



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

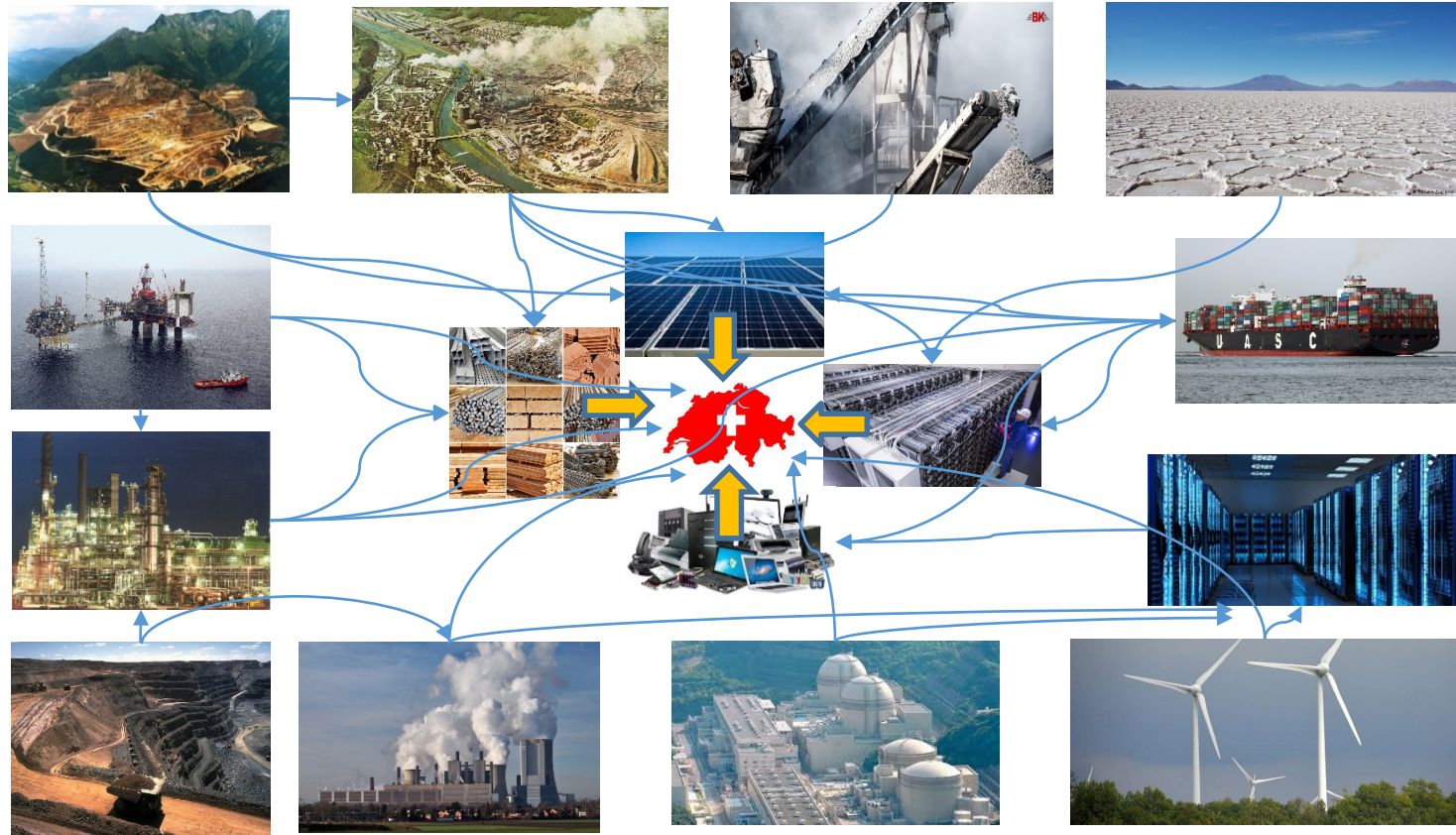
Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL
Sektion Umwelt

Fossilfreies Fliegen: Wunschtraum oder schon bald Realität?

Treibstoffe aus erneuerbaren Energien
ETH 30.1.2020, Theo Rindlisbacher



Massnahmenprüfung erfordert globale Sichtweise (Life Cycle Assessment)



Quellen: Kohlekraftwerk: Stodtmeister/Wikipedia/CC-BY 3.0, Lithium: Robert Sieland, Atomreaktor: Kyodo/Reuters, Erzberg: Steier, Eisenhütte: infowiss.net, Raffinerie: energie-lexikon, Frachtschiff: Umweltnetz-Schweiz, Windpark: pixabay.com/VIVIANE5276, Batteriespeicher: Jens Büttner, PV-Panel: energieheld.ch, Tanklastwagen: Jörg Altmann, Ölplattform: AFP, Kohleabbau: de.wikipedia.org CC BY 2.5, Betonherstellung: Forchenstein, Baumaterial: Europosters, IT-Geräte: npvisioin.de, Serverfarm: webhosting.info



