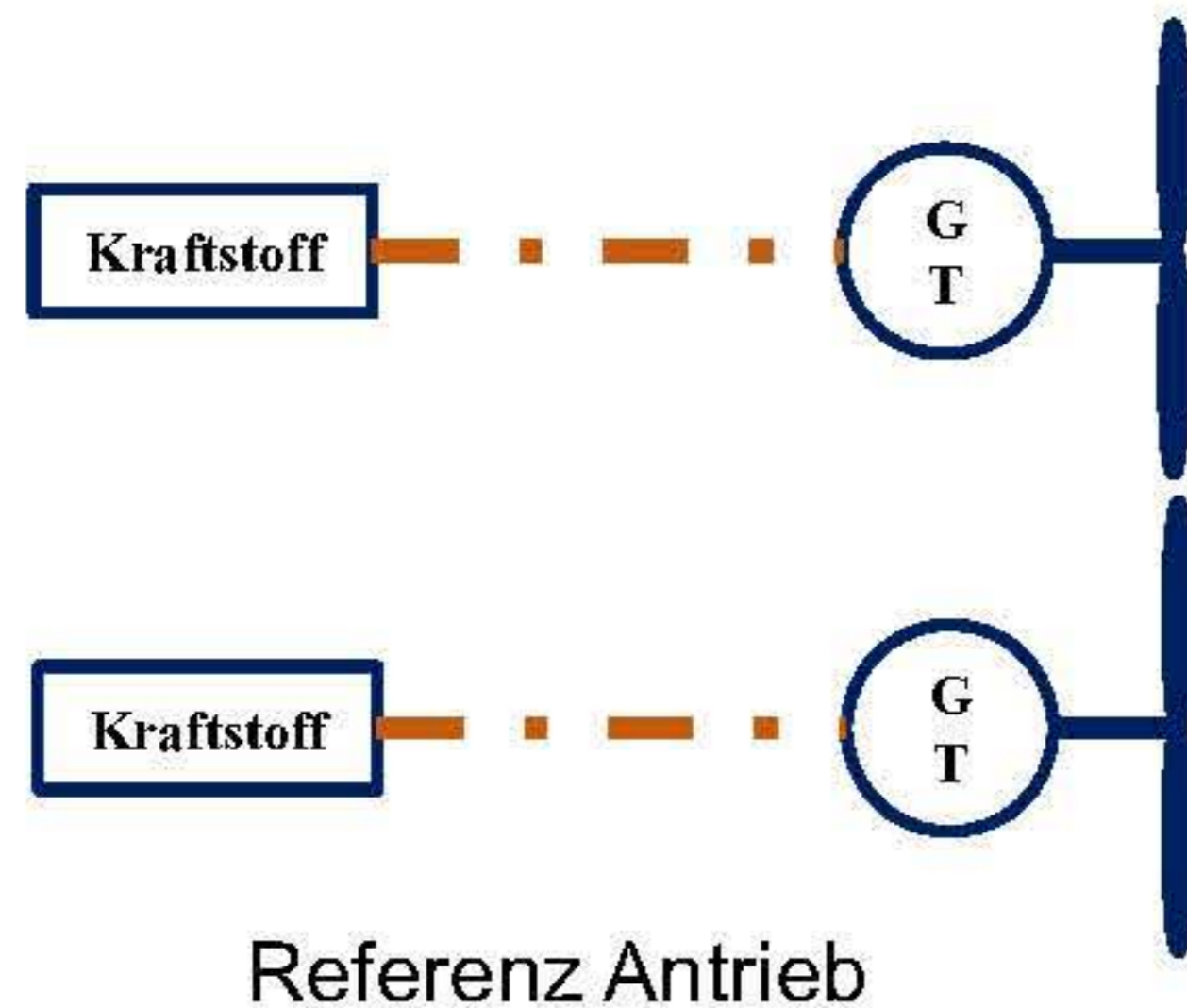
Bildreferenz [11]



# Produktions- und Wartungskosten / DOC

## Referenzsystem: Regional-Flugzeug

Energie-Hybridisierungsgrade:  
 0% – Referenz  
 7% - Case 1  
 12% - Case 2  
 17% - Case 3

