

## **VORENTWURFSSTUDIEN EINES WASSERSTOFF-BETRIEBENEN REGIONALFLUGZEUGS AUF BASIS DER D328ECO**

# LuFo VI-1: 328eHY-TECH Verbundpartner



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
BERLIN



GE Aerospace

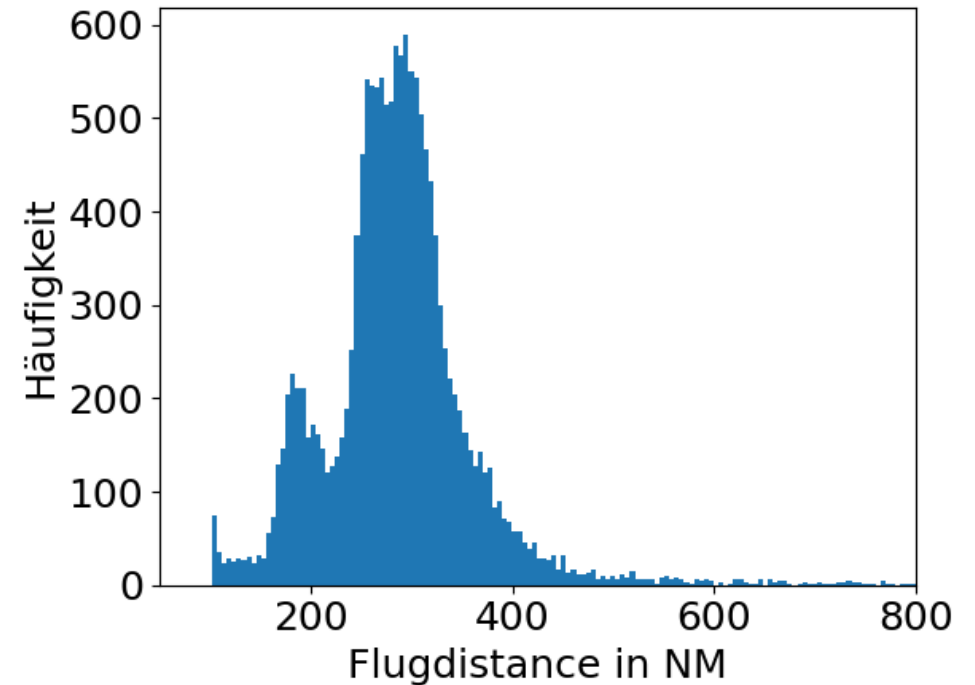
Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

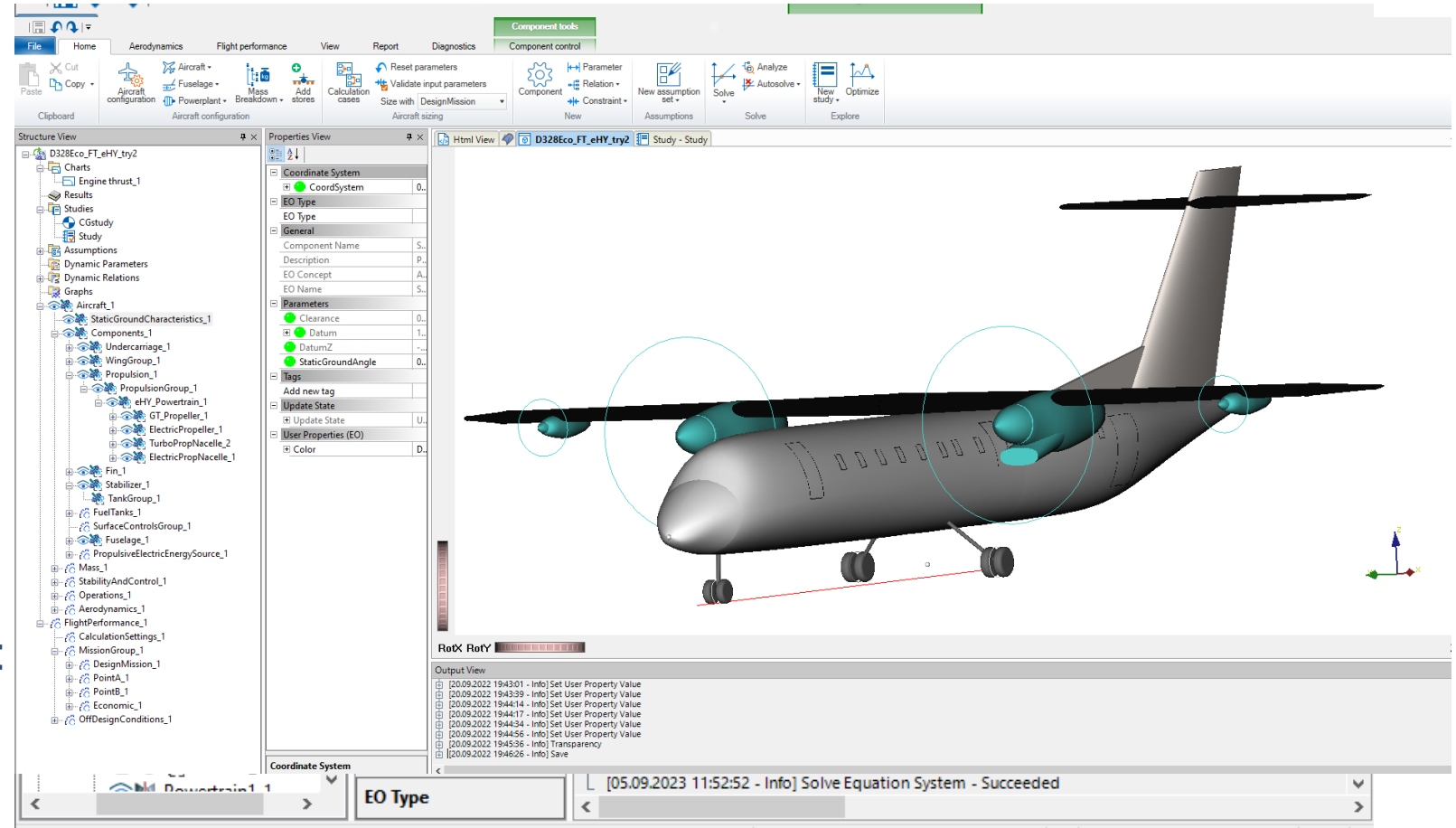
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

- Ziel des Projekts:
  - Auslegung eines hybriden elektrischen Flugzeugs
    - Bau eines Versuchslabor (Blick auf Serientauglichkeit)
  - Basis Do328
    - 32 PAX<sup>1</sup>
    - 700 NM Design Reichweite<sup>1</sup>
  - Identifizierung von Technologievoraussetzungen
- Reichweitenstudie
  - Dornier 328-100:
    - 90% Flüge kürzer als 400 NM



## Pacelab APD – Aircraft Preliminary Design

- Batterie-elektrisch-hybrid:  
Eigenentwicklung in APD 8.05  
(beta Version)
- H2-elektrisch-hybrid:  
Powertrain in APD 8.1
- Referenzflugzeug:  
enge Zusammenarbeit mit  
Pace & DA
- Hybrid-Modell-Konfigurationen:  
angelehnt an Versuchslabor



Vorentwurfsstudien eines Wasserstoff-betriebenen Regionalflugzeugs anhand der D328ECO |

Annika Staats | DLRK 2023

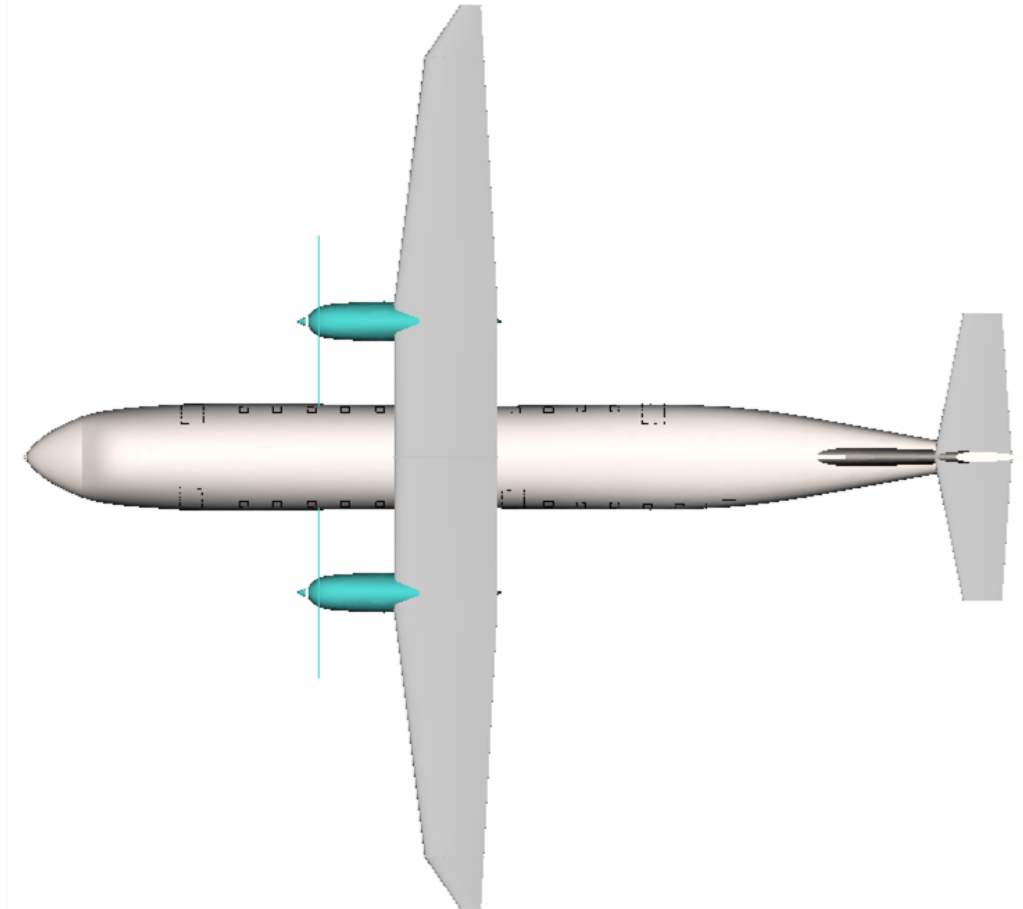
Folie 4

# Referenzmodell



Abflugmasse: 15660 kg  
Nutzlast: 3880 kg  
40 PAX  
Reiseflughöhe: 27000 ft  
Leermasse: 10150 kg

	D328ECO	Rechnung	$\Delta$
Reichw.	Blockfuel	Blockfuel	
200 NM	494 kg	500 kg	1,2%
300 NM	666 kg	670 kg	0,6%
500 NM	1015 kg	1014 kg	0,1%



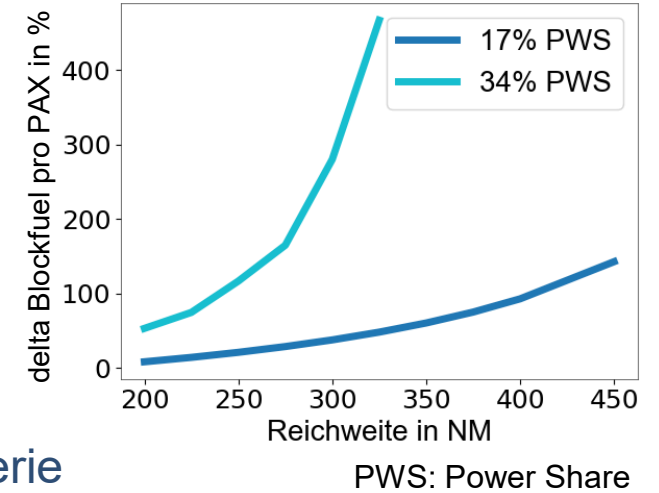
Vorentwurfsstudien eines Wasserstoff-betriebenen Regionalflugzeugs anhand der D328ECO |

Annika Staats | DLRK 2023

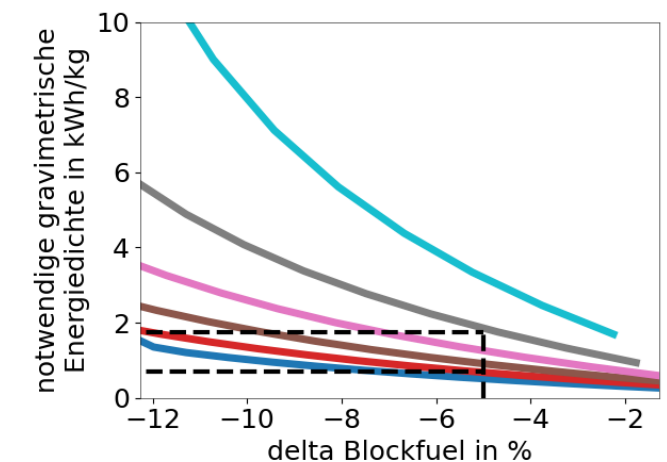
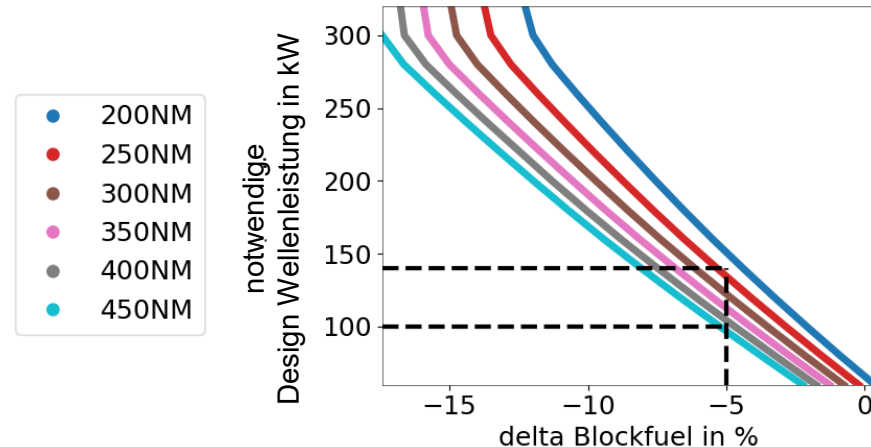
Folie 5

# Rückblick: Hybrid Elektrisches Flugzeug

- Paralleler Antrieb aus
  - Gasturbine
  - elektrischer Motor, Batterie gespeist
- Erhöhung des Kerosinverbrauchs/PAX
- Voraussetzungen: 5% Kerosin einsparen
  - 250 NM: 134 kW Wellenleistung & 0,68 kWh/kg Energiedichte der Batterie
  - 400 NM: 97 kW Wellenleistung & 1,85 kWh/kg Energiedichte der Batterie



Betrieb eines batteriebetriebenen Regionalflugzeug nicht absehbar



Vgl. DLRK2022\_57 0200

Vorentwurfsstudien eines Wasserstoff-betriebenen Regionalflugzeugs anhand der D328ECO |

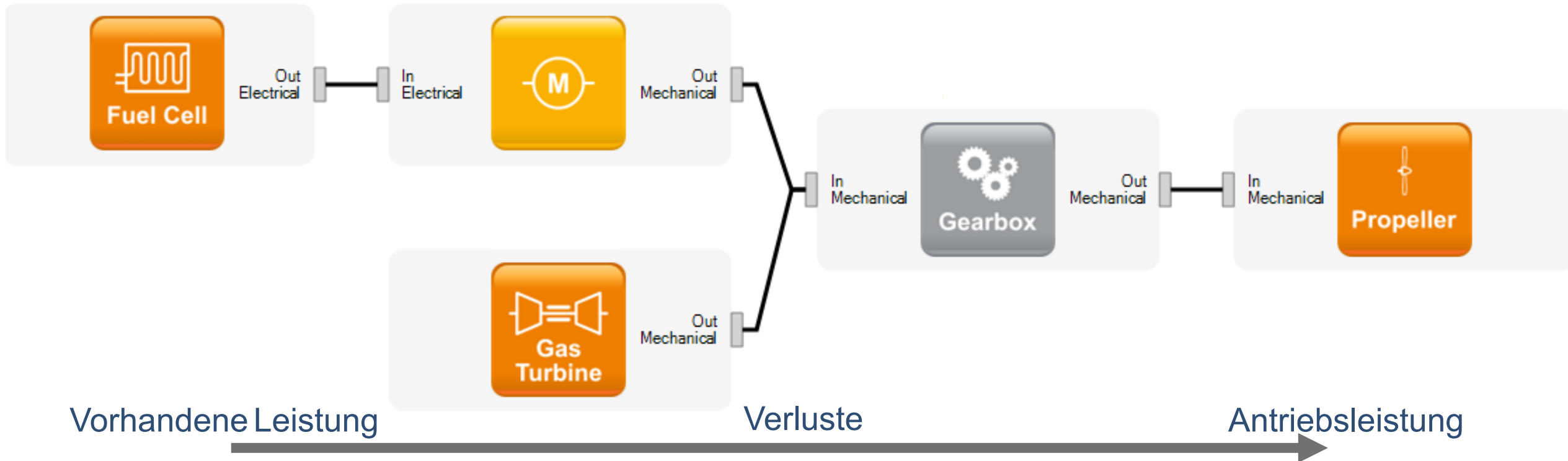
Annika Staats | DLRK 2023

Folie 6

# Paralleles H2-Hybrides Antriebsmodell



## ➤ Je Flügelseite





## ➤ Stark vereinfacht:

- Brennstoffzellen-Kennfeld
  - Normierte Leistung
  - Leistungsspezifischer Wasserstoffverbrauch
- Elektrische Referenzleistung [kW]
- Spezifische Leistung [kW/kg]
  - Massenabschätzung
- Leistungsdichte [kW/m<sup>3</sup>]

In Pace: Brennstoffzelle (Bsz) mit max. Leistung betrieben, außer im Reiseflug

MDT Grid - Parameter Aircraft.Components.Propulsion.PropulsionGroup.Powertrain.FuelCell.Performanc...