Elektrische Passagier- und Frachtflugzeuge

- Emissionsfrei während des Fluges

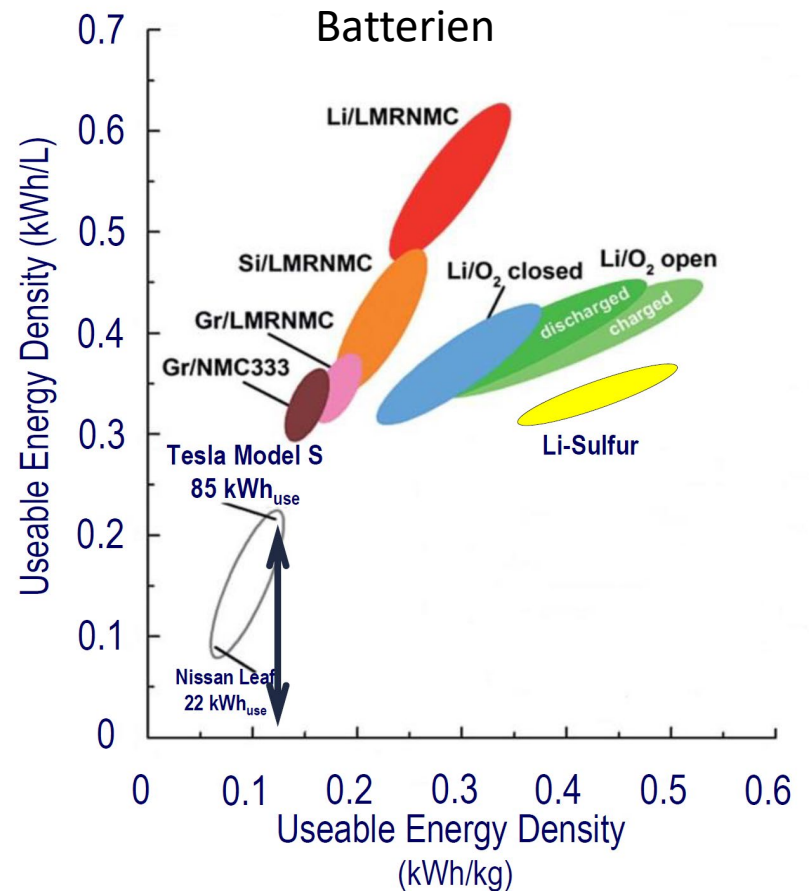
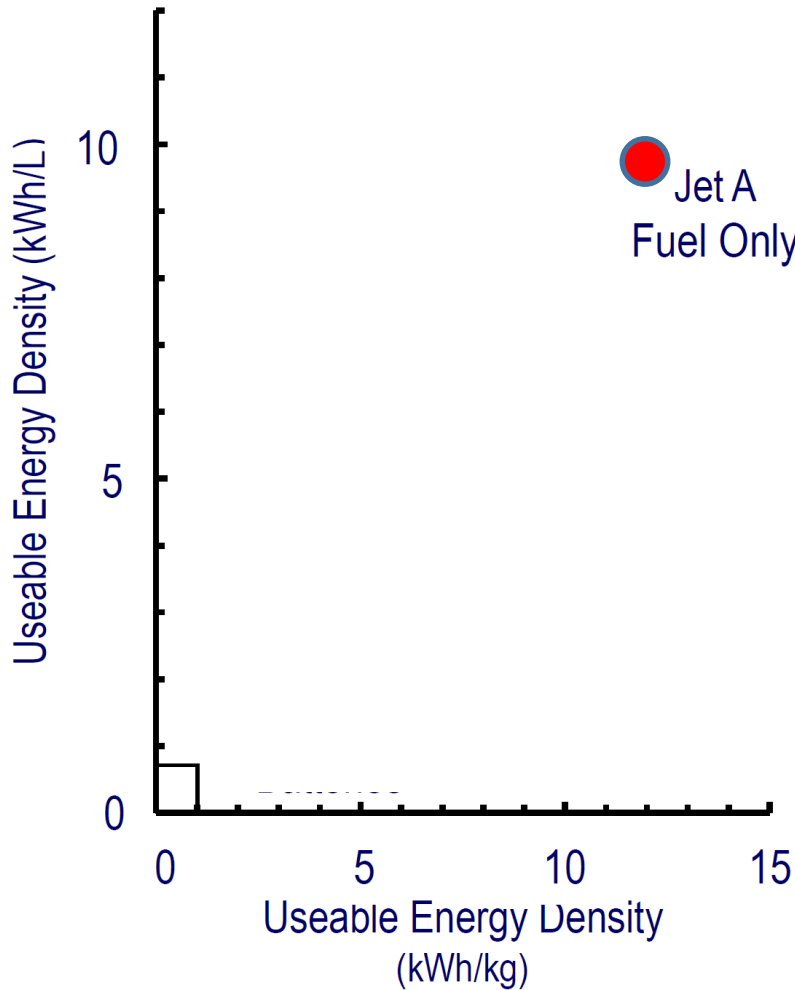


Die folgenden Elemente sind entscheidend für den Einsatz elektrischer Antriebsenergie in grossem Stil in der Luftfahrt:

- Gewicht und Volumen des Energiespeichers für einen Flug



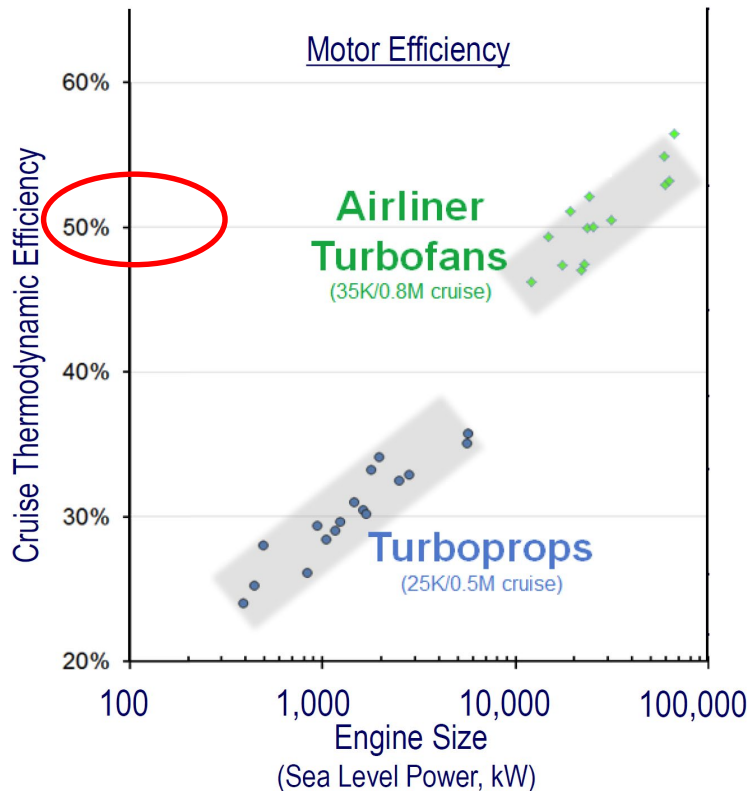
Die Energiedichte ist entscheidend



Grafiken: Pratt & Whitney



Wie viel hilft hoher elektrischer Wirkungsgrad?



Quelle: Pratt & Whitney

Der Wirkungsgrad bei der Umwandlung der Kerosinenergie in die Rotationsenergie der Fan-Antriebswelle beträgt bei einer grossen Flugzeugturbine heute über 50% (!)

Auch wenn der Wirkungsgrad eines Elektroantriebs bis zur Fan-Antriebswelle über 95% beträgt, so muss das Elektroflugzeug (bei Annahme gleicher Masse) immerhin etwa die Hälfte der Kerosinenergie in Batterien mitnehmen.



Gedankenexperiment Flug Zürich - Oslo

Konventionell:

- Airbus A320, 150 Personen + Fracht
- Verbrauch: 5.8 Tonnen Kerosin (69 MWh)
- **Abfluggewicht komplett ca. 65 Tonnen**



Rein elektrisch:

- Mindestens 35 MWh Verbrauch, **Annahme doppelte Energiedichte verglichen mit heute: Batteriegewicht 85 Tonnen**, kaum Nutzlast.
- 50 Aufladungen pro Tag = Stromverbrauch der Stadt Zürich + 20%
- Angenommen Schnell-Ladung möglich: Das Aufladen von 10 Flugzeugen gleichzeitig würde die Leistung eines AKW benötigen.
- Für die CO₂-Emissionen der Herstellung von 1 Satz Batterien könnte der konventionelle Airbus ca. 300 Mal Zürich – Oslo fliegen (Vergleich inklusive Gewinnung und Bereitstellung Kerosin)
- Lebensdauer der Batterien? → globale Umweltbelastung?



Elektrische Passagier- und Frachtflugzeuge

- Gewicht und Volumen des Energiespeichers für einen Flug



- Aufladezeit für die Batterien
- Lebensdauer der Batterien (Ausnutzung volle Kapazität, Anzahl Zyklen, bis Reichweite zurückgeht)
- Energieversorgung auf den Flughäfen
- Tatsächliche globale Reduktion von CO₂-Emissionen und übrige Umweltauswirkungen verglichen mit anderen Varianten



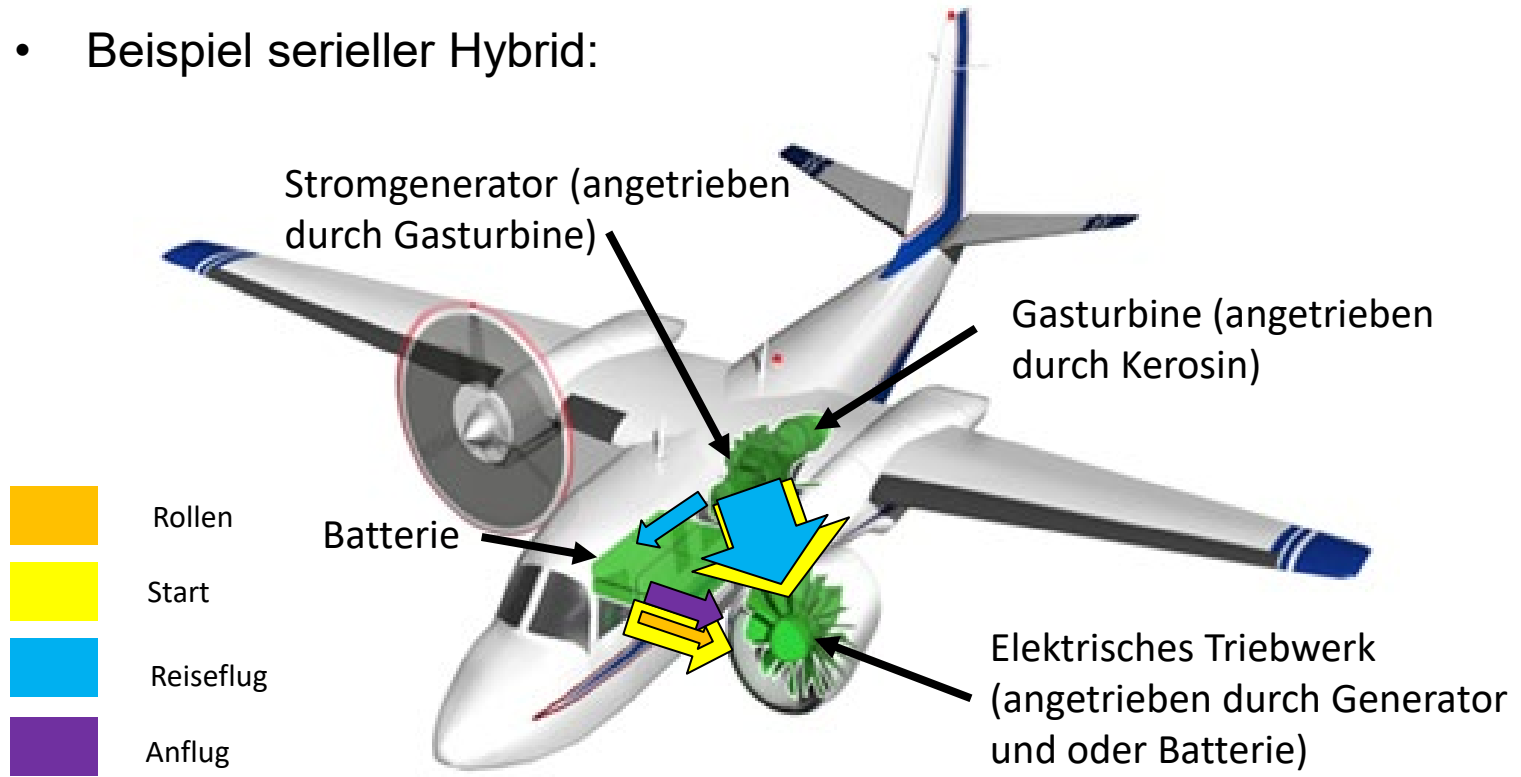


Hybridantrieb (Kerosin – Elektrisch)

- Energiequelle bzw. Energiespeicher: Nach wie vor Kerosin
- Gewisses Potenzial zur Emissions- und Lärmreduktion
- Batteriegewicht und hoher elektrischer Leistungsbedarf limitierend



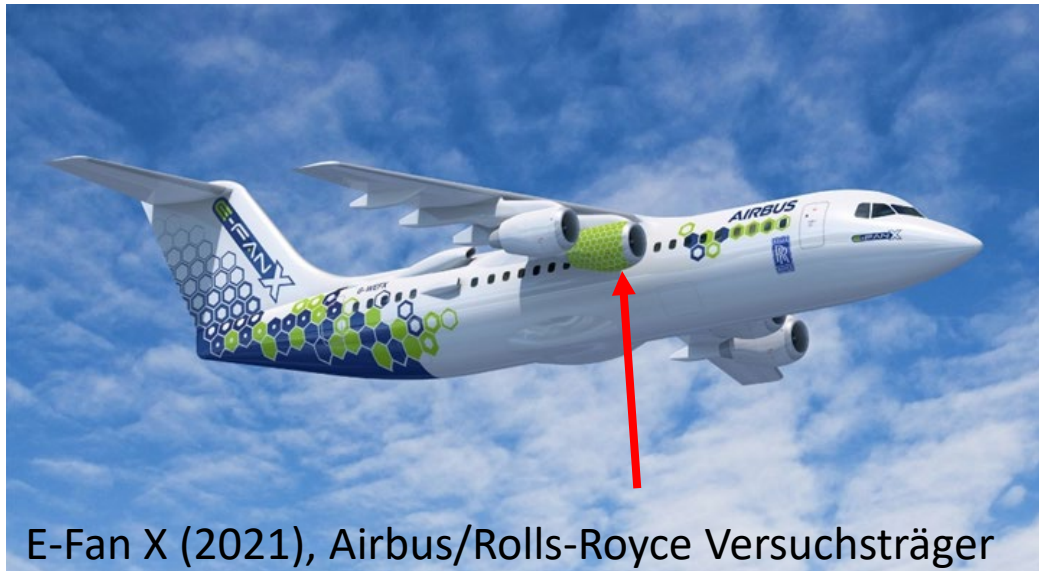
- Beispiel serieller Hybrid:





Beispiel E-Fan X (Kerosin – Elektrisch)

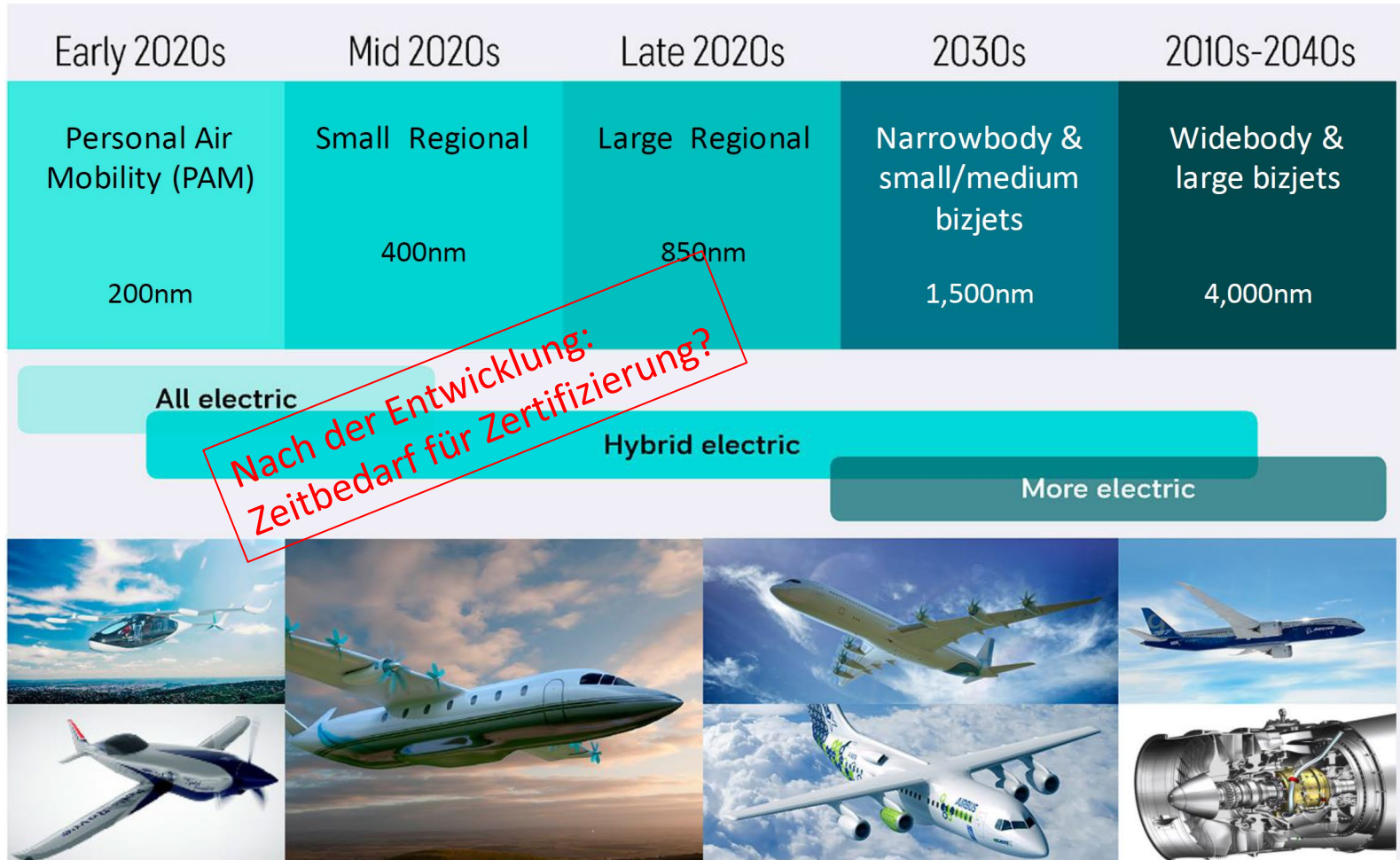
- Airbus und Rolls-Royce Projekt (Siemens ausgestiegen)
- Hybrid-Antriebsstrang mit 2 MW Leistung (ca. 6% der Leistung, welche z.B. ein Airbus A320 beim Start benötigt.)
- Eines der vier konventionellen Triebwerke eines BAE-146 wird durch ein elektrisches Triebwerk von 2 MW Leistung ersetzt.
- Der Erstflug ist für das Jahr 2021 geplant.



E-Fan X (2021), Airbus/Rolls-Royce Versuchsträger



Hybrid-Deklaration von Rolls-Royce



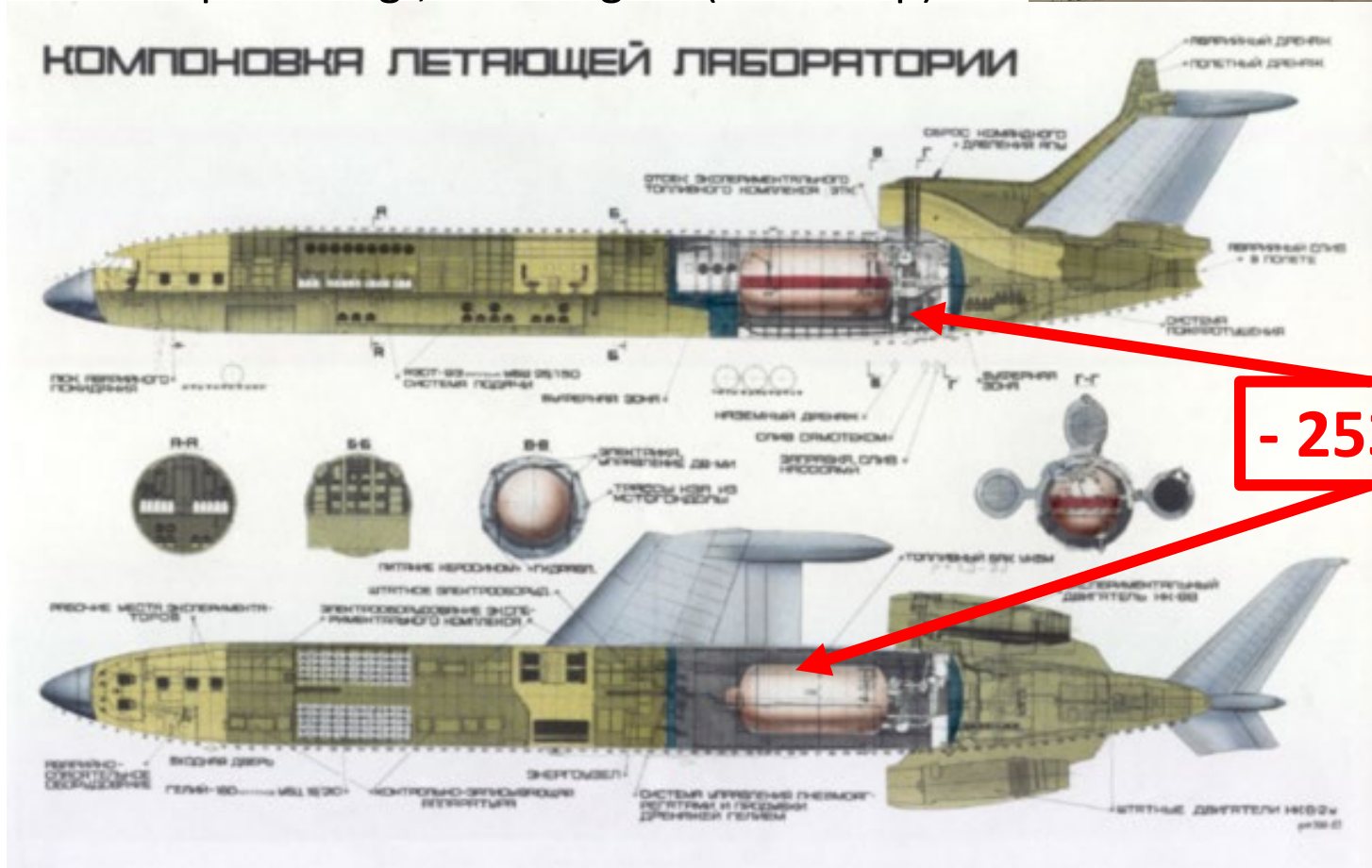
Quelle: Rolls-Royce



Wasserstoff?