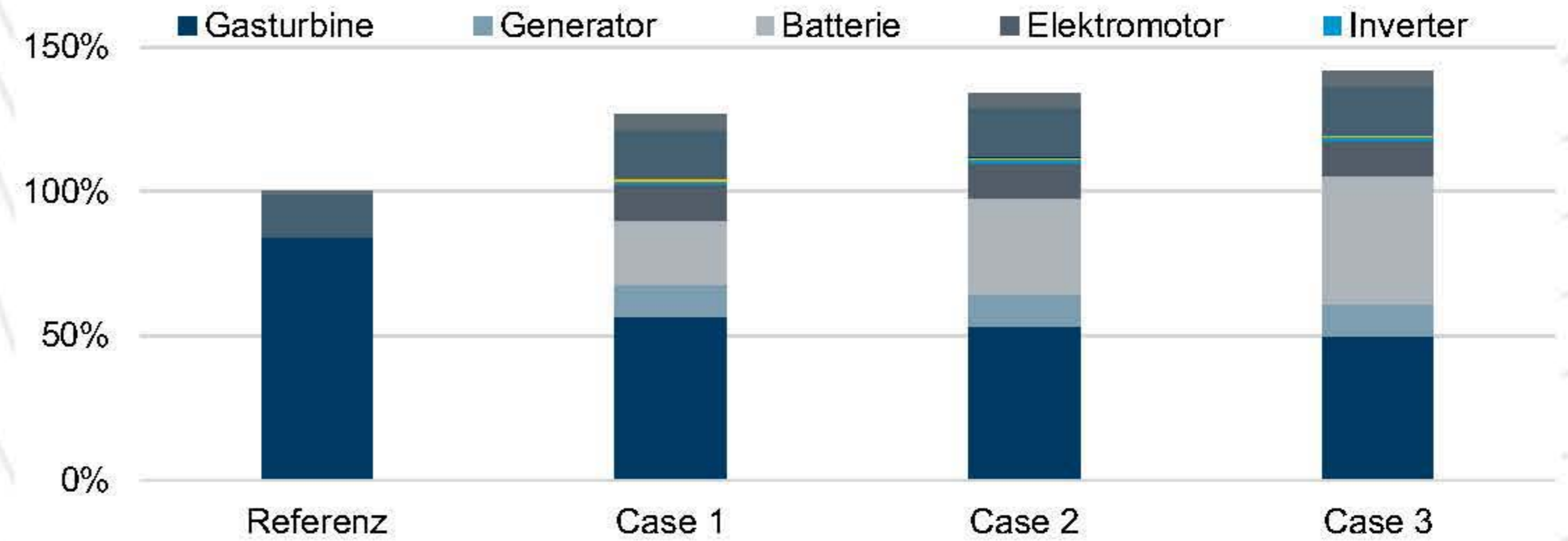




# Produktions- und Wartungskosten / DOC

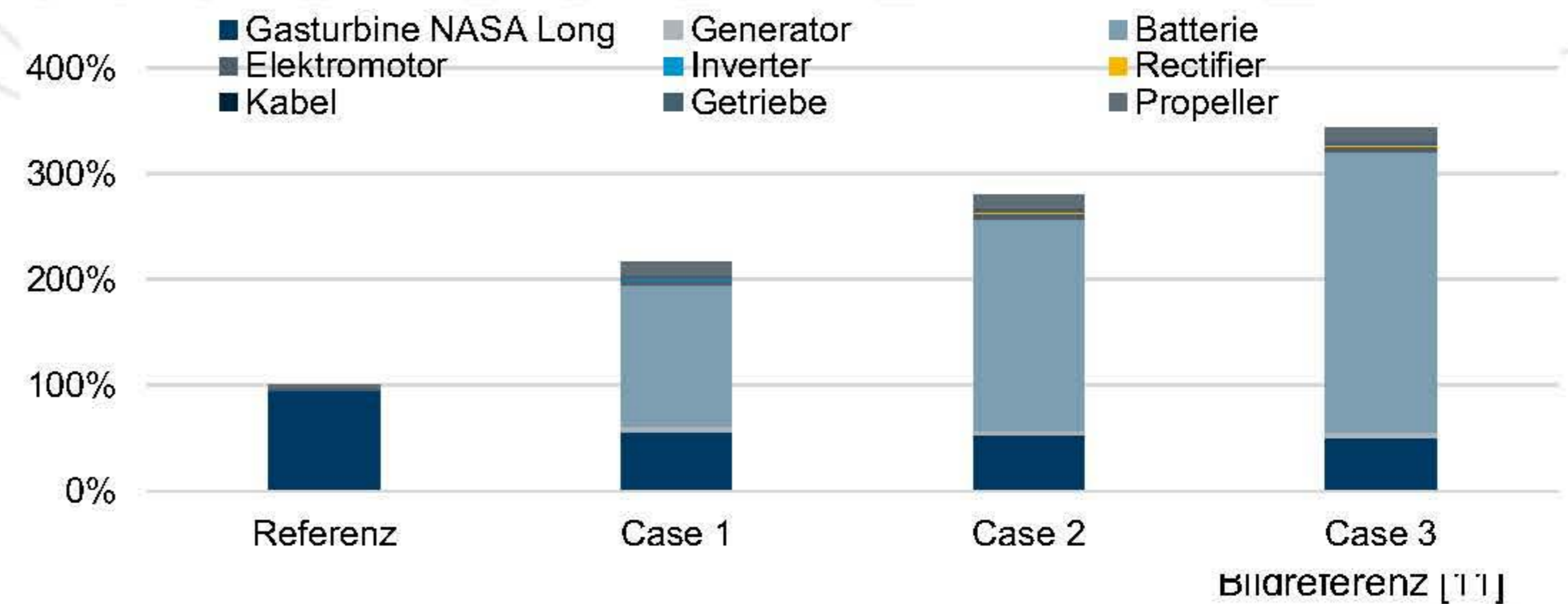
## Produktionskosten

- neue Komponenten steigern die Herstellungskosten
- Grundproblem der Hybridisierung!?



## Wartungskosten

- Batterien als Treiber
- Kein Problem der Hybridisierung!





# Agenda

## 1) Herausforderungen und Motivationen

- Emissionen
- Energiekosten
- Effizienz – Antrieb und Flugzeug

## 2) Ansätze & Lösungen

- One solutions does not fit all...
- Wasserstoff-Antriebssysteme und Brennstoffzellen
- Tank und andere Subsysteme
- Kosten – Produktion, Wartung, DOC

## 3) Zusammenfassung



# Wie kann Grünes Fliegen im Ökosystem Luftfahrt gelingen?

- Die Basis müssen **regenerativ erzeugte Energieträger** sein (grüner Strom, grüner Wasserstoff)
- Für das **jeweilige Segment** muss der Mut zur **besten Lösung** bestehen (batterie-elektrisches Fliegen wo möglich, SAF wo nötig, H2 überall dazwischen...)
- **Energieverbrauch** und Effizienz des Fliegens müssen **für alle Segmente verbessert** werden (wir brauchen nicht nur Antriebssysteme)
- **H2 charmant**, weil Brennstoffzelle und Direktverbrennung möglich sind (aber: nur flüssig)
- H2-Systeme benötigen **neue Subsysteme**, deren Modellierung, Erprobung und Zulassung !
- Antworten für **betriebliche** und **DOC-Aspekte** schon jetzt suchen (eventuell auch für die Akzeptanz...)



# Wie kann Grünes Fliegen im Ökosystem Luftfahrt gelingen?



Forward. Foresight. For flight.



Wie kann Grünes Fliegen  
im Ökosystem Luftfahrt  
gelingen?