Save to Repository Save to Parameter

Name	Value
Name	
Namespace	
Description	
Version	0.0.0.0
State	Local MDT

Record 1 of 5

Approximation By Dimension

Name	Unit	Interp...	Extrap...
Normalized Electric Power		Linear	Linear
Normalized Fuel Flow	kg/s/kW		

	Normalized El...	Normalized F...
	0	0
	0.1	0.000001615
	1	0.00001615

Record 1 of 2





- Stark vereinfacht:
  - E-Motor Kennfeld
    - Effizienz @ Rating
    - Konstante Effizienz (96%)
  - Referenz-Wellenleistung [kW]
  - Spezifische Leistung [kW/kg]
    - Massenabschätzung



- Skalierbare Gasturbine “rubber Engine”:
  - Leistungskennfeld
    - Rating, ISA, Alt, Mach, norm. Drehmoment
    - Norm. Wellenleistung, norm. Abgasschub, norm. SFC
  - Referenz-Wellenleistung
- Massen kalibriert anhand von DA-Angaben
  - Spezifische Leistung



- Konstante Effizienz von 99%
  - Kennfeld möglich:
    - ISA, Alt, Mach
    - Effizienz
- Spezifische Leistung
  - Masse in “System Massen”



- Propeller Deck
  - Rating, ISA, Alt, Mach, norm. Propeller Wellenleistung
  - Norm. Schub, Effizienz
- Referenz-Wellenleistung [kW]
  - Propellermasse
  - Gondelmasse

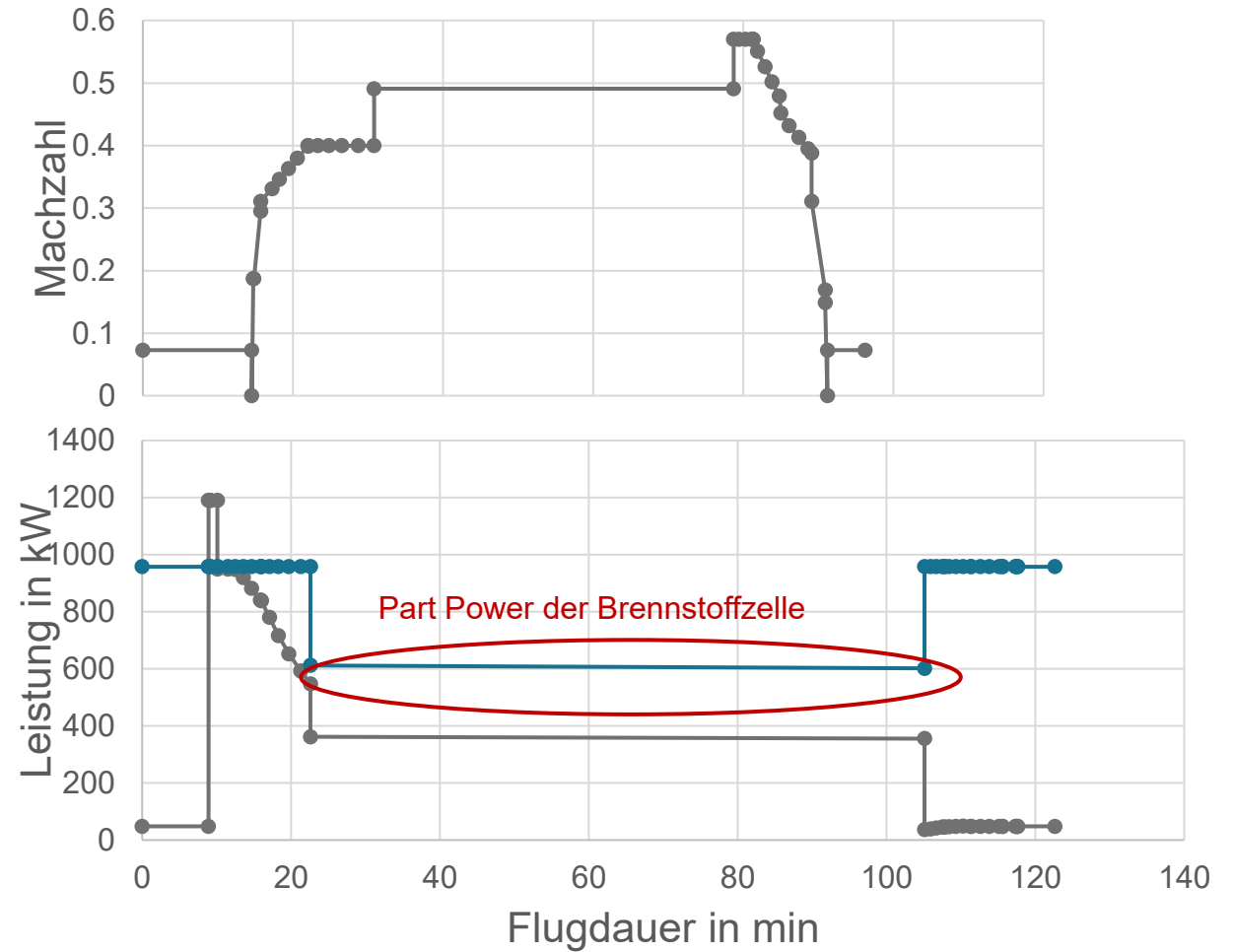
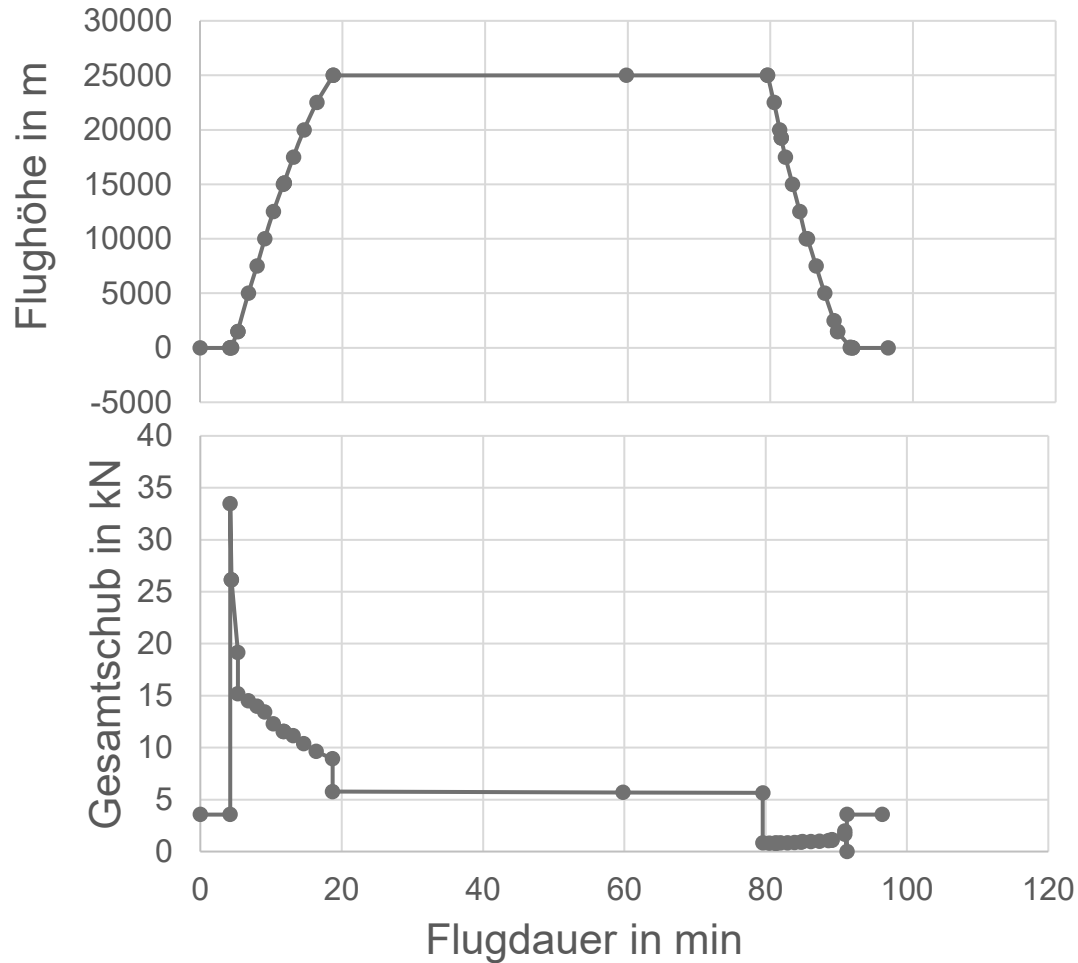
Kein Übersetzungsverhältnis betrachtet



- Schub immer in Flugrichtung
- Tankvolumen nicht betrachtet
- Kühlsystem über konstante Leistungsdichte erfasst
  - Kein aerodynamischer Einfluss
- Elektrische Systemmassen ohne Motor:  $5\text{kW}/\text{kg}^2$
- Elektrisches System bei konstant 95% Effizienz

Modell basierend auf vereinfachte Look-Up Tables und konstanten spez. Leistungen

# Missionsstudien: 400NM Reichweite



Vorentwurfsstudien eines Wasserstoff-betriebenen Regionalflugzeugs anhand der D328ECO |

Annika Staats | DLRK 2023

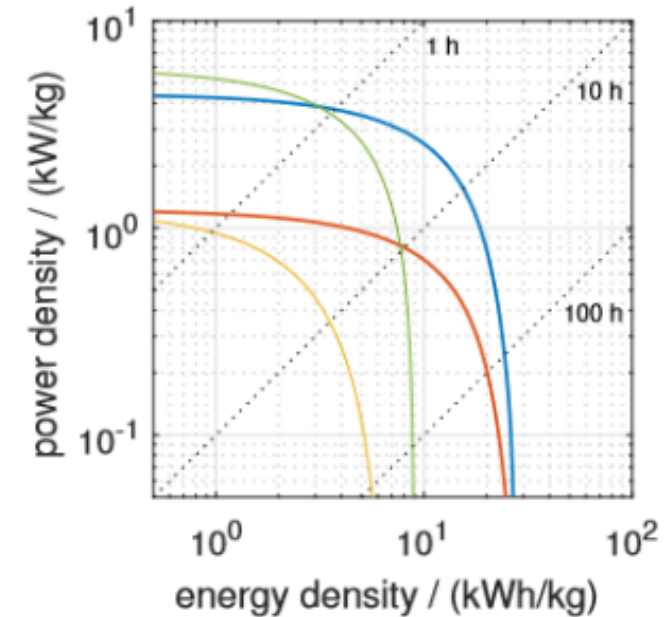
Folie 12

Hybridisierungsfaktor  $\gamma = \text{Wellenleistung} / \text{ref Wellenleistung}$ :

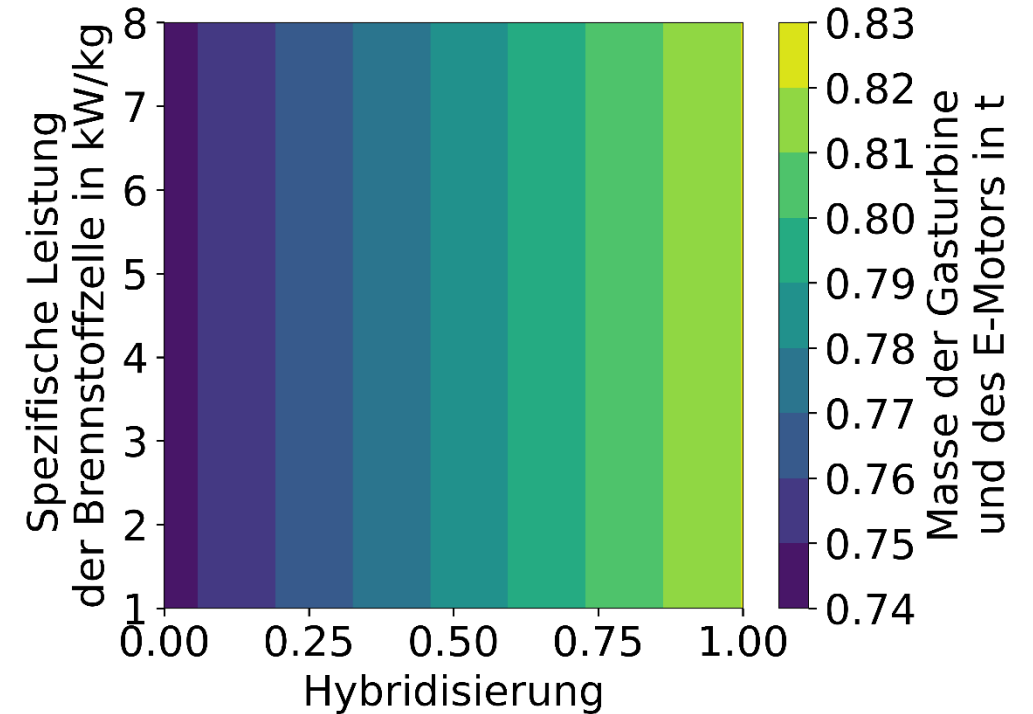
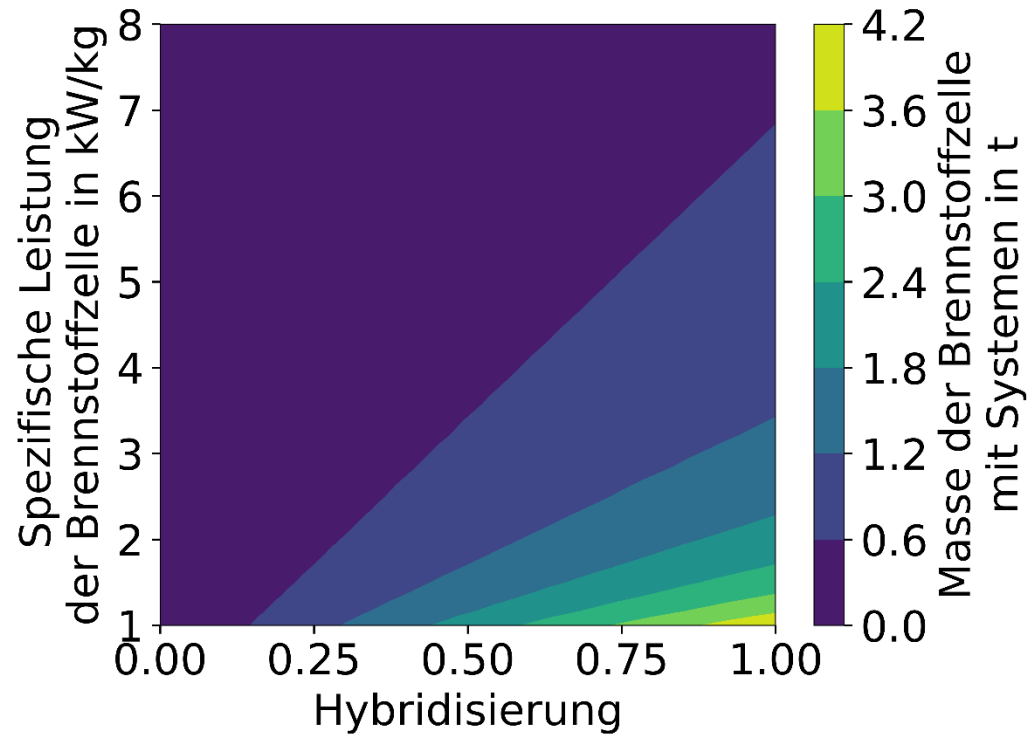
- 0, wenn konventionell
- 1, wenn nur Brennstoffzellen-betrieben

Leistungsdichte der Brennstoffzellen mit Systemen

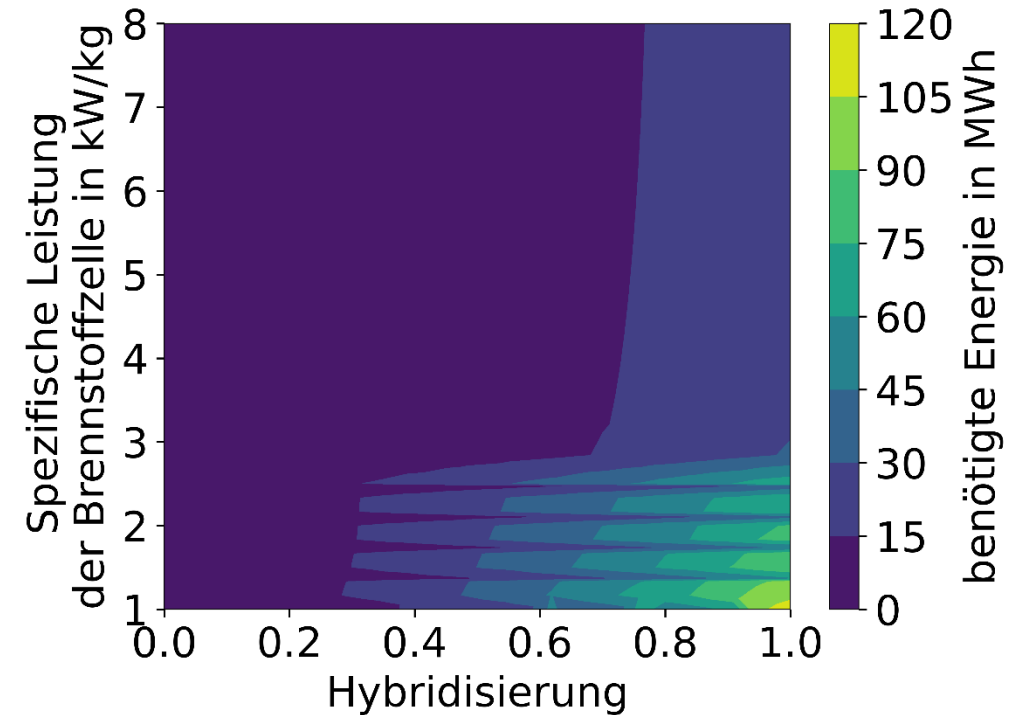
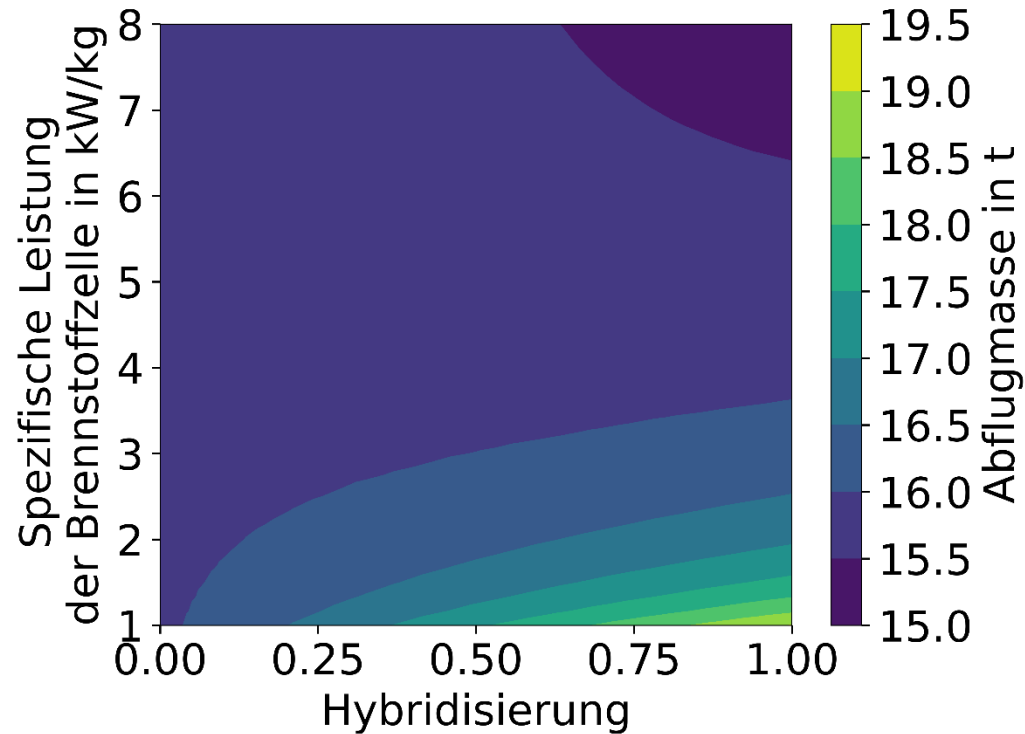
- Variiert zwischen 1kW/kg – 8kW/kg
- Nutzlast: 3880 kg
- MTOM: 15 660 kg
- Reiseflughöhe: 25 000 ft



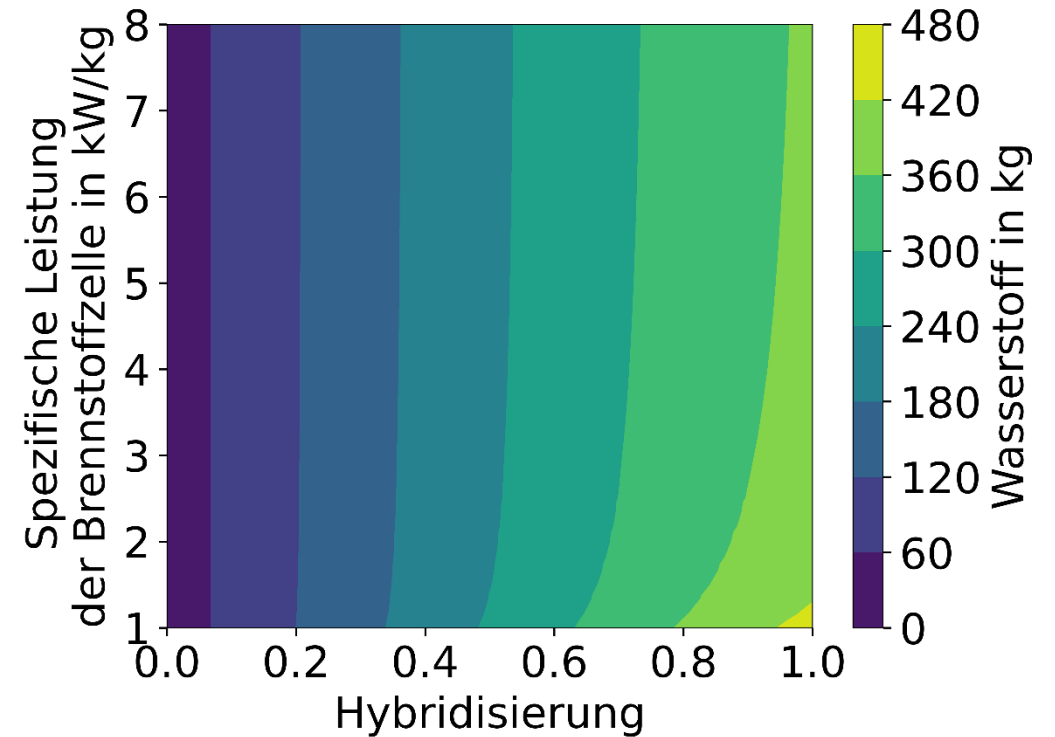
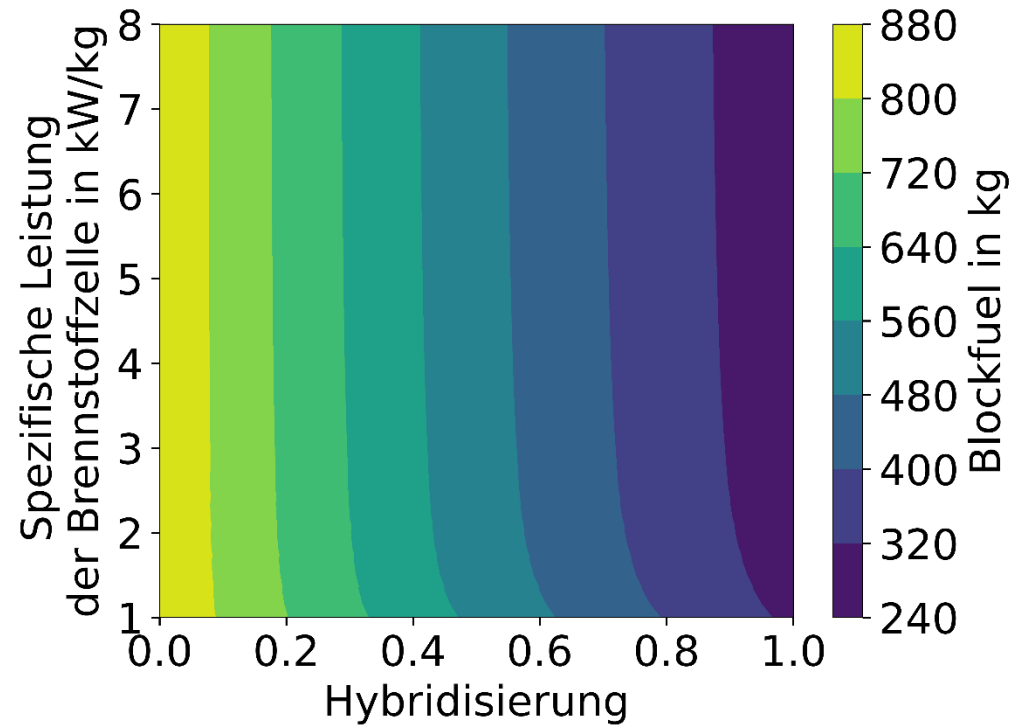
Ragone Plot von Brennstoffzellen incl. Systemen mit  
- gelb: 1.6kW/kg und 5kW/kg EMotoren (Stand der Technik)  
- rot: aktuelle Technik mit optimierten Tanks  
- blau: zukünftig erwartet: 8kW/kg mit 10kW/kg Emotoren  
Quelle [4]



Masse der Brennstoffzelle deutlich höher als der Gasturbine/Elektromotors



Benötigte Energie bei konventionell am geringsten  
Max. Abflugmasse nur bei aktuellen Leistungsdichten nicht zu halten



Benötigter Treibstoff bei konventionell am höchsten



## ➤ Oberflächliche Auslegung der Brennstoffzelle mit Systemen

Komponente	Unterkomponenten	Performance	Masse
Brennstoffzelle	Brennstoffzelle, Kompressoren, Kühlsystem, elektrisches System, Tanksystem, Tank	MDT	Spezifische Leistung
Elektromotor	Elektromotor, Leistungselektronik, Kühlsystem	MDT	Spezifische Leistung
Gasturbine	Gasturbine, Getriebe	MDT	Spezifische Leistung
Getriebe		MDT	Spezifische Leistung
Propeller	Propeller, Gondel	MDT	Torenbeek

MDT = Multidimensionale Daten Tabelle

- Oberflächliche Auslegung der Brennstoffzelle mit Systemen
  - Kenntnisse über spezifische Systemleistungen notwendig
- Mehr Hoffnung für erfolgreichen **Demonstatorflug**
  - Hohe notwendige Leistungsdichten
  - Flug in 2026
    - Da mit Demonstrator: keine Nutzlast zu transportieren!
- Pace: Ungünstige Logik bei Design des Powertrains
  - Bedarfsgerechte Auslegung der Brennstoffzelle sinnvoller (fix in Arbeit)

- 
- Betrachtung von Systemmassen und –volumen
    - Tankintegration
    - Schwerpunktwanderung

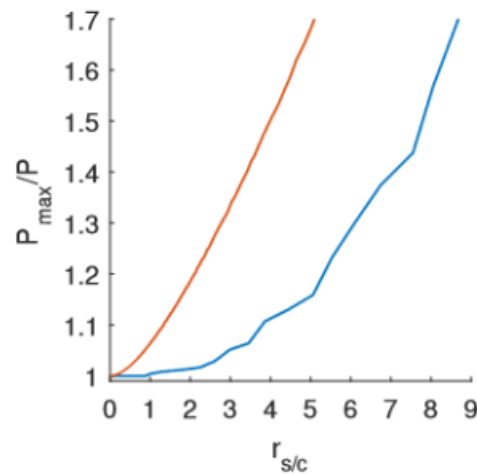
---

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit**

**Gibt es Fragen?**

- 1 <https://www.deutscheaircraft.com/>
- 2 Vratny P. C., *Conceptual Design Methods of Electric Power Architectures for Hybrid Energy Aircraft*, Dissertation, 2018
- 3 Pontika, E., Uaghari, B. et al., *Integrated Mission Performance Analysis of Novel Propulsion Systems: Analysis of a Fuel Cell Regional Aircraft Retrofit*, AIAA SciTech Forum 2023, DOI:10.2514/6.2023-0840
- 4 Kadyk, T. et al., *Design of Fuel Cell Systems for Aviation*, *Energies* **2018**, 11(2), 375; <https://doi.org/10.3390/en11020375>

Stand 2018:



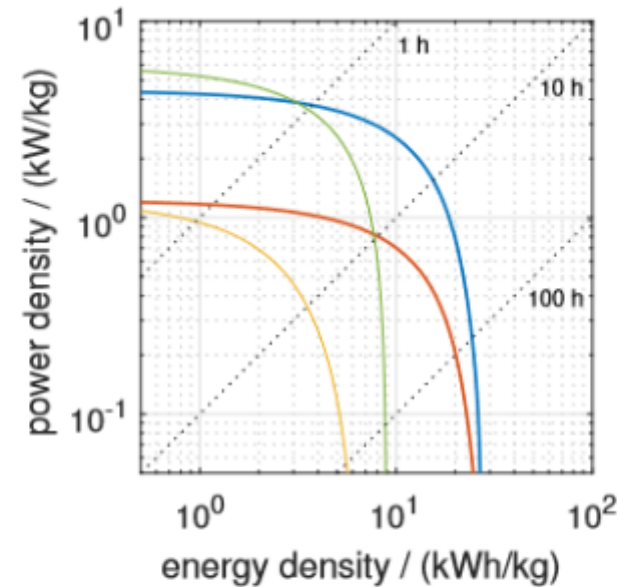
**Figure 6.** Fuel cell oversize for minimum fuel cell system weight as function of the ratio of tank-to-fuel cell mass. Red: Stationary tank design. Blue: Advanced tank design of Winnefeld et al. [16].

**Table 2.** Comparison of fuel cell system weight of current and future aircraft technology employing current and future fuel cell and electric motor (EM) technology.

Aircraft Tech., $P_{rq}$	Current FCS	Future FCS
	1.6 kW/kg FC 5.8 kW/kg EM	8 kW/kg FC 10 kW/kg EM
current, 27.6 MW	25,028 kg	10,900 kg
future, 16.3 MW	16,758 kg	8197 kg

FCS = fuel cell system.

Stand 2018:



**Figure 7.** Ragone plot of current and future fuel cell systems for aviation. Yellow: current fuel cells with 1.6 kW/kg incl. periphery, current electric engines with 5.2 kW/kg and simple stationary tanks. Red: current fuel cells+periphery and electric engines with LH2 tanks optimized for medium-haul flight. Blue: future lightweight, high-power fuel cells+periphery with 8 kW/kg, future electric engines with 10 kW/kg and optimized LH2 tanks. Green: current system of jet engine (Airbus A320) and kerosene tanks. Dotted lines mark time constants of 1 h (top), 10 h (middle), and 100 h (bottom).

## Imprint:

Technische Universität Berlin  
Office for Communication, Events and Alumni  
Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin  
Phone: +49 (0)30/314 23922, Fax: +49 (0)30/314 23909  
E-Mail: [pressestelle@tu-berlin.de](mailto:pressestelle@tu-berlin.de)  
Internet: <http://www.tu-berlin.de>

Data as of: January 2020