1988: Tupolev zeigt, dass es geht (im Prinzip)



Quellen: Tupolev, BAZL, EU Luftfahrt-Projekte: Cryoplane (abgeschlossen) und ENABLEH2 (laufend), Bild TU-155 Juergen Schiffmann



Wasserstoff? (H₂)

- Bei der Verbrennung kein CO₂, direkt aus «Strom und Wasser»
- Pro kg drei Mal mehr Energie als Kerosin
- **Hauptproblem: Viel mehr Volumen als Kerosin:** In Autos geht Druckspeicherung (700 bar). Für Flugzeuge ist das Volumen bei Druckspeicherung noch zu gross. Wasserstoff muss flüssig mitgenommen werden, relativ leichte Tanks mit – 253°C (!) nötig



- Energiebedarf ca. 10% höher pro Flug (gleich schweres aber grösseres Flugzeug für selbe Anzahl Passagiere)
- Sehr energieaufwändige Bereitstellung (H₂ bei -253°C)
- Neuaufbau einer komplexen kryogenen Betankungsinfrastruktur nötig
- Tatsächliche globale Reduktion von CO₂-Emissionen und übrige Umweltauswirkungen verglichen mit anderen Varianten, e.g. 3 Mal mehr Wasserdampfemissionen auf Reiseflughöhe.





Zwischenhalt

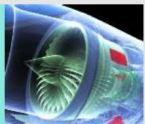

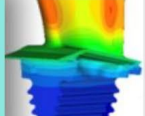
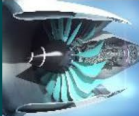
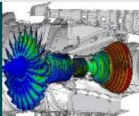
- Mittel- und Langstreckenflugzeuge (auch Neue) werden weiterhin grosse Gasturbinen benötigen
- Heute in Verkehr gesetzte Flugzeuge sind für Lebensdauern von 30 Jahren gebaut
- Die Flottendurchdringung mit neuen Flugzeugen erfolgt langsam
- Es dauert Jahrzehnte, bis neuartige Konzepte die Betriebssicherheit und Dauerhaftigkeit nachgewiesen haben und zum Flugbetrieb zugelassen werden können



Es braucht mindestens mittelfristig weiterhin Kerosin



Anstrengungen zur Weiterentwicklung von Gasturbinen sind offensichtlich

Architecture and design		Manufacture		Advanced materials		Intelligent systems		
Advance Core architectures		Advanced manufacturing research centres		Advanced alloys	TiAl		Future systems	
Lean burn / low emissions combustion		Additive Layer Manufacturing			Ni Alloys		Aerothermal excellence	
UltraFan (VHBR)		Specialist turbine manufacture		Ceramic Matrix Composites (CMCs)				
Virtual engine				Lightweight C(Ti) fan system				
Small engine core technologies								
Small engine fan								

Quelle: Rolls-Royce



Anstrengungen zur Weiterentwicklung von Gasturbinen sind offensichtlich



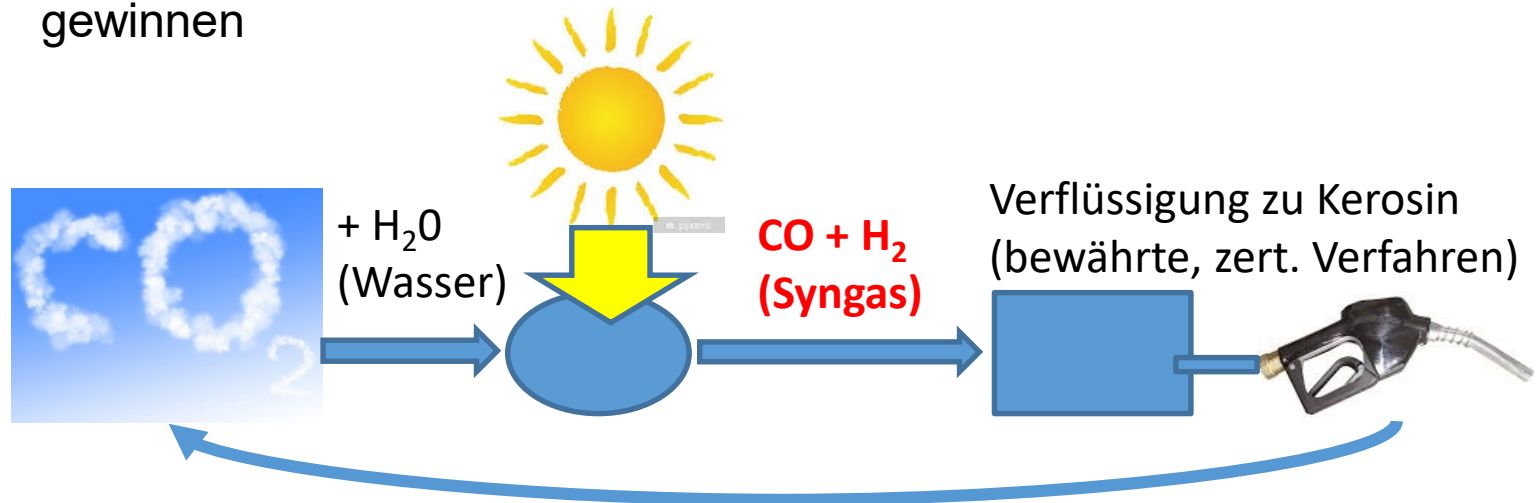
Quelle: Rolls-Royce



Was bleibt: Fossilfreies Kerosin

Wohl wirksamste Variante:

- Die Bausteine des Kerosins, Kohlenstoff und Wasserstoff, **aus der Atmosphäre gewinnen** → **CO₂-Neutralität**
- Prozessenergie möglichst ohne Umwege direkt aus den CO₂-ärmsten erneuerbaren Energiequellen (Wasserkraft, direkte Sonnenenergie) gewinnen





Sun-to-Liquid (StL)

Die Sonnenstrahlung wird mittels Spiegelfeld auf einen Reaktor gebündelt und erzeugt dort sehr hohe Temperaturen, um Wasser und CO₂ aus der Luft in Synthesegas umzuwandeln, welches dann durch bewährte Verfahren (Fischer-Tropsch) zu Kerosin verflüssigt wird.

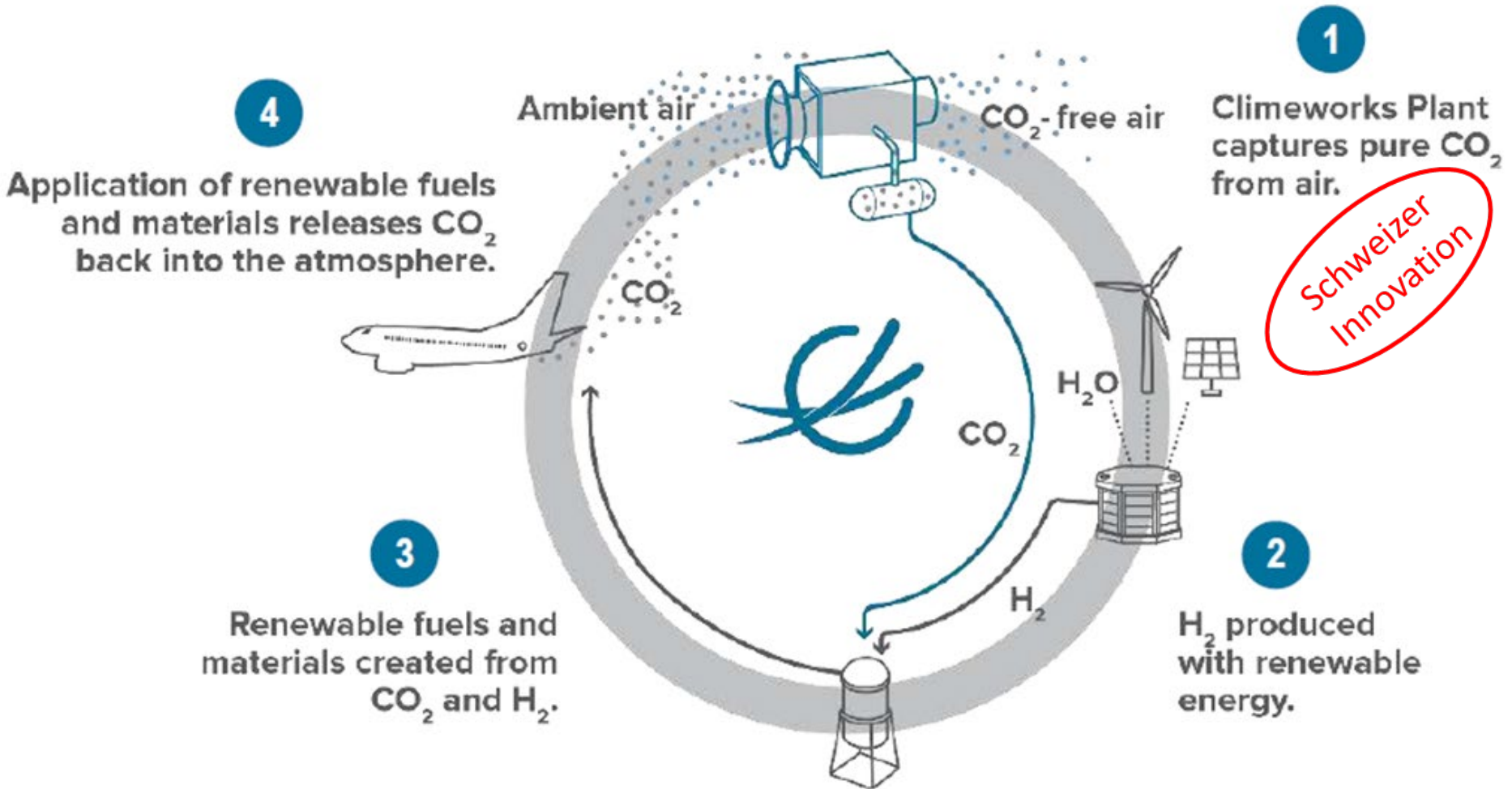


Schweizer
Innovation

Bild: StL-Demonstrator, Móstoles, Spanien (Photo: Christophe Ramage ©ARTTIC 2019)



Power-to-Liquid (PtL)





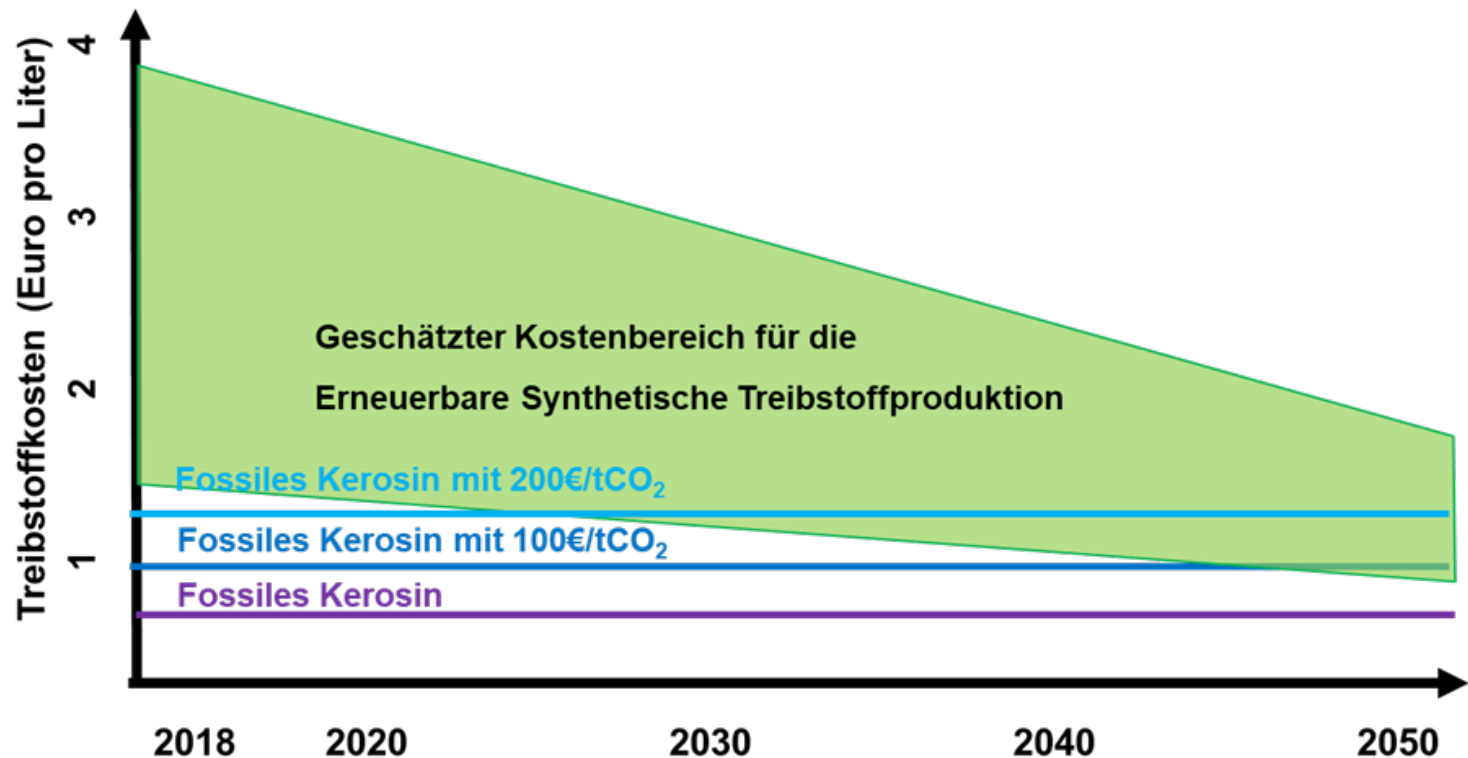
Die Vorteile von StL und PtL

1. Weitgehend CO₂-neutral (Aufwand Energiebereitstellung, Anlage?)
2. Bei StL direkte Nutzung der Sonnenwärme
3. Bei StL wird der Kohlen- und der Wasserstoff aus der Luft gewonnen. Somit können Produktionsanlagen auf unwirtschaftlichen Flächen aufgebaut werden.
4. Bei StL ist der Flächenbedarf für die Sonnenspiegel vergleichsweise gering, wenn die Produktion in sonnenreichen Gegenden stattfindet.
5. PtL hat bereits einen hohen Technology Readiness Level
7. Direkte synth. Kerosinverwendung in weltweiter Flotte schon möglich. (50% in «alten» Flugzeugen, 100% in zukünftigen Flugzeugen möglich)
8. Die weltweit für den Luftverkehr vorhandene Logistik- und Betankungsinfrastruktur kann uneingeschränkt genutzt werden.
9. Das Kerosin aus diesen beiden Verfahren ist frei von Schwefel und Aromaten. Positiv für lokale Luftqualität und Zusatznutzen Klima (Vermeidung von Kondensationskeimen für Wasserdampf).



Das Hauptproblem von PtL und StL: Kosten

Prognostizierte Preisentwicklungen von synthetischen und fossilem Kerosin



Quellen: BAZL, sowie AGORA: The future cost of electricity based synthetic fuels, PROGNOSES: Status and Perspectives of Liquid Energy Sources in the Energy Transition, Sowie: Climate Impact and Economic Feasibility of Solar Thermochemical Jet Fuel Production, C. Falter et al., *Environmental Science and Technology*, 50(1), pp 470 – 477, 2016



Vom Wunschtraum zur Realität: Fazit

1. Verstärkung der Forschungsanstrengungen zur Steigerung des Wirkungsgrades und neuer Materialien der beschriebenen PtL- und StL-Anlagen, um die Kosteneffizienz zu verbessern.
2. Förderung der Erstellung grösserer Anlagen, um PtL und StL konkurrenzfähiger zu machen.
3. Zwischenstaatliche Gespräche zur Findung geeigneter Produktionsstandorte und Vereinbarung fairer Randbedingungen.



Besten Dank für Ihre Aufmerksamkeit