# Sicht Airbus

**Nicole Dreyer-Langlet**

Airbus, Geschäftsführerin &  
R&T Deutschland Repräsentantin





**AIRBUS**





## Zero Emission - Der erste Schritt ist gemacht

### Optimierte Aerodynamik

- Sharklet™ Flügelspitzen mit ~ 4% weniger Kraftstoffverbrauch über längere Strecken
- ~ 900 Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert pro Flugzeug

### Geräusch- und NO<sub>x</sub>-Reduzierung

- ~ 75% Reduzierung des Geräuschpegels
- ~ 50% Reduzierung der NO<sub>x</sub>-Emissionen unter Berücksichtigung der aktuellen Industriestandards

### Neuer effizienter Antrieb

- Aufnahme von zwei neuen Triebwerksoptionen
- Kraftstoff Verbesserungen von 20% pro Sitzplatz (entspricht etwa 2 Tonnen zusätzlicher Nutzlast)





## Was ist mit SAF?



**SAF stellt eine kurz- bis mittelfristige Lösung zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung für Single-Aisle- und Regionalflugzeuge dar und langfristig für die Langstrecke**



**Bis 2030 wollen wir die Nutzung von SAF an Bord von Flugzeugen auf 100% steigern**



**Dabei werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus bis zu 85 % reduziert**



**Über 200,000 Flüge** die bereits mit SAF durchgeführt wurden

**AIRBUS**



**Gasturbinen zum Antrieb**

**Flüssiger  
Wasserstoffspeicher**



**Leistungselektronik &  
Elektromotoren**

**Brennstoffzellen**

## ZEROe - Weitere Technologien

### **Gasturbinen zum Antrieb**

- Schuberzeugung durch Verbrennung von flüssigem Wasserstoff in Gasturbinen mit modifizierter Brennkammer, Einspritzdüsen und Kraftstoffsystem

### **Flüssiger Wasserstoffspeicher**

- Im drucklosen Bereich hinter dem hinteren Druckschott

### **Brennstoffzelle**

- Umwandlung der in H<sub>2</sub> gespeicherten Energie in elektrische Energie zum Antrieb von Elektromotoren
- Im Megawatt Bereich, ergänzt die Gasturbinen mit elektrischer Leistung bei einem sehr hohem Wirkungsgrad

### **Leistungselektronik & Elektromotoren**

- Angetrieben von den Brennstoffzellen und bringt Energie auf die Turbofan-Welle





# ZEROe: 3 H<sub>2</sub> Konzeptflugzeuge

## Turbofan:



- <200 Passagiere
- 2x Hybrid-Wasserstoff-Turbofan-Triebwerke
- +3,700 km (Reichweite)
- Speicherung und Verteilung von flüssigem Wasserstoff

## Turboprop:



- <100 Passagiere
- 2X Hybrid-Wasserstoff-Turboprop-Motoren
- +1,900 km (Reichweite)
- Speicherung und Verteilung von flüssigem Wasserstoff

## Nur-Flügler:



- Wie beim Turbofan





# Wasserstoff für die Infrastruktur und Produktion in der Luftfahrt

Im Einklang mit der nationalen Wasserstoff Strategie verfolgt Airbus eine duale Strategie:

## Wasserstoff Infrastruktur

- Anbindung, Speicherung und Verteilung
- Produktion: Logistik Energieerzeugung
- -40 Tsd t CO2 Reduzierung in Norddeutschland bis 2030

## Industrialisierung von flüssigem Wasserstoff

- Brennstoffzelle & Thermal Management
- Tank & Tanksystem
- Wasserstoff Gesamtsystem





**Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit**



Wie kann Grünes Fliegen  
im Ökosystem Luftfahrt  
gelingen?



