

AG Technologie UAG "Enabler"

Entwurf des Abschlusspapiers

Die Verpflichtung der Luftfahrtindustrie zum Erreichen der Klimaneutralität bedarf einer weitgehenden Transformation ihrer Produkte, des verwendeten Energieträgers, der Infrastruktur und Logistik sowie des regulatorischen Rahmens und politischen Anreize. Diese Umwälzungen bedingen einander und müssen daher auch in der zeitlichen Abfolge gut ineinandergreifen. Dabei verlangen die verschiedenen Anwendungen und Marktsegmente nach unterschiedlichen Lösungen. Darüber hinaus erfordert die Größenordnung der Herausforderung, sich nicht auf einzelne Maßnahmen oder Technologien zu beschränken, sondern viele Ansätze gleichzeitig und kombiniert zur Anwendung zu bringen.

Die drei wesentlichen Beiträge¹ der Luftfahrt zum Klimawandel müssen auf verschiedene Weise adressiert werden:

- CO₂ durch die Wahl des Energieträgers - SAF und grüner Wasserstoff aus regenerativer Energie
- Stickoxide durch die Antriebstechnologie, d.h. Brennkammeroptimierung oder alternativer thermodynamischer Prozess (bei Gasturbinen) oder Brennstoffzelle
- Langlebige Kondensstreifen durch Optimierung der Flugrouten zu ihrer Vermeidung und die Anwendung von SAF oder Wasserstoff

Darüber hinaus ist eine weitere Verbesserung der Energieeffizienz unabdingbar, da sowohl grüner SAF als auch grüner Wasserstoff auf absehbare Zeit knapp und teuer bleiben werden und ein Wasserstoff basiertes Antriebssystem bei gleicher Mission mehr Energie benötigt.

Größere Fortschritte werden nur möglich durch Neuentwicklungen oder umfassende Weiterentwicklungen bestehender Flugzeugprogramme. Dabei sind nicht alle technischen Optionen für jedes Marktsegment geeignet:

- So sind Wasserstoffantriebe mit Erzeugung elektrischer Energie durch Brennstoffzellen aufgrund der im Vergleich zu Gasturbinen heute noch geringen Leistungsdichte zumindest im nächsten Jahrzehnt auf kleinere Leistungen und damit Propellerflugzeuge mit begrenzter Passagierkapazität beschränkt.
- Wasserstoff als Brennstoff für Gasturbinen ist für übliche Geschwindigkeiten von Strahlflugzeugen geeignet und auch zu größeren Passagierkapazitäten skalierbar. Allerdings führen hohe Reichweitenziele durch die Integration der dann deutlich voluminöseren Wasserstofftanks zu entsprechendem Gewicht, zusätzlicher Oberfläche und damit höherem Energiebedarf
- Daher erscheint auf absehbare Zeit für Langstreckenflugzeuge SAF als einzig praktikabler Energieträger.

¹ CO₂ stellt nur einen Teil des Klima-Effektes der Luftfahrt dar (nach Lee et al etwa 48% kumuliert bis 2018). Die Problematik ist unterschiedlich - CO₂ reichert sich in der Atmosphäre an, und die Erreichung der Pariser Klimaziele ergibt daher anteilig ein endliches verbleibendes CO₂-Budget für die Luftfahrt. Im Vergleich dazu sind die Nicht-CO₂-Effekte (NO_x, Kondensstreifen, in geringerem Maße auch Wasser) kurzfristiger Natur. Dennoch geht die UAG "Enabler" davon aus, dass diese zügig reduziert werden müssen, um das erwartete temporäre Überschießen des 1.5-Grad-Ziels in den nächsten Jahren zu minimieren und so irreversible Effekte zu verhindern.

Der Betrieb Wasserstoff basierter Flugzeuge in der kommerziellen Luftfahrt ist grundsätzlich machbar. Um die Anforderungen an Sicherheit und Zuverlässigkeit zu garantieren, bedarf es allerdings noch weiterer technologischer Schritte, die zeitnah angegangen werden müssen. Gleichzeitig hängt der wirtschaftliche Betrieb bei den Fluggesellschaften von vielen Randbedingungen ab, wie beispielsweise der Verfügbarkeit von günstigem grünen Wasserstoff an den Flughäfen oder der Entwicklung des CO₂-Preises.

Zum Beginn eines Entwicklungsprogramms für ein neues Flugzeug müssen alle darin einfließenden Technologien den erforderlichen Reifegrad (TRL 6) erreicht haben. Um die Technologieentwicklung inhaltlich und zeitlich auf die Anforderungen auszurichten, ist es sinnvoll, von wahrscheinlichen Produktszenarien auszugehen. Diese dienen als Orientierung und stellen keine Produktstrategie eines Herstellers dar. Die UAG "Enabler" hält folgendes Makro-Szenario für vorstellbar:

- Neue, verbesserte Produkte werden im Vergleich zu anderen Branchen in der Luftfahrt deutlich seltener in den Markt eingeführt, zudem dauert es bis zum flächendeckenden Einsatz viele Jahre. Das aktuelle Jahrzehnt ist geprägt von der sukzessiven Erneuerung der Flotten mit Flugzeugen der neuesten Generation (Ersetzen von A320ceo, 737NG, A330ceo durch A320neo, 737 MAX, A330neo, A350 etc.). Allein hierdurch wird eine Kraftstoffeinsparung und damit CO₂-Reduktion von ca. 15% pro Passagier-km erreicht. Die Umstellung muss daher zügig fortgesetzt werden. Darüber hinaus ist der Erlös aus diesen Verkäufen unabdingbar für die Hersteller, um in neue Technologien und die Entwicklung neuer Produkte investieren zu können, ganz besonders vor dem Hintergrund der Transformation hin zur Klimaneutralität.
- Ab der ersten Hälfte der 2030er Jahre werden Neuentwicklungen oder umfangreichere Weiterentwicklungen erforderlich - einerseits, um dem Druck der Konkurrenz standzuhalten und andererseits, um die Verpflichtungen der Industrie zur Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen. Dafür werden hier folgende Produktszenarien berücksichtigt:
 - Ein Kurzstreckenflugzeug mit Wasserstoffantrieb, entweder elektrisch mit Brennstoffzelle oder Wasserstoff-Direktverbrennung/Dual Fuel oder hybrid-elektrisch, frühestens ab 2035.
 - Nachfolger der heute dominierenden Kurz-/Mittelstreckenmodelle A320 und 737, entweder für den Betrieb mit SAF und potenziell revolutionärer Gasturbine bei einer Indienststellung ca. 2035, oder alternativ mit Wasserstoff-Direktverbrennung, dann allerdings wesentlich später (frühestens 2040).
 - Größere Weiterentwicklungen der Langstreckenmodelle A330 / A350 bzw. 787 / 777, jeweils mit neuem Triebwerk und Verbesserungen der Tragflächen, für Betrieb mit SAF - ab ca. 2040.

Die CO₂-Emissionen kommen jeweils ca. zur Hälfte von der Kurz-/Mittelstreckenflotte und der Langstrecke; Kurzstreckenflugzeuge spielen mit ca. 5% nur eine untergeordnete Rolle. Ein Kurzstreckenflugzeug mit Wasserstoffantrieb leistet daher keinen großen Beitrag zum Erreichen der Klimaziele bis 2050, wird aber als unerlässlicher Schritt zur Demonstration der Machbarkeit im kommerziellen Rahmen und für den schrittweisen Aufbau der Wasserstoff-Logistik & Infrastruktur angesehen. Andernfalls wäre das unternehmerische Risiko für jeden Hersteller, die Nachfolge eines Volumenproduktes wie des A320 aus dem Stand mit einem Wasserstoff-Flugzeug anzugehen, viel zu groß.

Selbst bei optimistischen Annahmen für die Einführung wird die Wasserstofftechnologie keinen maßgeblichen Einfluss auf die Erreichung der Klimaneutralität bis 2050 haben können, sondern erreicht ihre Wirkung erst in der 2. Hälfte des Jahrhunderts. Um den Beitrag zur globalen Temperaturerhöhung der bestehenden und in den nächsten Jahren in Dienst zu stellenden Flotte zu minimieren sowie zum Antrieb größerer Flugzeuge (inkl. Neuentwicklungen) ist der massive Hochlauf der Produktion und des

Einsatzes von SAF, unabhängig von der Strategie zur Einführung von Wasserstoffantrieben, unerlässlich.

Für die Betrachtung der notwendigen Technologieentwicklungen schlägt die UAG "Enabler" neun sich ergänzende Technologieplattformen vor. Passagierkapazität und Reichweite sind für eine bessere Vergleichbarkeit jeweils an ein heutiges Referenzflugzeug angepasst, allerdings mit zwei Ausnahmen:

- Für das Kurzstreckenflugzeug mit Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb (1.) werden zwei Varianten untersucht. Die erste Variante, ein Neuentwurf, der die Missionsanforderungen des Referenzflugzeugs erfüllt und eine zweite Variante als Retrofit mit einer auf 250 NM reduzierten Reichweite
- Kurzstreckenflugzeuge mit 100 Passagieren und 1.000 NM Reichweite (3. und 4), für die es kein entsprechendes Referenzflugzeug gibt, die aber aktuell in der Industrie aktiv angedacht werden

Die Technologieplattformen sind:

1. Kurzstreckenflugzeug mit Wasserstoffantrieb durch Brennstoffzelle mit 740 NM bzw. 250 NM Reichweite
2. Kurzstreckenflugzeug mit Dual-Fuel-Antrieb (Wasserstoff / SAF)
3. Kurzstreckenflugzeug 100 pax/1.000 NM mit Wasserstoffantrieb durch Brennstoffzelle
4. Kurzstreckenflugzeug 100 pax/1.000 NM mit Wasserstoff-Direktverbrennung in einer Gasturbine²
5. Kurz-/Mittelstreckenflugzeug mit Wasserstoff-Direktverbrennung in einer Gasturbine
6. Kurz-/Mittelstreckenflugzeug mit revolutionärer Gasturbine und SAF-Nutzung
7. Langstreckenflugzeug mit evolutionärer SAF kompatibler Gasturbine (Referenz A350-900)
8. Langstreckenflugzeug mit evolutionärer SAF kompatibler Gasturbine und neuem Flügel (Referenz A350-900)
9. Langstreckenflugzeug mit revolutionärer SAF kompatibler Gasturbine und neuem Flügel (Referenz A350-900)

1. Kurzstreckenflugzeug mit Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb

Referenzflugzeug: ATR 72 (86 Passagiere / 740 NM / 250 NM Reichweite)

Grundgedanke: Erwartet wird nahezu Klimaneutralität in der Kurzstreckenflugzeugklasse. Vor allem aber dient die Anwendung einer Validierung wichtiger Technologieelemente und zur Einleitung eines schrittweisen Aufbaus einer Wasserstoffinfrastruktur, beides im Hinblick auf eine spätere Anwendung im eigentlichen Zielsegment der Kurz-/Mittelstrecke.

Die Auswertung der Flüge von Regionalverkehrsflugzeugen zeigt, dass Flugzeuge dieser Klasse hauptsächlich auf Strecken eingesetzt werden, die kürzer als 250 NM sind. Daher existieren zwei verschiedene Möglichkeiten, mit dem erhöhten Systemgewicht eines Brennstoffzellenantriebs umzugehen: in einem ersten Ansatz wird die Reichweite des konventionellen Referenzflugzeugs beibehalten (740 NM), was mit einer hohen Marktakzeptanz einhergeht. Um das zu erreichen, ist die Entwicklung eines komplett neuen Flugzeugs („Clean-sheet design“) erforderlich, was mit hohen Programm- und Stückkosten verbunden ist. Als zweite Möglichkeit wird die Adaption von bestehenden

² Der Begriff Gasturbine in diesem Dokument schließt verschiedene Propulsor-Konzepte ein, sowohl ummantelte Triebwerke wie auch Open-Rotor-Konzepte. Dabei erfordert der Open-Rotor eine spezifische Triebwerksintegration, entweder unter dem Flügel oder am Rumpfheck, auf die hier nicht näher eingegangen wird.

Flugzeugmustern („Retrofit“) gesehen, deren Reichweite bei deutlich geringeren Entwicklungs- und Stückkosten die typische Flugdistanz von 250 NM erreicht.

Technologiebedarf:

- Brennstoffzellen für Flugzeugantriebe werden im nächsten Jahrzehnt absehbar nur auf Basis von LT-PEM* möglich sein. Zur Nutzbarmachung in der Luftfahrt ist eine Erhöhung der Leistungsdichte durch verbesserte Performance der Brennstoffzellen-Stacks erforderlich.
- Steuerung und Monitoring des Antriebssystems
- Effiziente Hochleistungselektronik, Halbleiter- und Supraleitungstechnologie für multi-MW Anwendungen (> 1 kV, > 1 kA)
- Zuverlässigkeit aller Systemkomponenten (Pumpen, Ventile etc.) im Dauerbetrieb mit kryogenem Wasserstoff unter Flugbedingungen, um die Sicherheitsanforderungen ohne exzessive Redundanz zu ermöglichen (heutige Kryo-Pumpen für Ariane z.B. müssen nur wenige Minuten aushalten).
- Erhöhung der Leistungsdichten des gesamten Antriebsstrangs, bspw. E-Motor und Motorsteuerung
- Absicherung der Lebensdauer und Lebenszykluskosten für Brennstoffzellen-Stacks, Elektromotoren und weitere Kernkomponenten
- Performance des Luftsystems und der Kühlung
- Effiziente Integration des Kühlsystems / Wärmetauscher.
- Weitere Erhöhung der Speichereffizienz von LH₂ Brennstoffsystemen.
- Minimierung von Wasserstoff-Leckagen³ in der gesamten Kette.
- Integration der LH₂-Tanks im Rumpfheck unter Berücksichtigung der Zugänglichkeit / Austausch
- Lösungen für Crashworthiness / Particular Risks (z.B. Aufschlag von Reifen-/Fahrwerksteilen oder Propellerblättern auf LH₂-Tanks)
- Optimierte Struktur- und Systeminstallationskonzepte für „trockene“ Tragflächen (ohne integrale Kraftstofftanks)
- Hoch gestreckter Flügel (Details siehe separates Kapitel)
- Aerodynamisch optimierte Flugzeugzelle hoher Produktionsratenfähigkeit
- Hochauftriebssystem unter Berücksichtigung der Einschränkungen durch die neuartige Triebwerksintegration inkl. der beteiligten Systeme

Alle Elemente des Wasserstoffstranges vom Tank für Flüssigwasserstoff bis zur Brennstoffzelle müssen bis ca. 2028 den erforderlichen Reifegrad (TRL6) erreicht haben.

Allerdings bringt der Antrieb auf Basis der LT-PEM ein sehr hohes Flugzeuggewicht mit sich (nach heutigem Technologiestand ist das Flugzeugleergewicht ca. doppelt so hoch wie bei SAF betriebenen Gasturbinen). Während dieses Antriebskonzept nahezu klimaneutral betrieben wird, müssen Nachteile im Energieverbrauch akzeptiert werden. Neben höherem Gewicht durch geringere Energiedichten im Vergleich zur Gasturbine führt die Integration der Wärmetauscher zu erhöhtem Luftwiderstand.

³ Der Klima-Effekt von Wasserstoff-Emissionen ist noch ungenügend erforscht und sollte besser charakterisiert werden, insbesondere die Interaktion mit Methan.

