

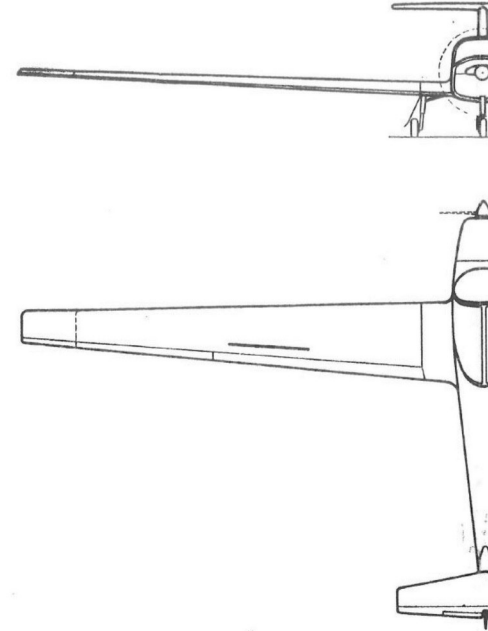
# Entwicklung einer Brennstoffzellentestanlage zur Charakterisierung für den Einsatz in der Luftfahrt



taifun 17 H<sub>2</sub>

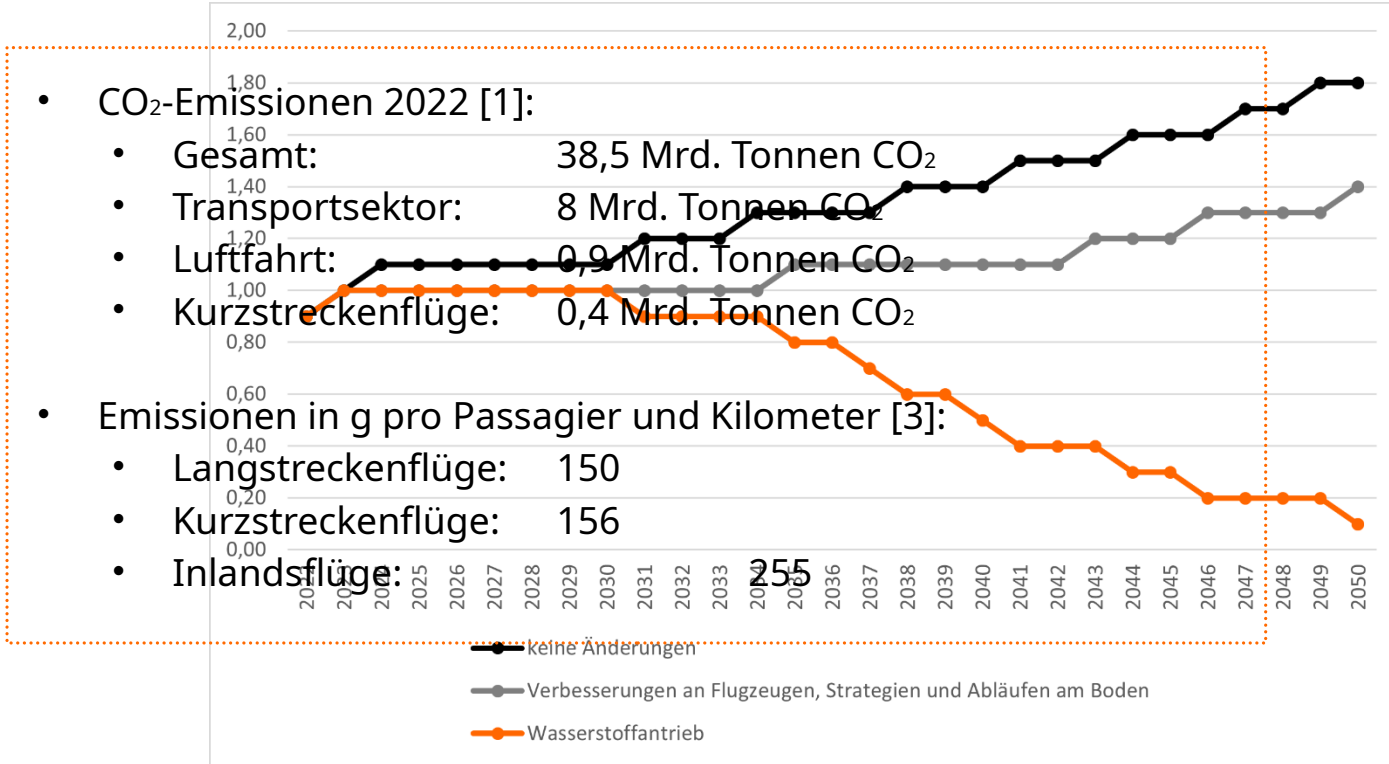
# Agenda

- CO<sub>2</sub>-Ausstoß in der Luftfahrt
- Projekt Taifun 17 H<sub>2</sub>
- Betriebsbedingungen in der Luftfahrt
- Brennstoffzellentestanlage
  - Gasversorgung
  - Konditionierung
  - Brennstoffzellensystem
- Kaltstartverhalten einer PEM-Brennstoffzelle
- Fazit