**HERZLICHEN  
DANK**

**AIRBUS**



# Wie kann Grünes Fliegen im Ökosystem Luftfahrt gelingen?

11. November 2021 - Vertretung des Landes Niedersachsen beim Bund

## Teilnehmerliste

Stand: 11.11.2021

Titel	Vorname	Nachname	Institution / Firma
Dr.	Anna Elisabeth	Bauch	Airbus Operations GmbH
	Thomas	Belitz	BDLI German Aerospace Industries Association
Dr.	Stefan	Berndes	BDLI e.V.
	Franziska	Biermann	Behörde für Wirtschaft und Innovation
	Walter	Birkhan	B:MC2
Dr.	Christoph	De Beer	Lufthansa Technik
	Martin	Dehn	Airbus
	Peter	Detjen	Safran Group
	Nicole	Dreyer-Langlet	Airbus Operations GmbH
	Andreas	Eickhoff	Die Senatorin für Wirtschaft, Arbeit und Europa
Dr.	Arne	Engel	Ministerium f. Wirtschaft u.a. SH
	Robert	Friebe	Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e.V.
Prof.	Jens	Friedrichs	Technische Universität Braunschweig
	Roman	Fürtig	Deutscher Bundestag
	Roland	Gerhards	ZAL GmbH
	Josè	Gomes	Domier Group GmbH
	Gordon	Goldhammer	Airbus Operations GmbH
Prof.	Werner	Granzeier	IPG Innovation Prof. Granzeier
	Gunnar	Groß	Airbus Operations GmbH
	Oliver	Grundmann	Deutscher Bundestag
	Oliver	Haack	Airbus Operations GmbH
	Tine	Haas	Domier Consulting
Prof.	Richard	Hanke-Rauschenbach	Leibniz Universität Hannover (LUH)
Dr.	Olaf	Heintze	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR e.V.)
Prof.	Rolf	Henke	Aviation Strategy and Consulting AVISC
Prof.	Uwe	Heßler	Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG
Dr.	Raoul	Hille	Hannover Airport
Prof.	Wolfgang	Hintze	TUHH
	Wolfgang	Hinz	Forum Luft- und Raumfahrt e.V.
Dr.	Katharina	Kamilli	BDL
Dr.	Niels	Kämpny	Niedersächsisches Ministerium für Wirtschaft, Arbeit, Verkehr u. Digitalisierung



# Wie kann Grünes Fliegen im Ökosystem Luftfahrt gelingen?

11. November 2021 - Vertretung des Landes Niedersachsen beim Bund

## Teilnehmerliste

Stand: 11.11.2021

Titel	Vorname	Nachname	Institution / Firma
Dr.	Friedhelm	Kappei	MTU Maintenance
	Karoline	Kästner	Airbus Operations GmbH
	Celina	Kiesling	Niedersachsen Aviation
	Martin	Kinzelt	Lufthansa Technik Logistik Services GmbH
	Uwe	Kleber	Behörde für Wirtschaft und Innovation
	Ingmar	Koch	Airbus Operations GmbH
Prof.	Gordon	Konieczny	HAW Hamburg
Dr.	Simon	Kothe	Fraunhofer IFAM
Prof.	Dieter	Krause	TUHH - Institut für Produktentwicklung
	Roger	Krüger	Niedersächsisches Ministerium für Wirtschaft, Arbeit, Verkehr und Digitalisierung
	Albert-Jan	Krzysztofik	Deutsche Lufthansa AG
	Alexander	Lutz	Deutsche Lufthansa AG
	Thomas	Mayer	Interessengemeinschaft regionale Flugplätze e. V.
	Harald	Mehring	Diehl Aviation
	Andreas	Mundsinger	German Business Aviation Association e.V.
Dr.	Dirk	Niermann	Fraunhofer Gesellschaft
	Jörn	Oellerich	Oellerich GmbH & Co KG
	Joachim	Piepenbrock	CTC GmbH
	Gunnar	Quante	TUHH
	René	Reinhardt	Bundesministerium f. Wirtschaft und Energie
	Peggy	Repenning	PFH Private Hochschule Göttingen
	Rainer	Schätzlein	Deutsches Verkehrsforum e.V.
	Monika	Scherf	Amt für regionale Landesentwicklung Lüneburg
	Frank	Schmitt	Hamburgische Bürgerschaft
Prof.	Dieter	Scholz	Hamburg University of Applied Sciences (HAW Hamburg)
Dr.	Sandra	Schulz	MTU Aero Engines AG
	Hans-Georg	Tschupke	Freie Hansestadt Bremen Senatorin für Wirtschaft, Arbeit und Europa
	Franziska	Wedemann	Der Wirtschaftsverein für den Hamburger Süden
	Larissa	Weiß	Unternehmervverbände Niedersachsen e.V.
	Klaus-Peter	Willsch	Deutscher Bundestag
	Matthias	Zwanzig	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt