



Präsentiert von

Holger Plötner
Flugzeugbauingenieur
Diplomand

Wirtschaftlichkeitsanalyse

Vergleich eines Wassergenerierungssystems
mit dem konventionellen Wassersystem in Flugzeugen



AIRBUS

Inhalt

1. Einleitung
2. Verschiedene Wassersysteme
3. Brennstoffzelle und Reformer
4. Brennstoffzellensystem
5. Betriebskostenrechnung
6. DOC-Vergleich
7. Zusammenfassung

1. Einleitung

Brennstoffzelle

- innovative Technologie zur kombinierten Wärme- und Stromerzeugung
- hohe Erwartungen an das Einsparpotential fossiler Ressourcen bei der Energiebereitstellung
- direkte Umwandlung chemischer Energie in elektrische Energie

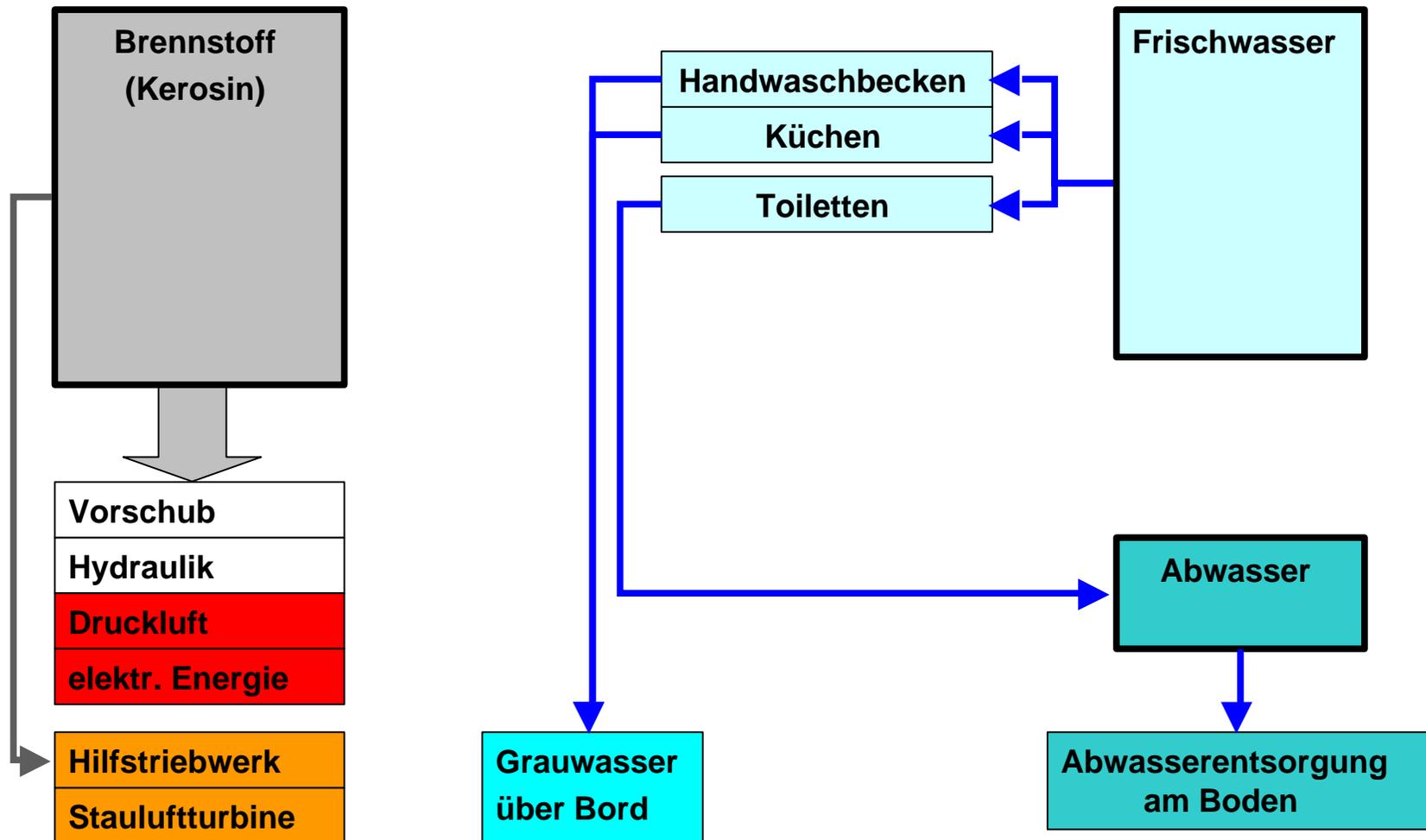
Einsatz im Flugzeug

Flugzeugparameter

- Bereitstellung von verschiedenen Energiearten und Abgabe von Wasser
- Abschätzung des Potentials aus technologischer, ökonomischer und ökologischer Sicht

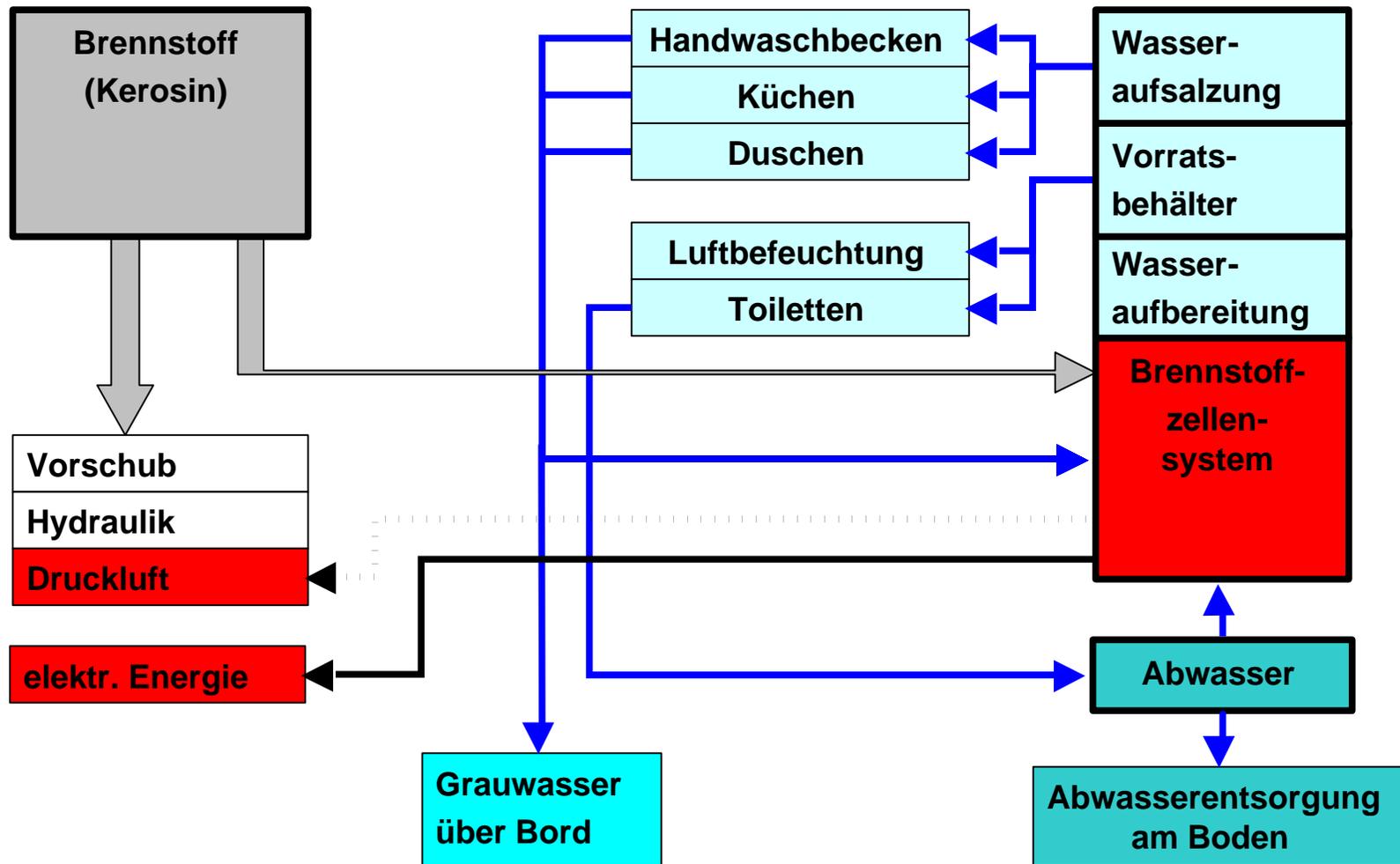
2. Konventionelles Wassersystem

Systemaufbau:



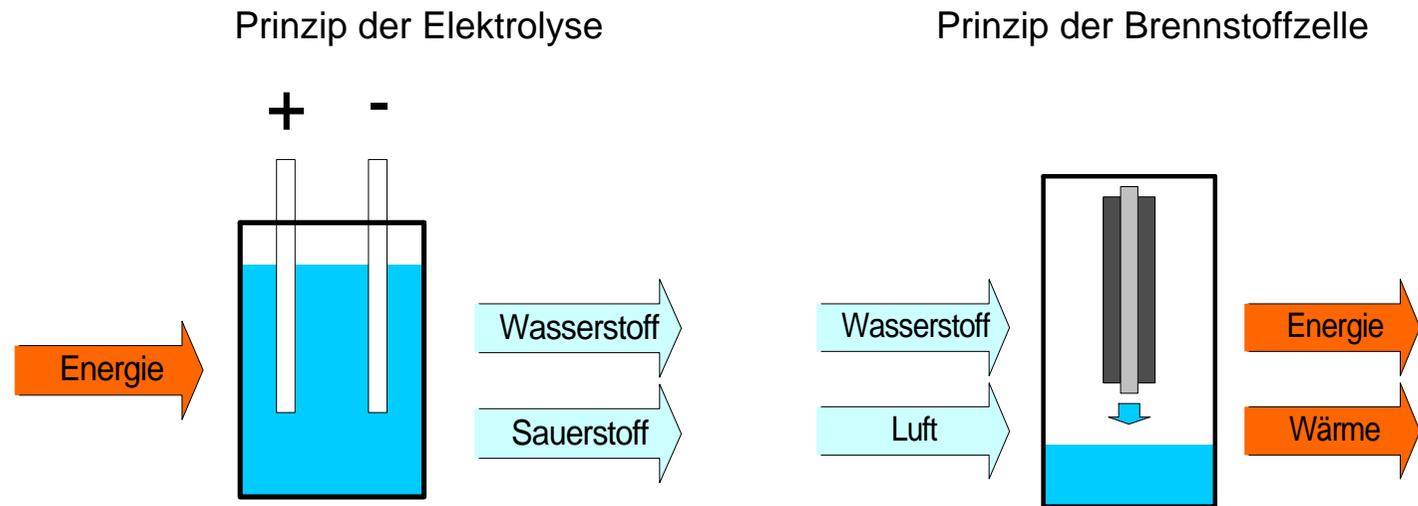
2. OBOWAGS

Systemaufbau:



3. Brennstoffzelle allgemein

Grundprinzip:



Einteilung nach der Betriebstemperatur:

60 - 130 °C

Niedrigtemperatur Brennstoffzelle

160 - 220 °C

Mitteltemperatur Brennstoffzelle

> 220 °C

Hochtemperatur Brennstoffzelle

3. Brennstoffzellenarten

Niedrigtemperatur Brennstoffzellen

Alkalische Brennstoffzelle (AFC)

Polymerelektrolyt-Membran Brennstoffzelle (PEMFC)

Mitteltemperatur Brennstoffzellen

Phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC)

Hochtemperatur Brennstoffzellen

Schmelzkarbonat Brennstoffzelle (MCFC)

Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC)

3. Reformierungsarten

Dampfreformierung

Vorteile:

- hoher Wirkungsgrad 94%
- bessere Steuerbarkeit

Nachteile:

- ungünstiges Kaltstartverhalten

Partielle Oxidation

Vorteile:

- kurze Startzeiten

Nachteile:

- geringer Wirkungsgrad
- geringere Wasserstoffausbeute
- Gefahr der Verkokung

Autotherme Reformierung

Vorteile:

- kurze Startzeiten

Nachteile:

- geringere Wasserstoffausbeute als bei Dampfreformierung

4. Wahl und Aufbau des BZ-Systems

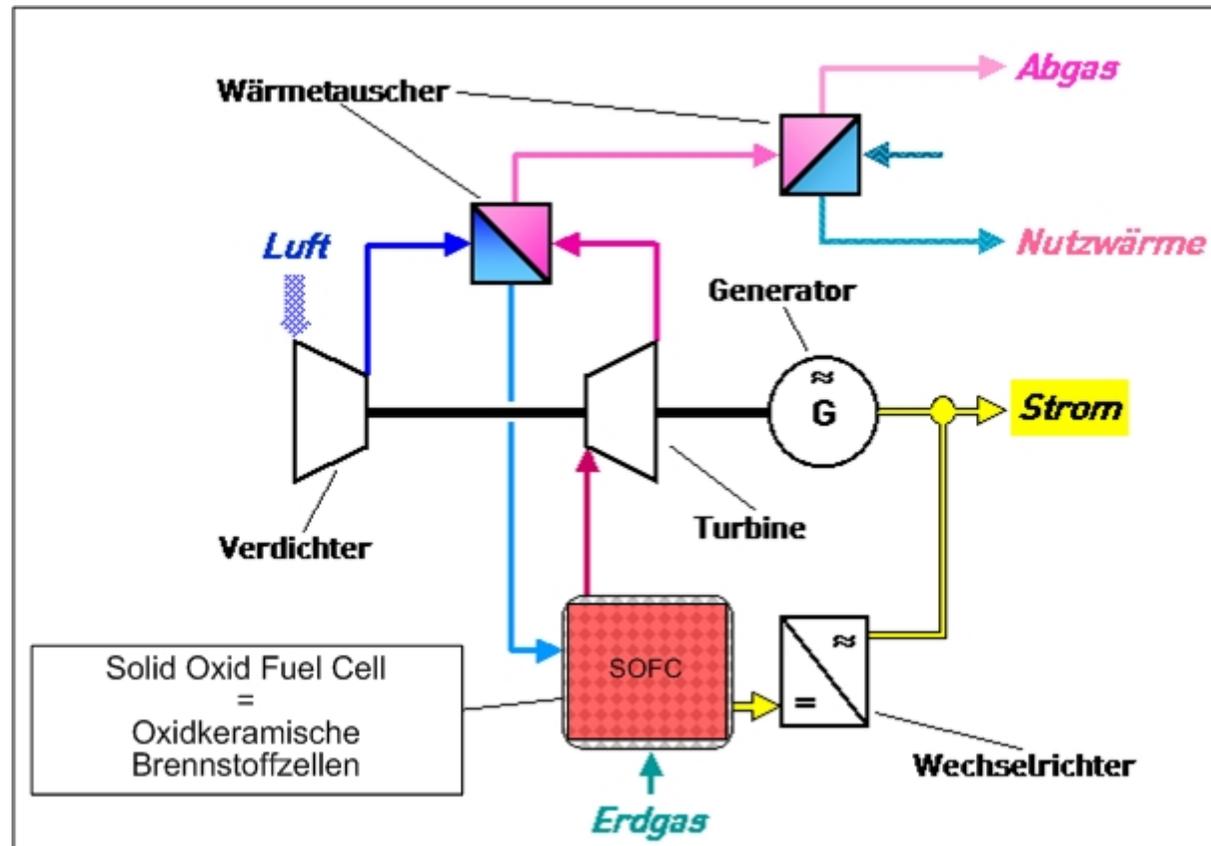
Auswahl: - druckaufgeladene Festoxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC) mit Dampfreformierung

Gründe:

- hoher elektrischer Wirkungsgrad (der durch Druckbeaufschlagung erhöht werden kann)
- interne Reformierung des Brennstoffes aufgrund der hohen Betriebstemperatur
- Einsatz von Kerosin als Brennstoff aufgrund der Kohlenmonoxidverträglichkeit
- gute Steuerbarkeit des Wasserüberschusses zur Vermeidung von Kohlenstoff
- Rückgewinnung der Druckenergie des Abgases in einer Mikroturbine, die gleichzeitig den Antriebsbedarf des Luftverdichters aufbringt und den Leistungsüberschuss zur zusätzlichen Druckluftherzeugung

4. Wahl und Aufbau des BZ-Systems

Aufbau:



Quelle Supcon

[Reformer](#)

[SOFC](#)

[Kenndaten](#)

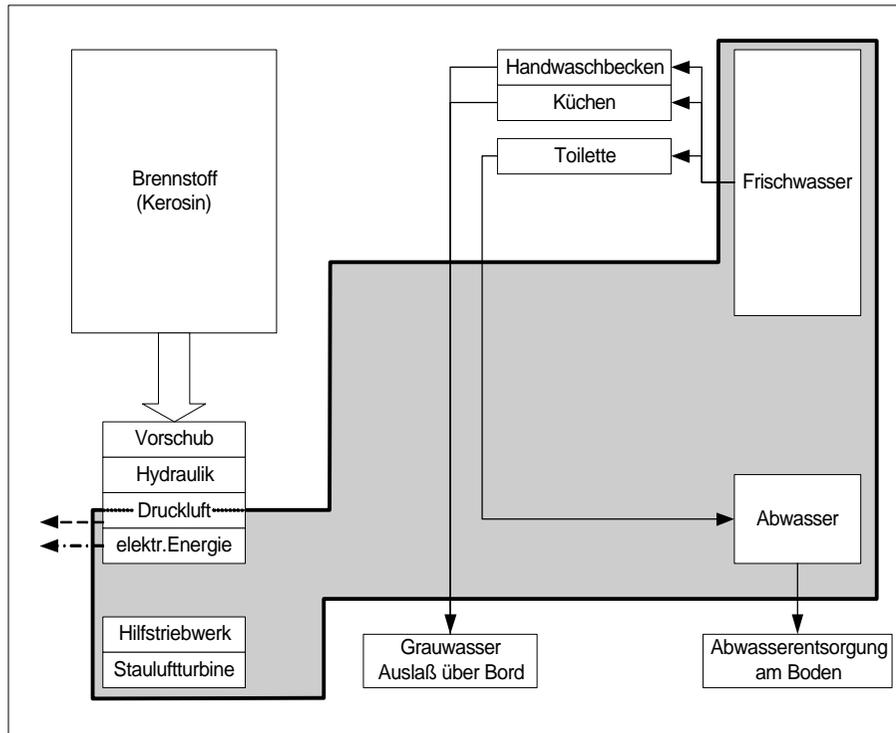
5. Betriebskostenrechnung

- Betriebskosten stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit dem eigentlichen Betriebszweck
- Einteilung in direkte (DOC) und indirekte (IOC) Betriebskosten
- Bekannteste Methoden der Ermittlung von direkten Betriebskosten
 - Air Transport Association of America (ATA 1967)
 - Lufthansa (DLH 1982)
 - Airbus Industrie (AI 1989)
- Methode DOC_{sys} zur Berechnung von Betriebskosten von Flugzeugsystemen
 - Abschreibung
 - Kraftstoff
 - Wartung

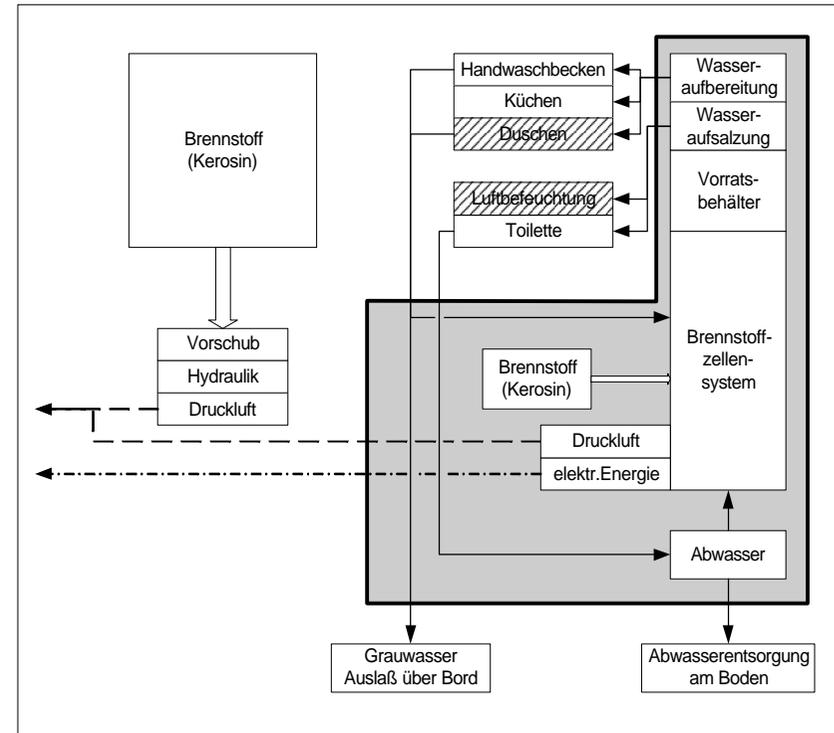
6. DOC - Vergleich

Systemgrenzen:

Konventionelles System



OBOWAGS®



6. DOC - Vergleich

1. Qualitativer Vergleich:

- spezifische Investitionskosten des Brennstoffzellensystems: 1000 US\$/kW
- spezifisches Gewicht des Brennstoffzellensystems: 2 kg/kW
- Flugzeit: maximal definierte des Flugzeuges
- Kraftstoffpreis: 0,21 US\$/l

2. Einfluss der Flugzeit als qualitativer Vergleich:

- Flugzeit: 60% der maximal definierte des Flugzeuges

3. Einfluss des Kraftstoffpreises als qualitativer Vergleich:

- Kraftstoffpreis: 0,315 US\$/l

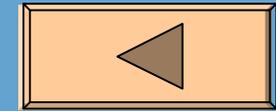
4. Ermittlung der Grenzinvestition des OBOWAGS®

7. Zusammenfassung

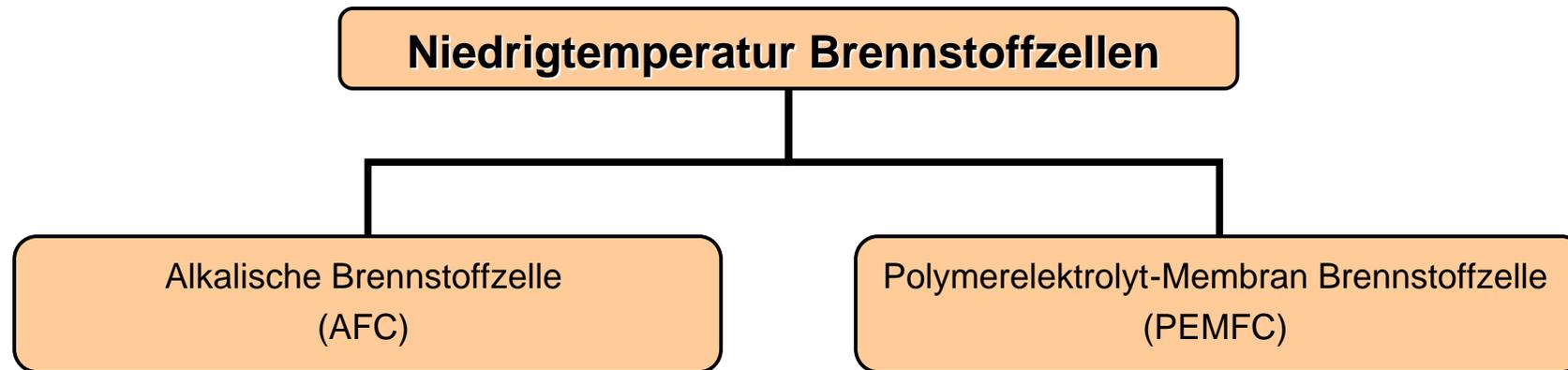
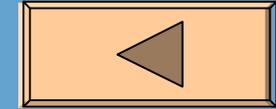
- OBOWAGS® bei allen Flugzeugen und allen untersuchten Szenarien geringere Betriebskosten als das konventionelle System
- besonders effizient:
 - hohe Passagierzahlen
 - hoher Wasserbedarf
 - hohe Flugmissionszeiten
- vorrangig der A380-800
- OBOWAGS® „profitiert“ von einer Erhöhung des Kraftstoffpreises
- Brennstoffzellentechnologie bietet hohe Zukunftsperspektiven

Anhang

Flugzeugparameter

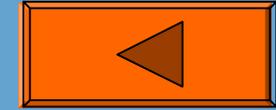


Flugzeugtyp	A320	A330-200	A340-600	A380-800
Passagierzahl	150	310	380	550
Reichweite [km]	3250	9000	15800	14200
Flugzeit [h]	7	12	17	17



- Temperatur 80 °C
- Elektrolyt: Kalilauge
- reinster Wasserstoff / Sauerstoff
- elektr. Wirkungsgrad Zelle 65%
- CO₂ unverträglich (Kaliumkarbonat)
- Kalilauge hoch korrosiv
- Katalysatoreinsatz

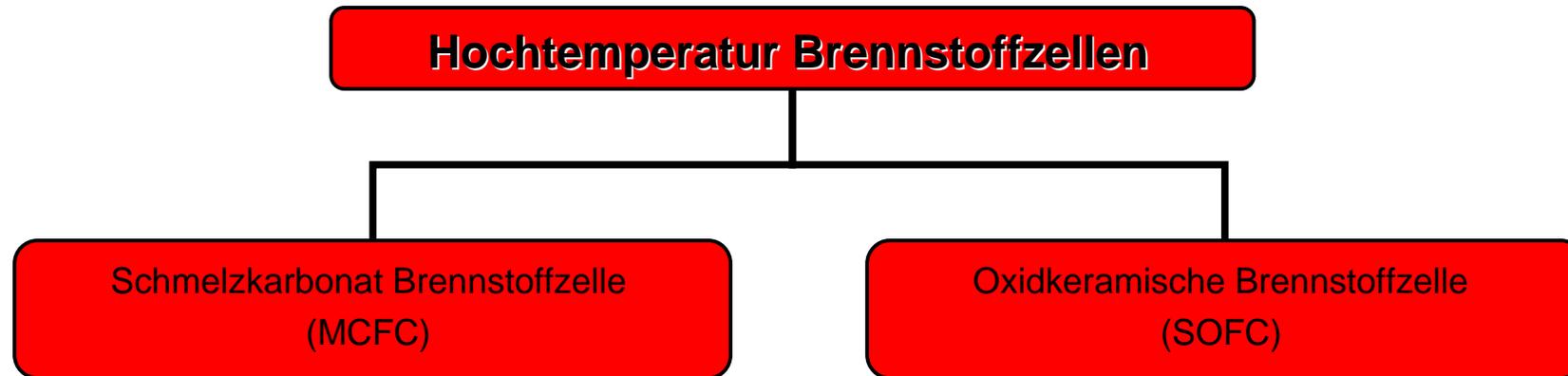
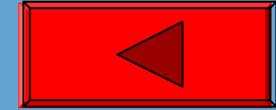
- Temperatur 80 °C
- Elektrolyt: Polymermembran
- Wasserstoff - Kohlenwasserstoffe / Sauerstoff - Luft
- elektr. Wirkungsgrad Zelle 60%
- Katalysatoreinsatz
- CO empfindlich
- Aufwendige Gasreinigung beim Einsatz von Kohlenwasserstoffen



Mitteltemperatur Brennstoffzellen

Phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC)

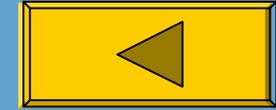
- Temperatur 200 °C
- Elektrolyt: Phosphorsäure
- Wasserstoff - Kohlenwasserstoffe /
Sauerstoff - Luft
- elektr. Wirkungsgrad Zelle 55%
- Katalysatoreinsatz
- CO verträglich
- CO₂ verträglich



- Temperatur 650 °C
- Elektrolyt: Alkalikarbonatschmelzen
- Wasserstoff - Kohlenwasserstoffe / Sauerstoff - Luft
- CO₂ verträglich (Kreislauf)
- elektr. Wirkungsgrad Zelle 60%
- Karbonatschmelze korrosiv
- kein Katalysator

- Temperatur 900 °C
- Elektrolyt: Yttriumstabilisiertes Zirkonoxid
- interne Reformierung / CO verträglich
- Konzepte: Röhren-/ Flachzellenkonzept
- elektr. Wirkungsgrad Zelle 60%
- Wirkungsgraderhöhung durch Druck
- Weiterentwicklung der Zellkeramik

Reformierungsarten



Dampfreformierung

- Zufuhr von Wasserdampf
Wasserstoffreiches
Synthesegas
- Temperatur 700 °C
- endotherme Reaktion

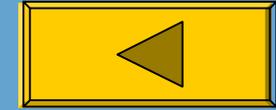
Partielle Oxidation

- Umsetzen von
Kohlenwasserstoffen
unter Sauerstoffmangel
- Temperatur 1300 °C
- exotherme Reaktion

Autotherme Reformierung

- Kombination aus
Dampfreformierung und
partieller Oxidation
- Temperatur 900 °C
- exotherme Reaktion

Kenndaten Brennstoffzellensystem



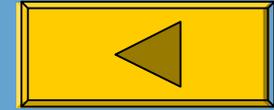
- elektrischer Wirkungsgrad der Brennstoffzelle 55 %
- Brennstoffumsatzgrad 90 %
- Luftüberschuss 1,44
- Wasserüberschuss 1,05

Kenndaten für das Brennstoffzellensystem bezogen auf **1 kWh** elektrische Energie

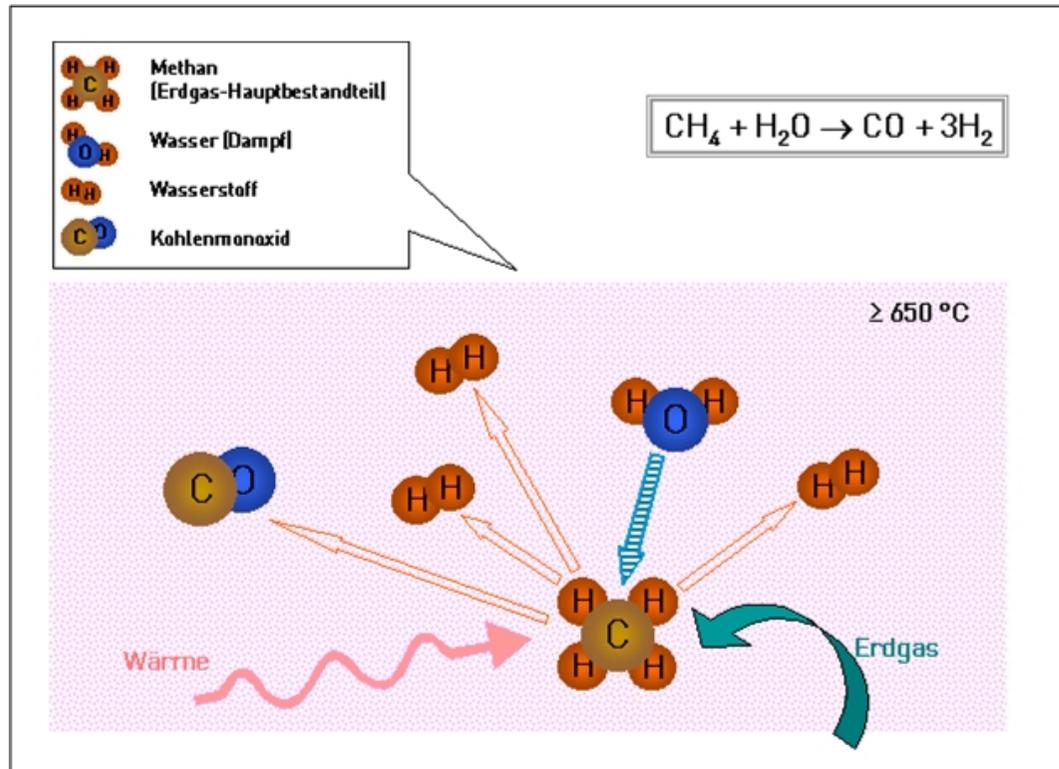
Bedarf an	Masse [kg/h]
Brennstoff	0,151
Luft	3,187
Wasser	0,203

Abgabe von	Masse [kg/h]
Wasser	0,358
Kohlendioxid	0,426
Kohlenmonoxid	0,2
Wasserstoff	0,004
Stickstoff	2,444
Sauerstoff	0,278

Reformer



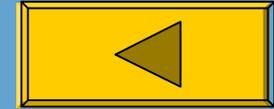
Interne Reformierung (Beispiel Erdgas)



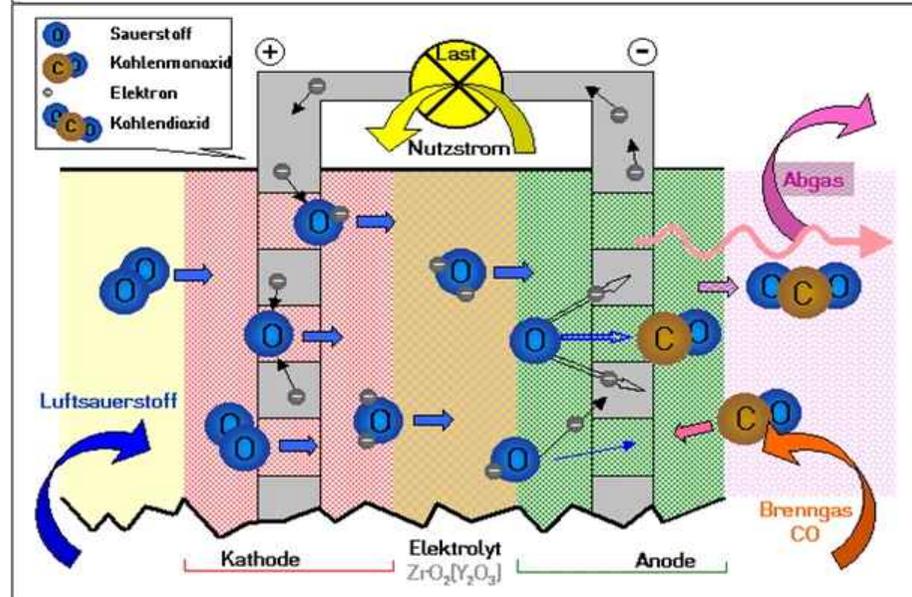
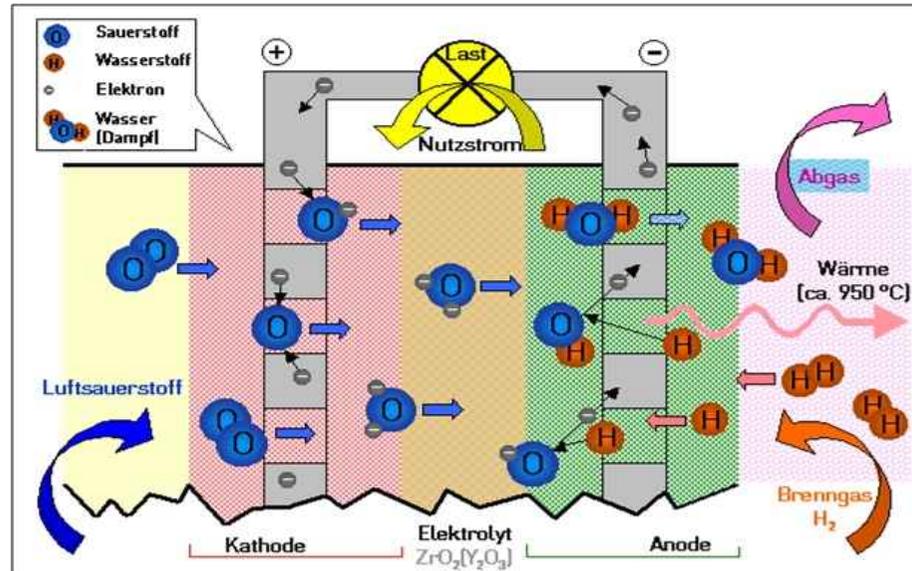
Quelle Supcon

- Kohlenwasserstoffe reagieren mit Wasserdampf oberhalb $650 \text{ }^\circ\text{C}$ zu Wasserstoff und Kohlenmonoxid

Elektrochemische Arbeitsweise der SOFC



- Sauerstoff-Atom nimmt zwei Elektronen auf und wird Sauerstoff-Ion (Kathode)
- Sauerstoff-Ionen wandern durch Keramikschicht (Elektrolyt)
- Wasserstoff lagert sich an Sauerstoff-Ionen an (Anode)
- Abgabe beider Elektronen an die Anode
- Besonderheit SOFC: Verarbeitung von Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid



Quelle: Supcon