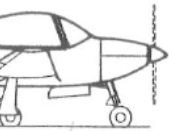
# CO<sub>2</sub> in der zivilen Luftfahrt

CO<sub>2</sub>-Ausstoß in Mrd. Tonnen [2]



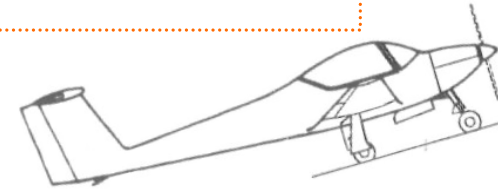
# Projekt Taifun 17 H2

- CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial in der allgemeinen Luftfahrt
- Entwicklung eines Brennstoffzellenantriebsstrangs für Leichtflugzeuge
- Integration in Motorsegler Valentin Taifun 17 E
  - zwei Sitze
  - max. Startmasse: 850 kg
  - Reisegeschwindigkeit ~160 km/h
  - max. Startleistung: 75 kW
- Hybridsystem mit Pufferbatterie für Startleistung



# Betriebsbedingungen in der Luftfahrt

- wichtige Einflüsse auf FL100
  - Temperatur:  $-10 \leq T \leq 40 \text{ }^\circ\text{C}$
  - max. Flughöhe: FL100 (10.000 ft)  $\approx 3.048 \text{ m}$
  - Standarddruck bei FL100: 0,697 bar(a)
  - Luftdichte bei FL100: 0,9047
- kompakte Bauweise und Gewicht ausschlaggebend



# Brennstoffzellentestanlage



essgrößen, 32 Sensoren  
Gasversorgungsgestell

Versorgungsgestell  
Bereitstellung der  
Gase (Luft, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>)

Luft

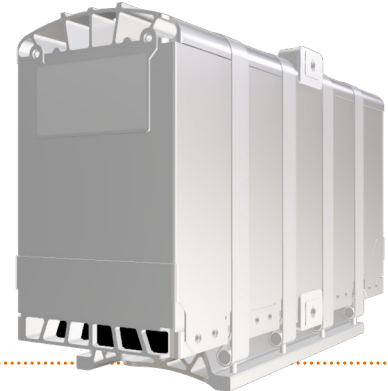
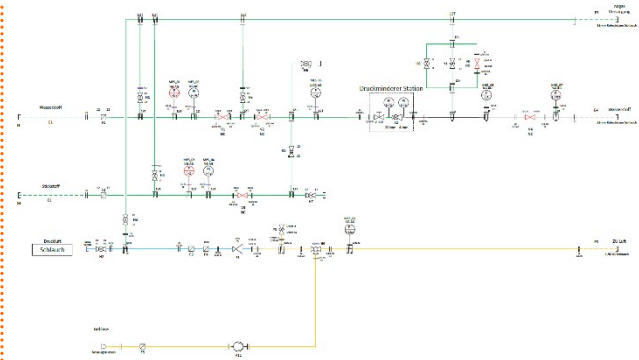
Konditionierungsgestell

- Brennstoffzellengestell
- Peripherie:
  - Kühlgerät, Leitstand, elektrische Last



# Gasversorgung

- Bereitstellung von Wasserstoff, Stickstoff und Luft
- sicherheitsbedingte Redundanzen
- Waste-Line für Gasablass
- Luftanschluss an Kompressornetz
- zusätzlicher Anschluss für regelbaren Klauenverdichter
- manuelle Druckminderer für Anoden- und Kathodenkreis

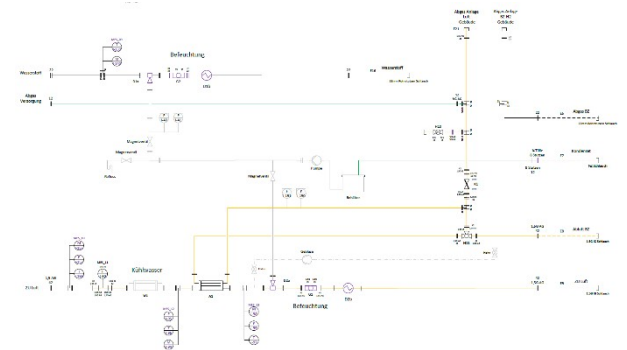
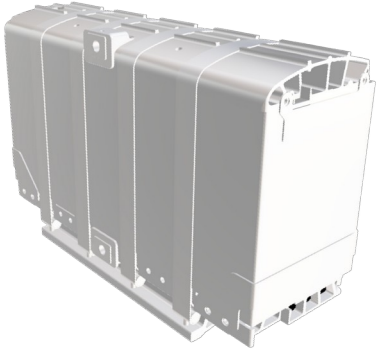


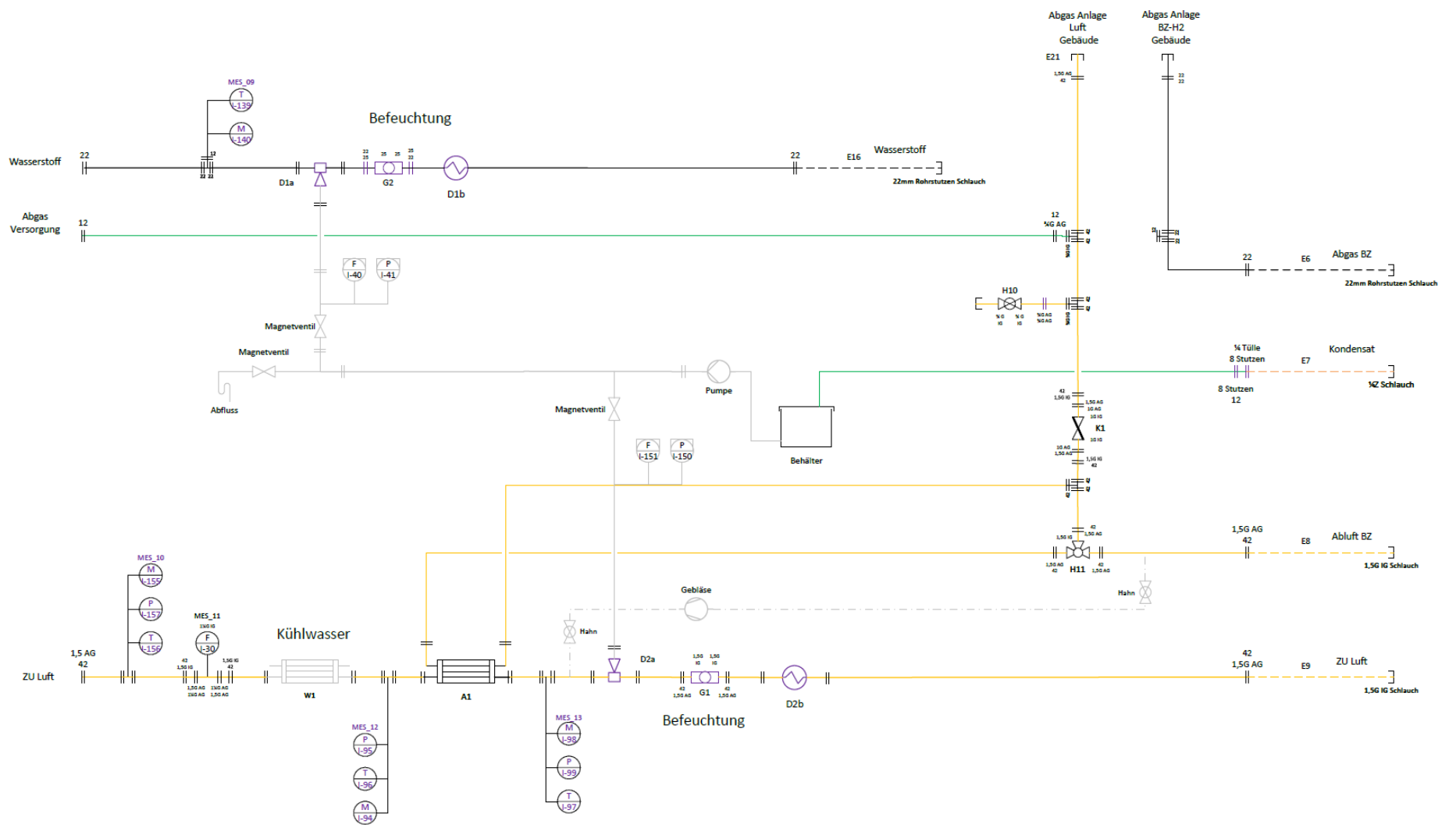




# Konditionierung

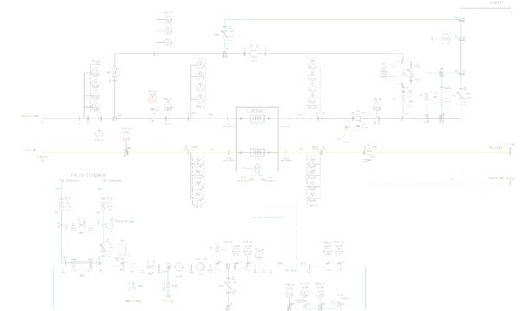
- Vorbereitung der Luft für die Brennstoffzelle
- Temperierung und Befeuchtung
- Aktuell:
  - Gegenstrombefeuchter
  - keine Anodenbefeuchtung
- Möglichkeit weitere Methoden zu testen



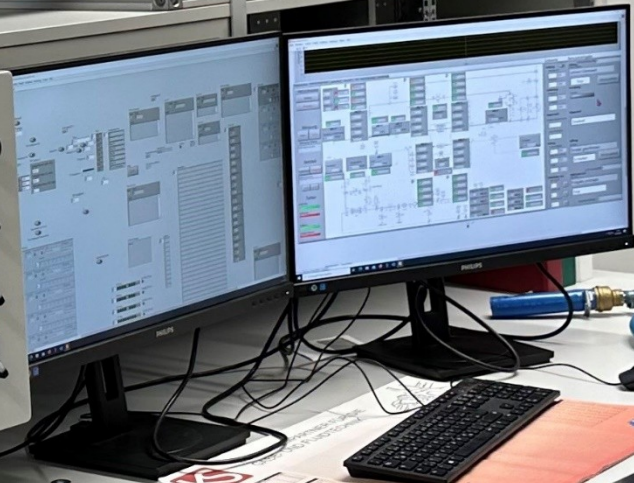


# Brennstoffzellensystem und Peripherie

- Anodenkreis mit Rezirkulation
- Kathodenkreis mit Wasserabscheider
- primärer Kühlkreis mit Bypass
- programmierbare Last bis 30 kW
- Kühlgerät
- Leitstand mit eigener Software

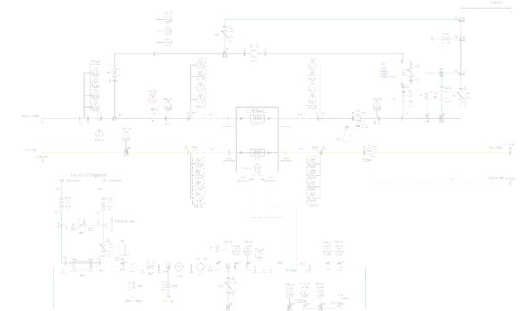


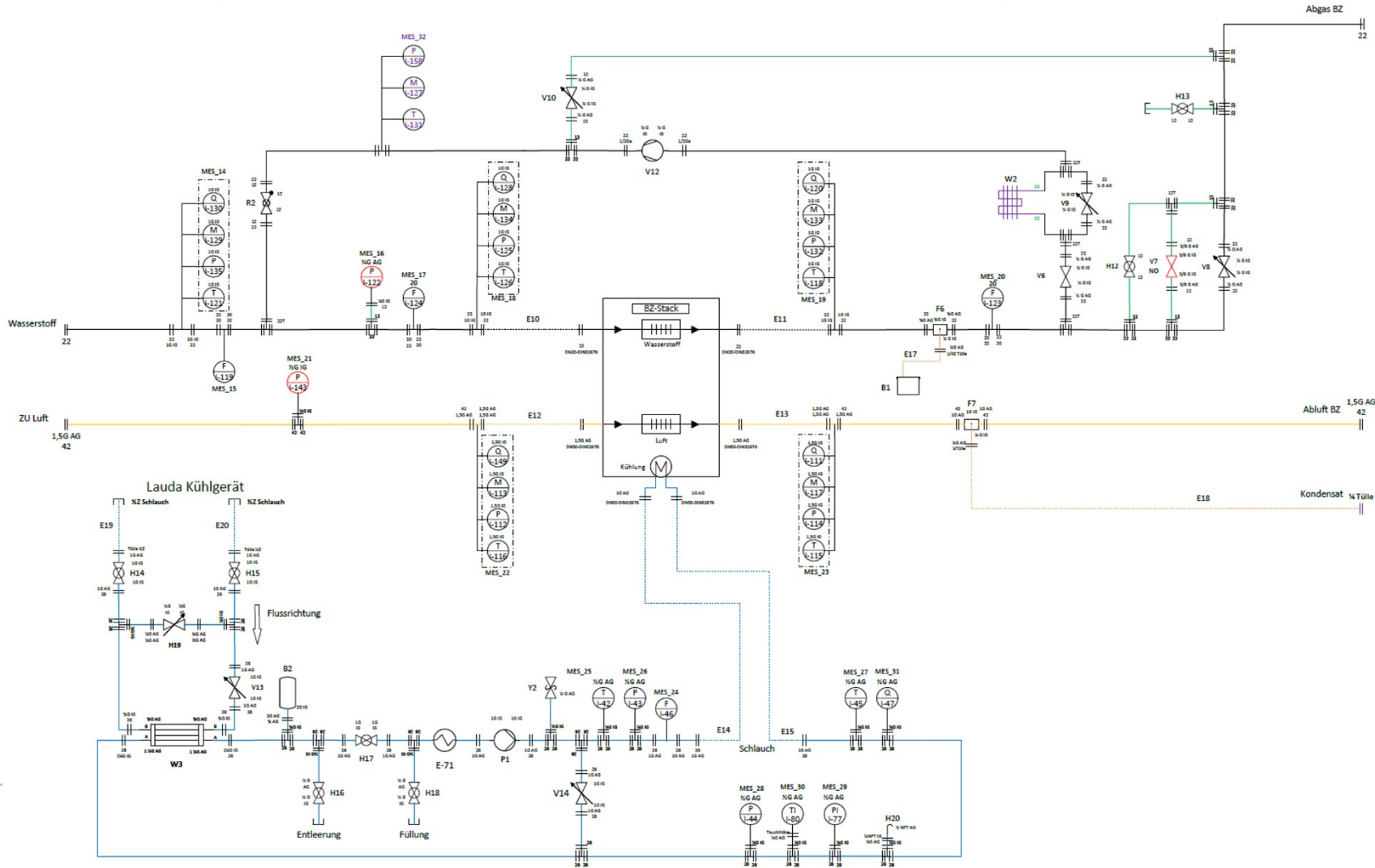
fm.thws.de/taifun



# Brennstoffzellensystem und Peripherie

- Anodenkreis mit Rezirkulation
- Kathodenkreis mit Wasserabscheider
- primärer Kühlkreis mit Bypass
- programmierbare Last bis 30 kW
- Kühlgerät
- Leitstand mit eigener Software

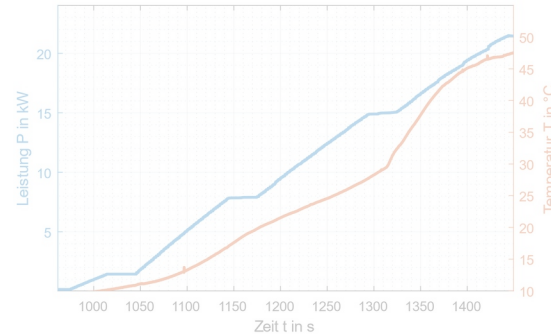
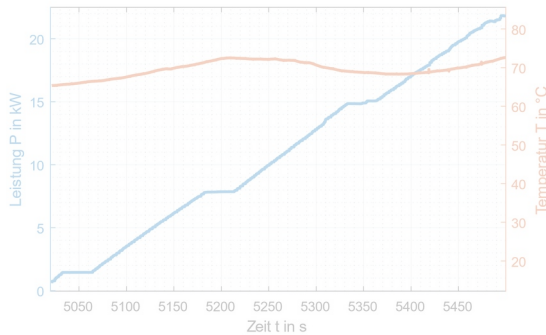
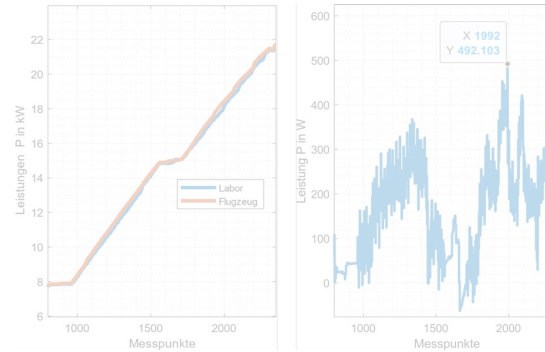






# Kaltstartverhalten einer PEM-Brennstoffzelle

Stromstärke $I$ in A	$1 < I < 180$
$\lambda_{\text{Luft}}$	$\approx 2,2$
rel. Luftfeuchtigkeit in %	$\approx 70$
$m_{\text{Luft}}$ in $\frac{\text{NL}}{\text{min}}$ bei $I < 60$	300
$m_{\text{Luft}}$ in $\frac{\text{NL}}{\text{min}}$ bei $I > 60 \dots 275$	300 ... 2000
$p_{\text{Wasserstoff}}$ in bar(a)	$\approx 1,5$
$p_{\text{Luft}}$ in bar(a)	$\approx 1,4$
Starttemperatur $T_{\text{Labor}}$ in °C	70
Starttemperatur $T_{\text{Flugzeug}}$ in °C	10



# Kaltstartverhalten einer PEM-Brennstoffzelle

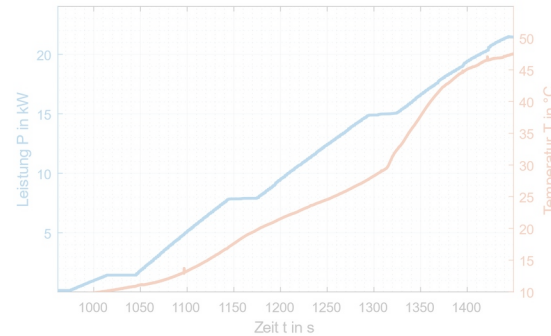
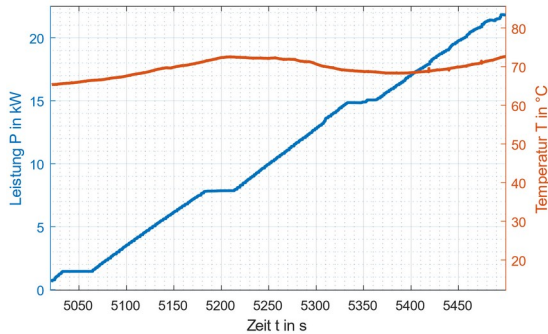
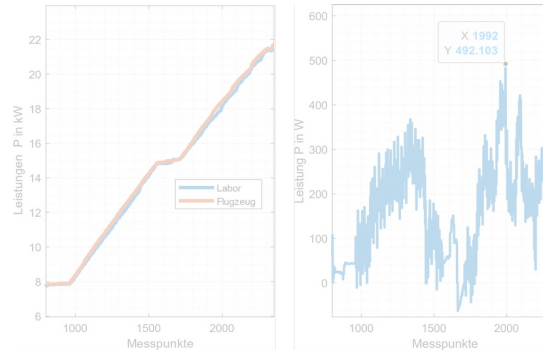
Stromstärke $I$ in A	$1 < I < 180$
$\lambda_{\text{Luft}}$	$\approx 2,2$
rel. Luftfeuchtigkeit in %	$\approx 70$
$\dot{m}_{\text{Luft}}$ in $\frac{\text{NL}}{\text{min}}$ bei $I < 60$	300
$\dot{m}_{\text{Luft}}$ in $\frac{\text{NL}}{\text{min}}$ bei $I > 60 \dots 275$	300 ... 2000
$p_{\text{Wasserstoff}}$ in bar(a)	$\approx 1,5$
$p_{\text{Luft}}$ in bar(a)	$\approx 1,4$
Starttemperatur $T_{\text{Labor}}$ in °C	70
Starttemperatur $T_{\text{Flugzeug}}$ in °C	10



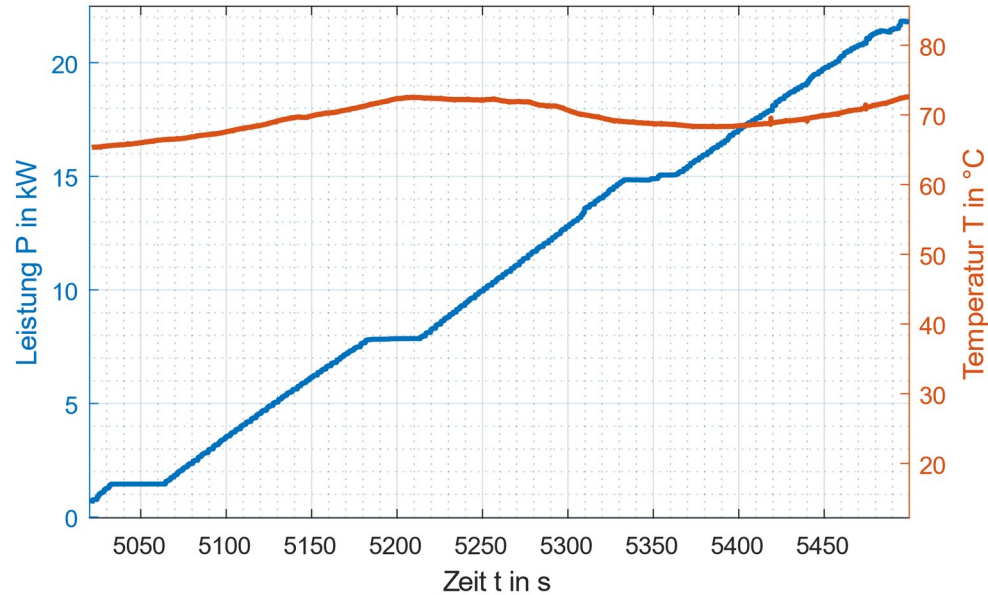


# Kaltstartverhalten einer PEM-Brennstoffzelle

Stromstärke $I$ in A	$1 < I < 180$
$\lambda_{\text{Luft}}$	$\approx 2,2$
rel. Luftfeuchtigkeit in %	$\approx 70$
$\dot{m}_{\text{Luft}}$ in $\frac{\text{NL}}{\text{min}}$ bei $I < 60$	300
$\dot{m}_{\text{Luft}}$ in $\frac{\text{NL}}{\text{min}}$ bei $I > 60 \dots 275$	300 ... 2000
$p_{\text{Wasserstoff}}$ in bar(a)	$\approx 1,5$
$p_{\text{Luft}}$ in bar(a)	$\approx 1,4$
Starttemperatur $T_{\text{Labor}}$ in $^{\circ}\text{C}$	70
Starttemperatur $T_{\text{Flugzeug}}$ in $^{\circ}\text{C}$	10

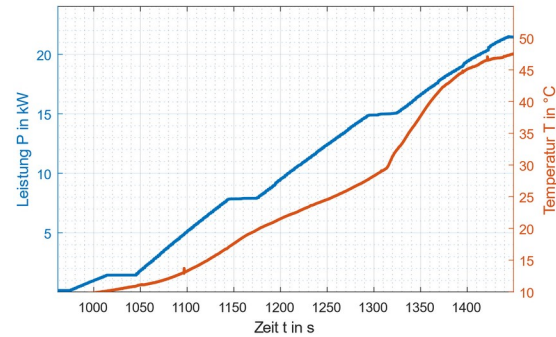
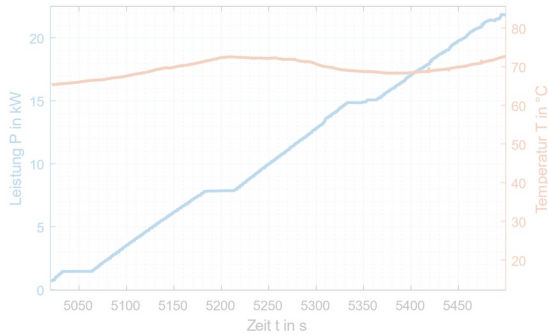
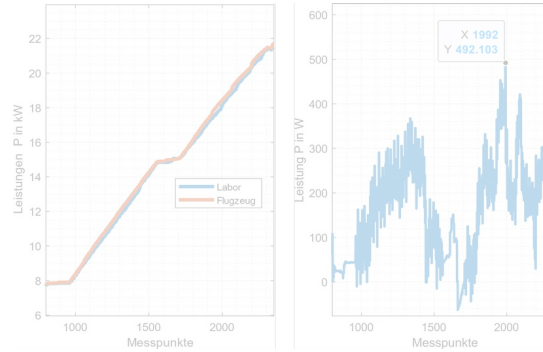


# Kaltstartverhalten einer PEM-Brennstoffzelle

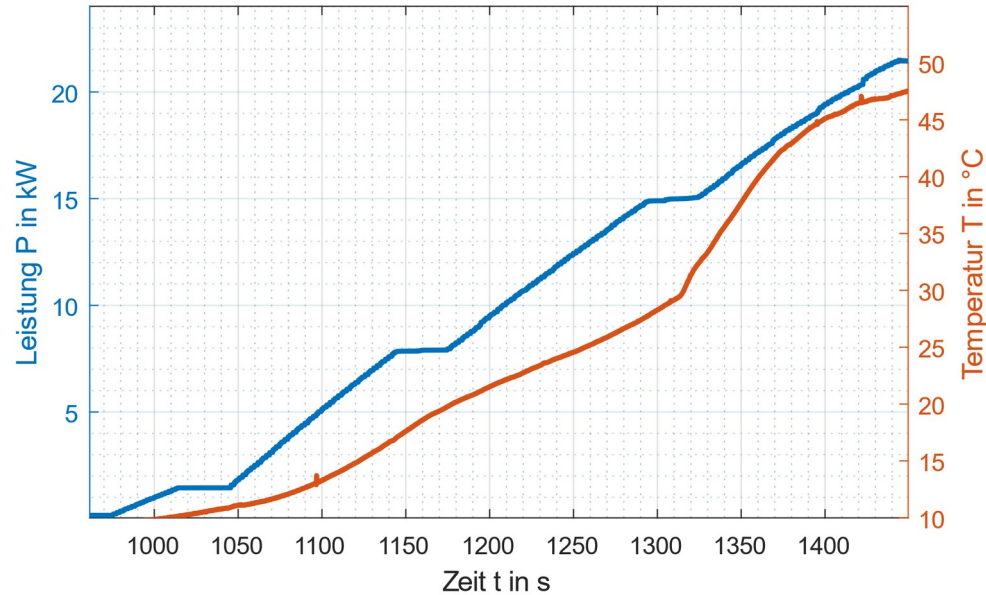


# Kaltstartverhalten einer PEM-Brennstoffzelle

Stromstärke $I$ in A	$1 < I < 180$
$\lambda_{\text{Luft}}$	$\approx 2,2$
rel. Luftfeuchtigkeit in %	$\approx 70$
$\dot{m}_{\text{Luft}}$ in $\frac{\text{NL}}{\text{min}}$ bei $I < 60$	300
$\dot{m}_{\text{Luft}}$ in $\frac{\text{NL}}{\text{min}}$ bei $I > 60 \dots 275$	300 ... 2000
$p_{\text{Wasserstoff}}$ in bar(a)	$\approx 1,5$
$p_{\text{Luft}}$ in bar(a)	$\approx 1,4$
Starttemperatur $T_{\text{Labor}}$ in °C	70
Starttemperatur $T_{\text{Flugzeug}}$ in °C	10

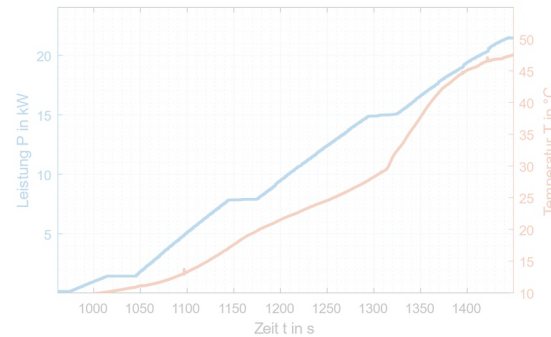
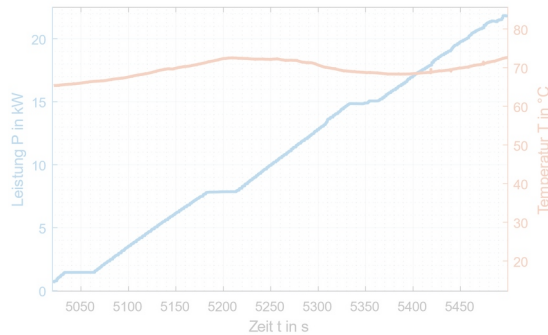
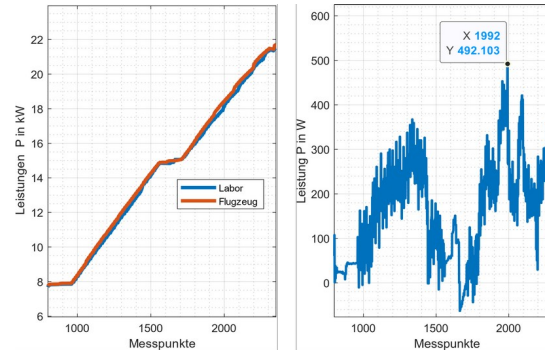


# Kaltstartverhalten einer PEM-Brennstoffzelle

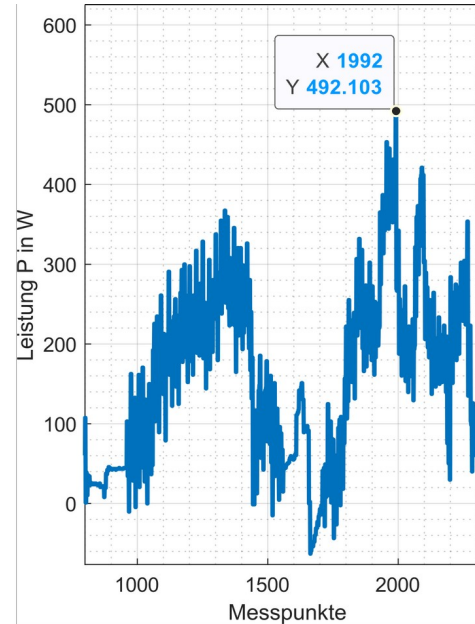
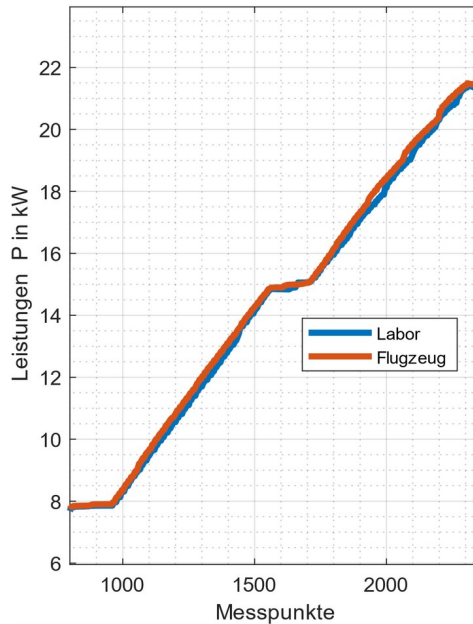


# Kaltstartverhalten einer PEM-Brennstoffzelle

Stromstärke $I$ in A	$1 < I < 180$
$\lambda_{\text{Luft}}$	$\approx 2,2$
rel. Luftfeuchtigkeit in %	$\approx 70$
$\dot{m}_{\text{Luft}}$ in $\frac{\text{NL}}{\text{min}}$ bei $I < 60$	300
$\dot{m}_{\text{Luft}}$ in $\frac{\text{NL}}{\text{min}}$ bei $I > 60 \dots 275$	300 ... 2000
$p_{\text{Wasserstoff}}$ in bar(a)	$\approx 1,5$
$p_{\text{Luft}}$ in bar(a)	$\approx 1,4$
Starttemperatur $T_{\text{Labor}}$ in $^{\circ}\text{C}$	70
Starttemperatur $T_{\text{Flugzeug}}$ in $^{\circ}\text{C}$	10

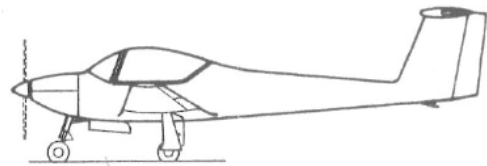


# Kaltstartverhalten einer PEM-Brennstoffzelle



# Fazit

- hohes Einsparpotenzial für CO<sub>2</sub> in der Luftfahrt
- Einfluss der Temperatur, Feuchtigkeit und Luftdichte auf den Betrieb der Brennstoffzelle in der Luftfahrt
- modularer Ansatz für die Bewertung von Brennstoffzellen in der Mobilität
- stabiler Brennstoffzellenbetrieb unter Realbedingungen möglich
- explizites Vorheizen nicht notwendig
- Gewicht kann eingespart werden





# Referenzen

- [1] Wyman, O., Projected CO2 emissions from the aviation industry between 2022 and 2050, by scenario, <https://www.statista.com/statistics/1189613/projected-co2-emissionaviation-worldwide/>, Limerick (Zugriffstag: 06.07.2023)
- [2] International Energy Agency, Distribution of carbon dioxide emissions produced by the transportation sector worldwide in 2022, by sub sector, <https://www.statista.com/statistics/1185535/transport-carbon-dioxide-emissions-breakdown/>, Paris (Zugriffstag: 06.02.2024)
- [3] UK Department for Business, Energy and Industrial Strategy, Carbon footprint of select modes of transport per kilometer of travel in 2018, <https://www.statista.com/statistics/1185559/carbon-footprint-of-travel-per-kilometer-by-mode-of-transport/>, London (Zugriffstag: 06.05.2023)
- [4] Deutscher Wetterdienst, [https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Standardatmosphaere\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Standardatmosphaere_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3), Offenbach (Zugriffstag: 15.07.2023)
- [5] Kurzweil, Peter (2003), Brennstoffzellentechnik (3. Ausgabe), Springer Verlag, ISBN 978-3-658-14934-5
- [6] Jantsch, F., Inbetriebnahme und Optimierung eines Brennstoffzellenversuchsstandes sowie experimentelle Analyse des Verhaltens einer PEM-Brennstoffzelle, 2023, Schweinfurt
- [7] Hußlein, J., Entwicklung, Implementierung und Inbetriebnahme einer Software zur Regelung und Messwerterfassung eines Brennstoffzellenleistungsprüfstandes mittels LabVIEW, 2023, Schweinfurt
- [8] Schott, T., Konzeption, Entwicklung und konstruktive Gestaltung eines Brennstoffzellenprüfstandes, 2021, Schweinfurt