* Low Temperature Proton-Exchange Membrane fuel cell (Niedrigtemperatur Polymerelektrolytbrennstoffzelle)

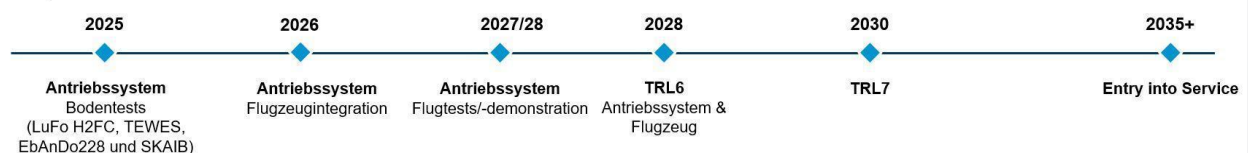
** High Temperature Proton-exchange membrane fuel cell (Hochtemperatur Polymerelektrolytbrennstoffzelle)

*** Solid Oxide Fuel Cell (Oxidkeramische-Brennstoffzelle)

Um der Brennstoffzellentechnologie zum Durchbruch in der Luftfahrt zu verhelfen, sind demnach weitere Entwicklungsschritte notwendig. Einen großen Anteil an der Gewichtsproblematik hat das erforderliche Kühlsystem der Brennstoffzellen. Eine höhere Temperaturdifferenz zur Umgebung erhöht die Effizienz der Kühlung; hierfür gibt es unterschiedliche Ansätze mit teilweise sehr unterschiedlichem TRL. Seit langer Zeit sind verschiedene Brennstoffzellentypen bekannt, wie beispielsweise HT-PEM** oder SOFC***. Beide Typen werden zwar bei höheren Temperaturen betrieben, haben aktuell aber an anderer Stelle deutliche Nachteile gegenüber LT-PEM. Daher ist eine weitere Optimierung der LT-PEM auf System, Sub-System und Equipment-Ebene entscheidend. HT-PEM könnten mit TRL6 ab 2040 eine wichtige Option darstellen, um Brennstoffzellenflugzeuge wirtschaftlich zu machen. Diese Technologie würde die Skalierbarkeit in das für die Klimawirkung entscheidende Marktsegment der A320-Familie deutlich erleichtern. Eine weitere technologische Alternative könnten SOFC darstellen, deren Potential derzeit schwer abzuschätzen ist und die, nach heutiger Einschätzung, nicht vor 2050 zur Verfügung stehen dürften. Weitere Einsparungen, wenn auch in deutlich geringerem Ausmaß, ergeben sich durch Verbesserungen der elektrischen Komponenten, insbesondere Supraleitung für die elektrische Verteilung und die Motoren.

Im folgenden Zeitplan sind die zu erreichenden technologischen Meilensteine dargestellt, mit denen eine Realisierung eines Flugzeugs mit Brennstoffzellenantrieb als möglich erachtet wird:

Zeitplan: Plattform ATR72 elektrisch mit LH2 Brennstoffzelle



2. Kurzstreckenflugzeug mit Dual-Fuel-Antrieb (Wasserstoff / SAF)

Referenzflugzeug: ATR 72 (86 Passagiere / 740 NM Reichweite)

Der Grundgedanke: Verkehrsflugzeuge sind verpflichtet Kraftstoffreserven mitzuführen, um bei Bedarf einen alternativen Flughafen erreichen zu können und dort anschließend einen 45-minütigen Flug in Warteschleife („Holding“) absolvieren zu können. Diese Anforderung führt bei Kurzstreckenflugzeugen zu signifikant höherem LH₂-Tankgewicht und -volumen, wenn ein rein Wasserstoff-Betriebenes Antriebssystem angewendet wird. Um dieses Problem zu lösen, wird bei dem Dual-Fuel-Konzept eine Gasturbine verwendet, die sowohl mit Wasserstoff als auch mit SAF betrieben werden kann. SAF wird dabei hauptsächlich als Reservekraftstoff verwendet und verbleibt die meiste Zeit in den integralen Flügeltanks welche kein zusätzliches Mehrgewicht oder Volumen benötigen. Für die eigentliche Transportmission wird hingegen Wasserstoff verwendet. Durch das geringere LH₂-Tankgewicht können mehr Passagiere transportiert werden und der Energiebedarf pro Passagier sinkt. Das Dual-Fuel-Konzept ermöglicht weitere Vorteile: es bietet die Möglichkeit, Wasserstoff als Energieträger allmählich in die Luftfahrt einführen zu können.

Ein Flugzeugentwurf, bei dem ein Großteil der Missionen über Wasserstoff abgedeckt werden kann, der aber auf SAF als zusätzlichen Brennstoff aus dem Flügel zurückgreifen kann um längere Missionen abzudecken, hat zudem mehrere Vorteile:

- Deutlich reduzierte Klimawirkung bei der Nutzung von Wasserstoff
- Geringeres Leergewicht des Flugzeugs durch kleinere LH₂-Tanks
- Bei längeren Überführungsflügen z.B. zu Wartungszwecken kann SAF verwendet werden, was die Akzeptanz durch Fluggesellschaften erhöht
- Größtmögliche operationelle Flexibilität, da auch Flughäfen ohne Wasserstoff-Infrastruktur angeflogen werden können

Das Konzept kann auch zur Validierung der Wasserstoffsystemtechnologie als Basis für die Skalierung in Kurz- u. Mittelstrecken Anwendungen dienen und den progressiven Aufbau der notwendigen Infrastruktur befördern.

Durch die unterschiedlichen Eigenschaften der Brennstoffe besteht eine Herausforderung der Dual Fuel-Technologie darin, eine Brennkammer zu entwickeln, die niedrige NO_x-Emissionen sowohl beim Betrieb mit Wasserstoff als auch beim Betrieb mit SAF erreicht.

Technologiebedarf:

- Gewichtsminimierte, hoch zuverlässige und Wasserstoff-Leckage freie LH₂-Tank und LH₂-Systemkomponenten
- Integration zweier unabhängiger Tank- und Kraftstoffsysteme im Flugzeug
- Anpassung einer Gasturbine an Verbrennung von Wasserstoff und SAF
- Entwicklung einer gemeinsamen schadstoffarmen Brennkammertechnologie für optimierte Emissionen bei SAF- und Wasserstoffbetrieb
- Sicherer Betrieb des Triebwerks in allen Flugphasen, insbesondere Umschalten zwischen SAF und Wasserstoff, Übergangszustände, Starten und Abschalten
- Die bisher mit Kerosin betriebenen hydraulischen Aggregate im Triebwerk (z.B. Leitschaufelverstellung) müssen elektrifiziert werden.
- Die Auslegung aller Hilfssysteme, um eine sichere Integration ins Flugzeug zu ermöglichen.
- Die Gewichtsreduktion der zusätzlichen bzw. substituierten Systeme, z.B. Tank und Brennkammer

Im folgenden Zeitplan sind die zu erreichenden technologischen Meilensteine dargestellt, mit denen eine Realisierung eines Flugzeugs mit Dual-Fuel-Antrieb als möglich erachtet wird:

Zeitplan: Plattform ATR72 Dual fuel GT (LH₂/SAF)



3. Kurzstreckenflugzeug 100 pax/1.000 NM mit Wasserstoffantrieb durch Brennstoffzelle

Das unter 1. beschriebene Konzept eines Brennstoffzellenflugzeuges ist in seiner Größe und Reichweite an die ATR72 angelehnt, um eine direkte Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Eine bessere Marktdurchdringung verspricht man sich von einem Flugzeug höherer Nutzlast mit mehr Reichweite. Ein Referenzpunkt für aktuelle Studien ist eine Kapazität von 100 Sitzen mit einer Reichweite von 1.000 NM. Diese Nutzlast-/Reichweiten-Fähigkeit lässt sich mit einem Brennstoffzellenantrieb entsprechend darstellen. Aktuell handelt es sich um ein Konzept eines Propellerflugzeuges mit entsprechend geringerer Geschwindigkeit. Andererseits ermöglicht diese Auslegungsreichweite auch, durch "Tankering" (Mitführen des Kraftstoffs für den Rückflug) auch kurze Strecken zu bedienen, bei denen der Zielflughafen noch nicht über eine Wasserstoff-Infrastruktur verfügt.

Die Beschreibung des Technologiebedarfs unter 1. behält bei diesem Konzept ihre Gültigkeit.

4. Kurzstreckenflugzeug 100 pax/1.000 NM mit Wasserstoff-Direktverbrennung in einer Gasturbine

Alternativ zur Brennstoffzelle kann der Wasserstoff auch direkt in einer Gasturbine konventioneller Architektur verbrannt werden, bei der im Wesentlichen die Brennkammer angepasst ist. Auch hier wird kryogener Wasserstoff in Drucktanks mitgeführt, allerdings gibt es Unterschiede in der Verteilung und Aufbereitung des Wasserstoffs - der höhere erforderliche Druck am Triebwerk bedingt die Zuführung von flüssigem/überkritischem anstelle von gasförmigem Wasserstoff.

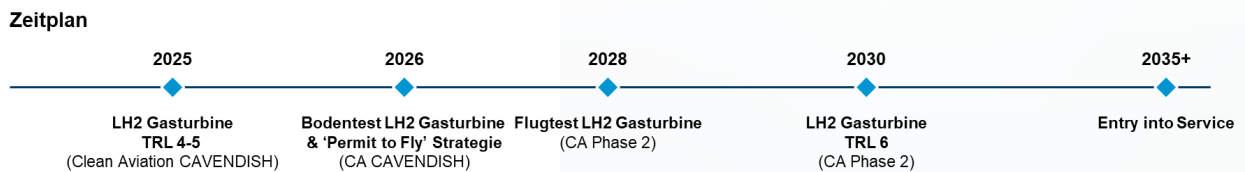
Grundgedanke: Geringe Klimawirkung durch:

- Vermeidung von CO₂-Emissionen
- Reduktion der Neigung zur Kondensstreifenbildung
- Potenzial für geringere NO_x-Emissionen
- Reduziertes technisches Risiko gegenüber der Brennstoffzelle durch Verwendung einer modifizierten konventionellen Gasturbine.

Technologiebedarf:

- Hoch gestreckter Flügel (Details siehe separates Kapitel)
- Aerodynamisch optimierte Flugzeugzelle hoher Produktionsratenfähigkeit
- Anpassung einer Gasturbine an Verbrennung von Wasserstoff
- Hochauftriebssystem unter Berücksichtigung der Einschränkungen durch die neuartige Triebwerksintegration inkl. der beteiligten Systeme
- Entwicklung neuartiger Kraftstoffversorgungssysteme für den Transport von kryogenem Wasserstoff zu den Triebwerken einschl. etwaiger Vorverdampfungssysteme
- Entwicklung zylindrischer, leichter Kryotanks mit guter thermischer Isolierung für die Speicherung von kryogenem Wasserstoff
- Integration dieser Kryotanks und der Kraftstoffversorgungssysteme im Rumpf
- Management des kryogenen Wasserstoffs während aller Flugphasen, einschließlich bodengebundener Warte- und Verzögerungsphasen
- Sicherstellung der Sicherheits-, Zuverlässigkeits- und Lebensdauernanforderungen aller Systemkomponenten für kryogenen Wasserstoff
- Minimierung von Wasserstoff-Verlusten in der gesamten Kette
- Die bisher mit Kerosin betriebenen hydraulischen Aggregate im Triebwerk (z.B. Leitschaufelverstellung) müssen elektrifiziert werden.
- Die Auslegung aller Hilfssysteme, um eine sichere Integration ins Flugzeug zu ermöglichen.

Im folgenden Zeitplan sind die zu erreichenden technologischen Meilensteine dargestellt, mit denen eine Realisierung eines Flugzeugs mit Wasserstoff-Direktverbrennung als möglich erachtet wird:



5. Kurz-/Mittelstreckenflugzeug mit Wasserstoff-Direktverbrennung in einer Gasturbine

Referenzflugzeug: A320neo (180 Passagiere / 2.700 NM Reichweite)

Die Wasserstoffverbrennung kann grundsätzlich in allen Größenklassen eingesetzt werden. Daher ist eine Anwendung, im Gegensatz zur Brennstoffzelle, auch im bedeutenden Marktsegment der Kurz-/Mittelstrecke möglich. Allerdings wird davon ausgegangen, dass aufgrund des unternehmerischen Risikos vor einer Einführung in diesem stark umkämpften Marktsegment eine erste Anwendung eines Wasserstoffantriebes an einem kleineren Produkt erforderlich ist, so dass eine Markteinführung erst 2040 realistisch erscheint

Technologiebedarf wie bei 4.

6. Kurz-/Mittelstreckenflugzeug mit revolutionärer Gasturbine und SAF-Nutzung

Referenzflugzeug: A320neo (180 Passagiere / 2.700 NM Reichweite)

Grundgedanke: Die Verwendung von Gasturbinen in Kombination mit SAF als Energieträger (später u.U. auch mit Wasserstoff) minimiert das technologische Risiko und ist darüber hinaus vermutlich die praktikabelste Lösung für größere Kapazitäten und Reichweiten. Eine mögliche Weiterentwicklung der evolutionären Gasturbine ist die Nutzung revolutionärer Kreisprozesse. Bei geeigneter Umsetzung könnten damit sowohl der Energieverbrauch als auch die Klimawirkung verringert werden. Derartige Konzepte nutzen die Restwärme im Abgas und führen diese in den Kreisprozess zurück. Dies kann neben dem Kraftstoffverbrauch auch die CO₂-Emissionen reduzieren. Stickoxide und Partikelemissionen können mit zusätzlichen Technologien, wie bspw. Dampfeinspritzung oder Partikelabscheidung reduziert werden. Partikel tragen zur Bildung von Kondensstreifen bei, eine Verringerung reduziert damit die hierdurch hervorgerufene Klimawirkung.

Evolutionäre und revolutionäre Gasturbinenkonzepte, in Kombination mit SAF, werden darüber hinaus auch bei Produktentwicklungen für die Langstrecke wichtig.

Technologiebedarf:

- Hoch gestreckter Flügel (Details siehe separates Kapitel)
- Aerodynamisch optimierte Flugzeugzelle hoher Produktionsratenfähigkeit
- Aerodynamische Integration eines wesentlich veränderten Triebwerks vor & unter den Tragflächen, in Verbindung mit einem geeigneten Pylonkonzept zur Gewichtsminimierung, oder Alternativen (z.B. Integration in die Tragflächen)
- Hochauftriebssystem unter Berücksichtigung der Einschränkungen durch die Triebwerksintegration
- Wärmetauscher zur Rückgewinnung der Abgaswärme und Verdampfung

Im folgenden Zeitplan sind die zu erreichenden technologischen Meilensteine dargestellt, mit denen eine Realisierung eines Kurz-/Mittelstreckenflugzeugs mit revolutionärer Gasturbine als möglich erachtet wird:



7. Langstreckenflugzeug mit evolutionärer SAF kompatibler Gasturbine (Referenz A350-900)

Die Langstreckenflotte hat mit ca. 45% einen erheblichen Anteil an den gesamten CO₂-Emissionen der Luftfahrt. Der Einsatz von Wasserstoff bei Langstreckenflugzeugen ist zwar nicht unmöglich, scheint aufgrund der Integration sehr voluminöser Drucktanks in den Rumpf aber nicht praktikabel. Daher erscheint SAF als der geeignetste grüne Energieträger in diesem Marktsegment. Aufgrund der absehbaren Knappheit und hohen Kosten grüner Energie sind weitere signifikante Effizienzsteigerungen erforderlich, um deren Verbrauch zu minimieren.

Ein erster Schritt könnte in einer Re-Motorisierung der modernsten existierenden Modelle bestehen, unter Weiterentwicklung heute bereits existierender Triebwerksarchitekturen und dabei insbesondere eines weiter erhöhten Nebenstromverhältnisses durch Einsatz eines Getriebes am Niederdruckverdichter (Fan).

Technologiebedarf:

- Integration der Triebwerke mit erhöhtem Nebenstromverhältnis

8. Langstreckenflugzeug mit evolutionärer SAF kompatibler Gasturbine und neuem Flügel (Referenz A350-900)

Signifikante Verbesserungen über das unter 7. beschriebene Konzept hinaus werden durch die zusätzliche Entwicklung eines hochgestreckten Flügels erreicht (Details siehe eigenes Kapitel). Eine Neuentwicklung des Flügels ermöglicht darüber hinaus die Optimierung der Installation der evolutionären Gasturbine mit ihrem stark erhöhten Durchmesser und einer veränderten Triebwerksaufhängung.

Technologiebedarf:

- Hoch gestreckter Flügel (Details siehe separates Kapitel)
- Aerodynamisch optimierte Flugzeugkonfiguration und Flugzeugzelle hoher Produktionsratenfähigkeit
- Integration der Triebwerke mit erhöhtem Nebenstromverhältnis
- Systemintegration aller Komponenten in das Flugzeug

9. Langstreckenflugzeug mit revolutionärer SAF kompatibler Gasturbine und neuem Flügel (Referenz A350-900)

Als ultimativer Schritt einer Weiterentwicklung existierender Flugzeugmodelle ist die Kombination eines hochgestreckten Flügels mit einer revolutionären Gasturbine denkbar. Der neue Flügel ist gleichzeitig die Voraussetzung für die erfolgreiche Integration der revolutionären Gasturbine mit ihrer stark veränderten Geometrie, Schwerpunktlage und einer entsprechenden Triebwerksaufhängung.

Technologiebedarf für die Langstreckenkonzepte 7. – 9.

Hoch gestreckter Flügel (siehe unten)

Integration der Triebwerke mit erhöhtem Nebenstromverhältnis

Integration der revolutionären Gasturbine siehe 6.

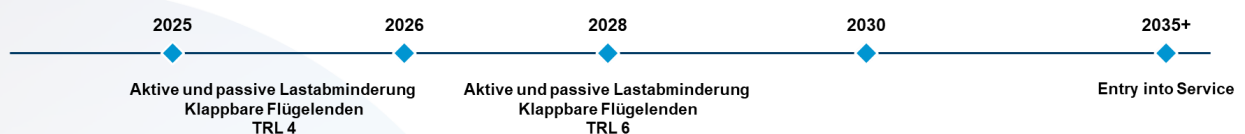
Weitere Schlüsseltechnologien, unabhängig vom Antriebssystem

Flügel großer Spannweite: Neben der Effizienz des Antriebes hat die Aerodynamik einen maßgeblichen Einfluss auf die Energieeffizienz des Flugzeuges. Allerdings hat der aerodynamische Standard bereits ein Niveau erreicht, auf dem nur noch kleinere Verbesserungen möglich sind. Ein großer Hebel besteht hingegen in der Erhöhung der Spannweite, wodurch der auftriebsabhängige Widerstandsanteil weiter reduziert werden kann. Dies ist vorteilhaft bis zu einem Punkt, an dem höhere Lasten und höheres Gewicht den Widerstandsvorteil kompensieren. Der Schlüssel zur erfolgreichen weiteren Erhöhung der Spannweite liegt daher in einem effektiven System zur Abminderung der höheren Lasten bei Manövern und Böen, um den Gewichtszuwachs zu vermeiden. Dieses Konzept ist insbesondere auch auf Entwicklungen für die Langstrecke anzuwenden.

Technologiebedarf:

- Aktive Lastabminderung durch effektive Erkennung von Böen und Turbulenzen auf der Flugbahn vor dem Flugzeug und sehr schnelle Aktuatoren geringer Baugröße
- Passive Lastabminderung u.a. durch unkonventionelle Lamine im Faserverbund für eine optimierte Steifigkeitsverteilung
- Multi-funktionale Steuerelemente, auch zur Anpassung der Flugzeuggeometrie an aerodynamisch nicht optimale Flughöhen (klima-optimierte Trajektorien⁴)
- Klappbare Flügelenden, evtl. mit Steuerflächen und Mitteln zur Kontrolle des Strömungsabrisses
- System zur Flatterkontrolle und Flugsteuerung bei höherer Flexibilität des Flügels
- Konzepte zur Triebwerksaufhängung in hochbelasteten Strukturen
- Fahrwerkskonzepte zur längsweisen Entkopplung der Position des Hauptfahrwerkes und des Auftriebsmittelpunkts des Flügels, z.B. durch Anbindung am Rumpf
- Systemminiaturisierung von hydraulischen, hydromechanischen, piezo-elektronischen oder elektromechanischen Systemkomponenten für effiziente und kompaktere Systemlösungen, lokale Energiespeicherung und Energieverwaltung für wichtige Systemtechnologien, fortschrittliche optische Sensorlösungen

Zeitplan



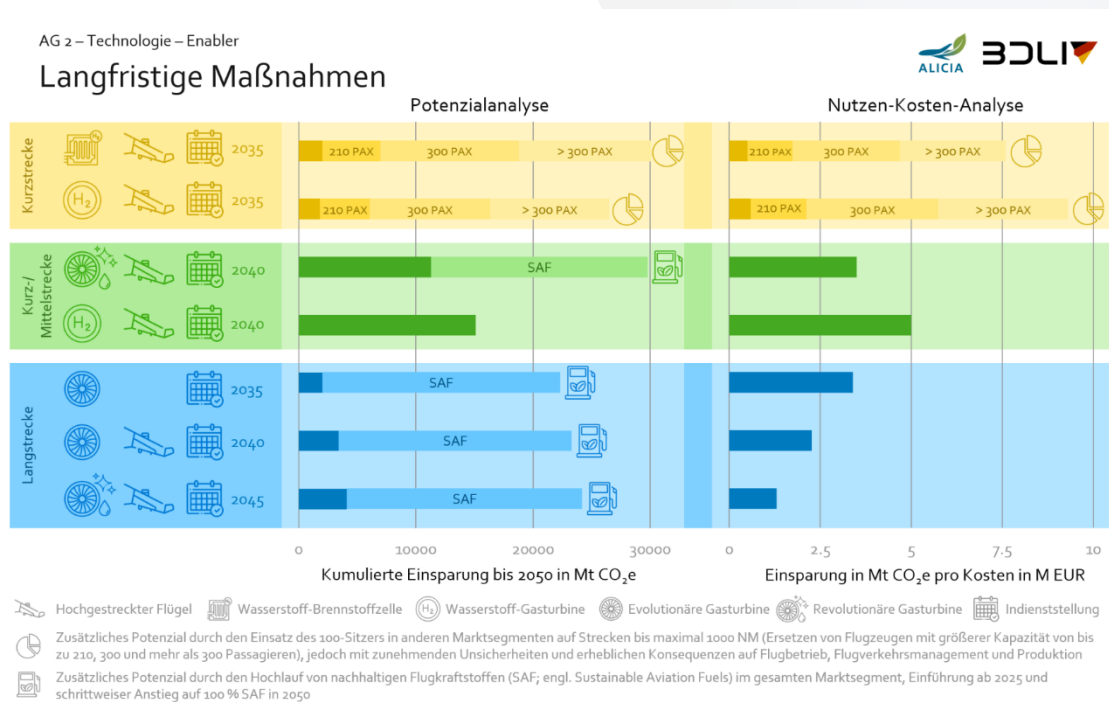
⁴ Klima-optimierte Trajektorien zur Vermeidung von Cirrus-Bewölkung (induziert durch Kondensstreifen) sollten pragmatisch eingeführt werden, ohne auf letzte Genauigkeit der Atmosphärenmodelle zu warten.

Berechnung der Klimawirkung mit Nutzen/Kosten-Analyse

Alle neun beschriebenen Konzepte wurden bzgl. ihrer zu erwartenden Klimawirkung (Einsparpotenzial in Megatonnen CO₂-Äquivalente) mit dem DLR Tool ALICIA⁵ bewertet und einer Nutzen/Kosten-Analyse unterworfen. Aufgrund der Indienststellung neuer Flugzeuge in den 2030-2040er Jahren erfolgt die Auswertung für die Jahre 2050 - 2060. Es ist zu beachten, dass einige dieser Maßnahmen ihr volles Potenzial erst nach 2060 entfalten können.

Für die ersten beiden Konzepte ergeben sich nur relativ geringe Einsparpotenziale, da der Anteil an Verkehrsleistung und Emissionen heute und in 2050 relativ gering ist bzw. sein wird. Daher sind hierzu keine quantitativen Ergebnisse dargestellt. Allerdings ist die Entwicklung und Validierung der entsprechenden Technologien trotzdem wichtig, da diese aufgrund der geringen Flugzeuggröße relativ preiswert ist und zum großen Teil auf größere Kurzstreckenflugzeuge (100 pax/1.000 NM Reichweite) skalierbar ist. Darüber hinaus ist mit diesen Konzepten ein schrittweiser Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur möglich.

Das folgende Bild zeigt das kumulative Einsparpotenzial in Megatonnen CO₂-Äquivalente für die übrigen sieben Konzepte sowie die Ergebnisse der entsprechenden Nutzen/Kosten-Analyse, die in Anlage 2 detailliert dargestellt ist.



⁵ ALICIA ist ein Bewertungstool für das gesamte (weltweite) Lufttransportsystem. Dadurch ergeben sich aus den Darstellungen/Ergebnissen Hinweise und Ableitungen, wie das zukünftige Luftverkehrssystem aussehen kann, bzw. welche Randbedingungen und Einflussgrößen berücksichtigt werden müssen, inkl. politischer Maßnahmen. ALICIA fußt auf neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen und erlaubt, die kurz-, mittel- und langfristigen Klimawirkungsreduktionspotenziale neuer Technologien, des Einsatzes von SAF/PtL sowie neuartiger Flugrouten mit Blick auf die CO₂- Emissionen und die Non CO₂-Effekte nachvollziehbar zu quantifizieren.

Handlungsempfehlungen

1. Förderung der erforderlichen Technologiebausteine, die noch nicht in laufenden Programmen adressiert sind

Die Technologiebedarfe für die neun beschriebenen Konzepte sowie für den hoch gestreckten Flügel sind oben genannt. In Anlage 1 ist dargestellt, welche dieser Bedarfe bereits in laufenden Forschungsprogrammen adressiert werden, wobei zu beachten ist, dass diese mit unterschiedlichen Intensitäten stattfinden bzw. die entsprechenden derzeitigen Investitionen nicht ausreichen, insbesondere bzgl. der Bereitstellung von Test- und Validierungsplattformen (siehe 2.). Aus Anlage 1 ergibt sich auch, dass die Technologiebedarfe bzgl. des Aufbaus einer Infrastruktur für Wasserstoff in der Luftfahrt noch überhaupt nicht adressiert werden (siehe 3.).

2. Bereitstellung von Test- und Validierungsplattformen für die untersuchten Konzepte

- Investition in den Aufbau und Betrieb von Prüfständen zur beschleunigten Entwicklung und Validierung der benötigten Schlüsseltechnologien
- Flugerprobungsplattformen für Systemerprobung bis TRL 6 in den erforderlichen Leistungsklassen
- Investition in notwendige Fertigungstechnologien und Pilotproduktionsanlagen für luftfahrttaugliche Brennstoffzellen, H₂-Kryogentanks, H₂-Systemkomponenten, Hochleistungselektronik, Mikrosystemtechnik und Stromspeichermedien.
- Schon die aktuellen Forschungs- und Vorentwicklungsphasen benötigen geeignete Einrichtungen zur Entwicklung der notwendigen Technologiebausteine für Subsysteme und Ausrüstung, z. B. Ausbau von Prüfstands- und Windkanalkapazitäten für Flugzeug- und Antriebsentwicklung, sowie der Komponentenintegration
- Wasserstofftauglicher Höhenprüfstand für Triebwerke
- Erhalt des Kryo-Windkanals (ETW)

3. Aufbau einer Infrastruktur für Wasserstoff in der Luftfahrt

Die tatsächliche Entwicklung von Flugzeugprojekten auf Wasserstoffbasis und der Aufbau der gesamten Logistikkette für Produktion, Lieferung, Speicherung und Verteilung von flüssigem Wasserstoff am Flughafen bedingen einander. Daher müssen wichtige Entscheidungspunkte koordiniert werden, um Fehlinvestitionen zu vermeiden.

Die notwendigen Infrastrukturkonzepte müssen zügig erarbeitet werden, insbesondere Standorte der Wasserstoffproduktion, Transportwege zum Flughafen (Lkw oder Pipeline), lokale Verflüssigungsanlagen und Speicher am Flughafen, Transport von Flüssigwasserstoff zum Flugzeug. Dabei ist die Zahl der Umwandlungsschritte zu minimieren.

Für die Abfertigung des Flugzeuges sind geeignete Be- und Enttankungs-, Inertisierungs-, Überwachungs- und Sicherheitskonzepte in Kooperation mit Flughafen, Behörden, Fluggesellschaften und Herstellern zu erarbeiten und in internationalen Standards zu verankern. All dies braucht Zeit und sollte daher zügig vorangetrieben werden.

Darüber hinaus muss die aktuelle Knappheit selbst an grauem Wasserstoff zur Durchführung von Tests beseitigt werden.

Empfehlung: Enge Abstimmung auf nationaler und internationaler Ebene zwischen Flugzeug- und Komponentenherstellern mit Flughäfen, Energieunternehmen und der Politik zur zeitlichen und inhaltlichen Koordinierung des Aufbaus einer geeigneten Wasserstoffinfrastruktur.

Handlungsbedarf

Entscheidungsgrundlagen auf Basis von Erfahrungen aus Pilotanlagen für:

(L)H₂ Produktion/ Lieferung

- Aufbau dezentraler grüner GH₂ Produktion mit Solar- und Elektrolyseurkapazitäten
- Lieferung LKW LH₂ vs. Pipeline für GH₂ und lokale Verflüssiger am Flughafen

LH₂ Speicherung

- Tankanlagenkonzept mit Verflüssiger, Ober-/ Untergrundspeicher und Verteilnetz
- Last mile Anlieferung LH₂ bis A/C: Trailer vs. Pipeline

LH₂ Handling am A/C

- Mobile Serviceeinheiten für Betankung, Enttankung, Inertisierung, Überwachung
- Sicherheitskonzept für A/C Betankungsvorgänge

Im folgenden Zeitplan sind die zu erreichenden Meilensteine dargestellt, mit denen eine Umsetzung einer Wasserstoff-Infrastruktur in der Luftfahrt als möglich erachtet wird:

Zeitplan: Wasserstoff Infrastruktur (zusätzlich zu UPLIFT)



4. Flexibilisierung der Verfahren für Flugdemonstration und Zulassung

Wir stehen vor der größten Transformation unserer Industrie, mit fundamental anderen Technologien und Auswirkungen auf den Flugbetrieb und die Wartung. Für deren Zulassung brauchen wir die aktive Unterstützung der EASA.

Wichtig ist insbesondere die zeitgerechte Weiterentwicklung des Regelwerkes und der Nachweismethoden im Hinblick auf disruptive Technologien, wie sie z.B. im Clean Aviation-Projekt CONCERTO und in der Initiative AZEA (Association for Zero-Emission Aviation) der EU untersucht werden. Darüber hinaus bedarf es einer Bereitschaft, neue Lösungen mit technischem Urteilsvermögen zu bewerten. Wenngleich das heutige hohe Sicherheitsniveau nicht in Frage gestellt werden darf, so ergibt sich doch aus der Vielzahl der Neuerungen, dass sich manche Erfahrungen erst im Betrieb ergeben werden und zu einer Verfeinerung der Vorschriften führen werden. Eine zu enge Auslegung des vorhandenen rechtlichen Regelwerkes kann sich gerade bei der Einführung neuer Technologien als Hemmschuh erweisen. Ein legalistischer Ansatz seitens der Behörden oder der Versuch, Lösungen vorzuschreiben, erleichtern die Aufgabe nicht.

Die Industrie hat die Befürchtung, dass die heutigen Zulassungsverfahren der technologischen Revolution im Wege stehen. Die Transformation der Luftfahrtindustrie muss also begleitet werden von einer Transformation der EASA, mit einer Weiterentwicklung der Fachkompetenzen bzgl. der neuen Technologien und der Zulassungsverfahren (mehr anforderungsorientiert, weniger vorschreibend).

Empfehlung: Die Bundesregierung sollte, in Abstimmung mit Frankreich, gegenüber dem neuen Exekutivdirektor der EASA klare Erwartungen hinsichtlich einer Anpassung der EASA, die dem technologischen Wandel gerecht wird, zum Ausdruck bringen. Es muss sichergestellt werden, dass mit den existierenden und neuen Vorschriften auch neue Technologien mit einem vertretbaren Nachweisaufwand eingeführt werden können, ohne den aktuellen Sicherheitsstandard abzusenken. Die Anforderungen an Demonstrationsflüge in Deutschland, analog zu denen im Ausland, müssen angepasst werden, um neue Konzepte mit überschaubarem finanziellen Aufwand erproben zu können.

5. Förderung von hochratenfähigen Fertigungstechnologien und Lieferketten

Um eine notwendige Marktdurchdringung zu schaffen, muss innerhalb kurzer Zeit ein Produktionsraten-Hochlauf erfolgen, der bei aktuellen Referenzflugzeugen über Dekaden gewachsen ist. Dies bedingt die technologische Reife von hochratenfähigen und wirtschaftlichen Fertigungstechnologien, Logistikketten und optimierten nachhaltigen Flugzeugstrukturen und -systemen hoher Zuverlässigkeit gleich zu Markteintritt. Um dies zu ermöglichen, ist es wichtig, die Entwicklungen von Automatisierungstechnologien, Robotikanwendungen, digitalen Fertigungsmethoden und virtuellen Zulassungsmethoden stark voranzutreiben. Zudem muss an industriell realisierbaren Ansätzen zur Minimierung des Rumpfwiderstands, Integrationsaspekten der neuartigen Triebwerke (Lärm, Aerodynamik) und System- und Stromspeicherlösungen (z. B. Batterien, Mikrosystemlösungen) zur Energieoptimierung an Bord gearbeitet werden.

Die produktspezifische und fertigungsspezifische Technologieentwicklung sollte weiterhin als ein starker Fokus im bestehenden LuFo-Programm unterstützt werden. Zudem benötigt es eine zusätzliche Unterstützung für risikoreduzierende Technologien im Bereich Robotik und virtuelle Zulassungsmethoden. Speziell ist es auch wichtig, in den zuletzt genannten Bereichen stark in die Nachwuchs- und Fachkräfteentwicklung zu investieren und es sollte ein spezifisches Programm zur Kompetenzentwicklung und -erhaltung in Deutschland angegangen werden.

Die Entwicklung neuer Antriebstechnologien umfasst auch die Entwicklung von neuen luftfahrttauglichen, wirtschaftlichen und hochratenfähigen Fertigungstechnologien und Lieferketten, insbesondere für:

- Brennstoffzellen-Stacks (Bipolarplatten, Dichtungen)
- Flüssigwasserstofftanks (Füllstandsmessung, Isolierung, Struktur, Anti-Sloshing Strukturen, Materialien)
- Wärmetauscher
- Flüssigwasserstoff-Versorgungssystem (Pumpen, Ventile, Wärmetauscher, Sensoren, Leitungen, Dichtungen, Isolierungen, Materialien)
- Hochleistungshalbleiter und Hochleistungselektronik für den Multi-Megawatt Bereich

Anlage 1: Technologiebedarfe und entsprechende Forschungsprogramme

	LuFo	CORAC	ATI	EU	Andere
Kurzstreckenflugzeug (bis 100 pax) mit Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb	x			x	
Leistungsdichte Brennstoffzellen	x			X	
Steuerung und Monitoring des Antriebssystems	x				
Effiziente Hochleistungselektronik, Halbleiter- und Supraleitungstechnologie für multi-MW Anwendungen (>1kV, >1kA)	x				
Zuverlässigkeit aller Systemkomponenten (Pumpen, Ventile etc.) im Dauerbetrieb mit kryogenem Wasserstoff unter Flugbedingungen	x	x	x		
Erhöhung der Leistungsdichten des gesamten Antriebsstrangs, bspw. E-Motor und Motorsteuerung					
Absicherung der Lebensdauer und Lebenszykluskosten für Brennstoffzellen-Stacks, Elektromotoren und weitere Kernkomponenten					
Performance des Luftsystems und der Kühlung	x				
Effiziente Integration des Kühlsystems / Wärmetauscher	x				
Weitere Erhöhung der Speichereffizienz von LH2 Brennstoffsystemen	x	x	x	x	
Minimierung von Wasserstoff-Leckagen in der gesamten Kette	x				
Integration der LH2-Tanks im Rumpfheck unter Berücksichtigung der Zugänglichkeit / Austausch	x				
Lösungen für Crashworthiness / Particular Risks (z.B. Aufschlag von Reifen-/Fahrwerksteilen oder Propellerblättern auf LH2-Tanks)			x		
Optimierte Struktur- und Systeminstallationskonzepte für "trockene" Tragflächen (ohne integrale Kraftstofftanks)			x		x
Hoch gestreckter Flügel: siehe unten (Flügel großer Spannweite)					
Aerodynamisch optimierte Flugzeugzelle hoher Produktionsratenfähigkeit					
Hochauftriebsystem unter Berücksichtigung der Einschränkungen durch die neuartige Triebwerksintegration inkl. der beteiligten Systeme					
Kurzstreckenflugzeug mit Dual-Fuel-Antrieb (Wasserstoff / SAF)					
Gewichtsminierte, hoch zuverlässige und Wasserstoff-Leckage freie LH2-Tank und LH2-Systemkomponenten	x			x	
Integration zweier unabhängiger Tank- und Kraftstoffsysteme im Flugzeug					
Anpassung einer Gasturbine an Verbrennung von Wasserstoff und SAF				X	
Entwicklung einer gemeinsamen schadstoffarmen Brennkammertechnologie für opt. Emissionen bei SAF- und Wasserstoffbetrieb	X			X	
Sicherer Betrieb des Triebwerks in allen Flugphasen, insbesondere Umschalten zwischen SAF und Wasserstoff, Übergangszustände, Starten und Abschalten					
Die bisher mit Kerosin betriebenen hydraulischen Aggregate im Triebwerk (z.B. Leitschaukelverstellung) müssen elektrifiziert werden				X	
Die Auslegung aller Hilfsysteme, um eine sichere Integration ins Flugzeug zu ermöglichen					
Die Gewichtsreduktion der zusätzlichen bzw. substituierten Systeme, z.B. Tank und Brennkammer					
Kurzstreckenflugzeug (bis 100 pax) und Kurz-/Mittelstreckenflugzeug mit Wasserstoff-Direktverbrennung in einer Gasturbine					
Hoch gestreckter Flügel: siehe unten (Flügel großer Spannweite)					
Aerodynamisch optimierte Flugzeugzelle hoher Produktionsratenfähigkeit					
Anpassung einer Gasturbine an Verbrennung von Wasserstoff	x	x	X	X	
Hochauftriebsystem unter Berücksichtigung der Einschränkungen durch die neuartige Triebwerksintegration inkl. der beteiligten Systeme					
Entwicklung neuartiger Kraftstoffversorgungssysteme für den Transport von kryogenem Wasserstoff zu den Triebwerken einschl. etwaiger Vorverdampfungssysteme	x	x	X		
Entwicklung zylindrischer, leichter Kryotanks mit guter thermischer Isolierung für die Speicherung von kryogenem Wasserstoff	x	x			
Integration dieser Kryotanks und der Kraftstoffversorgungssysteme im Rumpf	x	x			
Management des kryogenen Wasserstoffs während aller Flugphasen, einschließlich bodengebundener Warte- und Verzögerungsphasen	x	x	x	x	
Sicherstellung der Sicherheits-, Zuverlässigkeits- und Lebensdaueranforderungen aller Systemkomponenten für kryogenen Wasserstoff	x	x	x	x	
Minimierung von Wasserstoff-Verlusten in der gesamten Kette	x	x	x	x	
Die bisher mit Kerosin betriebenen hydraulischen Aggregate im Triebwerk (z.B. Leitschaukelverstellung) müssen elektrifiziert werden				X	
Die Auslegung aller Hilfsysteme, um eine sichere Integration ins Flugzeug zu ermöglichen	x	x	x	x	
Kurz-/Mittelstreckenflugzeug und Langstreckenflugzeug mit revolutionärer Gasturbine und SAF-Nutzung					
Hoch gestreckter Flügel: siehe unten (Flügel großer Spannweite)					
Aerodynamisch optimierte Flugzeugzelle hoher Produktionsratenfähigkeit	x	x		x	
Aerodynamische Integration eines wesentlich veränderten Triebwerks vor & unter den Tragflächen, in Verbindung mit einem geeigneten Pylonkonzept zur Gewichtsminderung, oder Alternativen (z.B. Integration in die Tragflächen)	x	x	x	x	
Hochauftriebsystem unter Berücksichtigung der Einschränkungen durch die Triebwerksintegration	x	x	x	x	
Lösungen zur Minimierung des mitgeführten Wassers für Start- und Steigflug	x			x	
Wärmetauscher zur Rückgewinnung der Abgaswärme und Verdampfung	x			x	
Wärmetauscher (Kondensator) zur Wasserkondensation	x			x	
Langstreckenflugzeug mit evolutionärer SAF kompatibler Gasturbine					
Integration der Triebwerke mit erhöhtem Nebenstromverhältnis					
Langstreckenflugzeug mit evolutionärer SAF kompatibler Gasturbine und neuem Flügel					
Hoch gestreckter Flügel: siehe unten (Flügel großer Spannweite)					
Aerodynamisch optimierte Flugzeugkonfiguration und Flugzeugzelle hoher Produktionsratenfähigkeit					
Integration der Triebwerke mit erhöhtem Nebenstromverhältnis					
Systemintegration aller Komponenten in das Flugzeug					
Flügel großer Spannweite					
Aktive Lastabminderung durch effektive Erkennung von Böen und Turbulenzen auf der Flugbahn vor dem Flugzeug und sehr schnelle Aktuatoren geringer Baugröße	X	x		X	
Passive Lastabminderung u.a. durch unkonventionelle Laminate im Faserverbund für eine optimierte Steifigkeitsverteilung	x	x	x	x	
Multi-funktionale Steuerelemente, auch zur Anpassung der Flugzeuggeometrie an aerodynamisch nicht optimale Flughöhen (klima-optimierte Trajektorien[1])	X	X	X	X	
Klappbare Flügelenden, evtl. mit Steuerflächen und Mitteln zur Kontrolle des Strömungsabrisses				x	
System zur Flatterkontrolle und Flugsteuerung bei höherer Flexibilität des Flügels	X	X	X	X	
Sehr kompakte Aktuatoren zur Minimierung der Flügeltiefe und damit des Reibungswiderstands	X	X			
Konzepte zur Triebwerksaufhängung in hochbelasteten Strukturen	X	X		x	
Fahrwerkskonzepte zur längsweisen Entkopplung der Position des Hauptfahrwerkes und des Auftriebsmittelpunkts des Flügels, z.B. durch Anbindung am Rumpf	x	x	x	x	
Systemminiaturisierung von hydraulischen, hydromechanischen, piezo-elektronischen oder elektromechanischen Systemkomponenten für effiziente und kompaktere Systemlösungen, lokale Energiespeicherung und Energieverwaltung für wichtige Systemtechnologien. Fortschrittliche optische Sensorlösungen	x	x			
Fertigungstechnologien und Lieferketten					
Brennstoffzellen-Stacks (Bipolarplatten, Dichtungen)	x			x	
Flüssigwasserstofftanks (Füllstandsmessung, Isolierung, Struktur, Anti-Sloshing Strukturen, Materialien)	x	x		X	
Wärmetauscher	X	X		x	
Flüssigwasserstoff-Versorgungssystem (Pumpen, Ventile, Wärmetauscher, Sensoren, Leitungen, Dichtungen, Isolierungen, Materialien)	x	x	x	x	
Hochleistungshalbleiter und Hochleistungselektronik für den Multi-Megawatt Bereich	x	x		x	X
Bereitstellung von Test- und Validierungsplattformen*					
Investition in den Aufbau und Betrieb von Prüfständen zur beschleunigten Entwicklung und Validierung der benötigten Schlüsseltechnologien	(X)			(X)	
Investition in neue benötigte Fertigungstechnologien und Pilotproduktionsanlagen für luftfahrttaugliche Brennstoffzellen, H2-Kryogentanks, H2-Systemkomponenten, Hochleistungselektronik, Mikrosystemtechnik und Stromspeichermedien.	(X)				X
Flugerprobungsplattformen für Systemerprobung bis TRL 6 in den erforderlichen Leistungsklassen	(X)	(X)			
Schon die aktuellen Forschungs- und Vorentwicklungsphasen benötigen geeignete Einrichtungen zur Entwicklung der notwendigen Technologiebausteine für Subsysteme und Ausrüstung, z. B. Ausbau von Prüfstands- und Windkanalkapazitäten für Flugzeug- und Antriebsentwicklung, sowie der Komponentenintegration	(X)				
Wasserstofftauglicher Höhenprüfstand für Triebwerke					
Erhalt des Kryo-Windkanals (ETW)					(X)
* Derzeitige Investitionen nicht ausreichend.					
Aufbau einer Infrastruktur für Wasserstoff in der Luftfahrt					
(LH2 Produktion/ Lieferung					
- Aufbau dezentraler grüner GH2 Produktion mit Solar- und Elektrolyseurkapazitäten					
- Lieferung LKW LH2 vs. Pipeline für GH2 und lokale Verflüssiger am Flughafen					
LH2 Speicherung					
- Tankanlagenkonzept mit Verflüssiger, Ober-/ Untergrundspeicher und Verteilnetz					
- Last mile Anlieferung LH2 bis A/C: Trailer vs. Pipeline					
LH2 Handling am A/C					
- Mobile Serviceeinheiten für Betankung, Enttanking, Inertisierung, Überwachung					X
- Sicherheitskonzept für A/C Betankungsvorgänge					

Anlage 2: Nutzen/Kosten-Analyse

		Kosten bis TRL 6 (M€)				ALICIA Einsparpotenzial kumuliert bis 2050 in MtCO2e	Nutzen/ Kosten in MtCO2e /€	
		Antrieb	Flügel	Flugzeug	Total			
Kurzstrecke (100 pax/1000 NM)	Wasserstoff-Brennstoffzelle und Flügel hoher Spannweite	2000	1000	1000	4000	2045	0,51	Bei Ersatz Regionalmarkt
						30492	7,62	Maximalszenario: Übernahme aller Flüge bis 1000 NM mit Flottenmix nach DEPA 2050 Prognose*
	Wasserstoff-Gasturbine und Flügel hoher Spannweite	842	1000	1000	2842	1778	0,63	Bei Ersatz Regionalmarkt
Kurz-/Mittelstrecke (Referenz A320neo)	Revolutionäre Gasturbine und Flügel hoher Spannweite	1700	1000	500	3200	26516	9,33	Maximalszenario: Übernahme aller Flüge bis 1000 NM mit Flottenmix nach DEPA 2050 Prognose*
						11301	3,53	Konservative Annahme
	Wasserstoff-Gasturbine und Flügel hoher Spannweite	1053	1000	1000	3053	23159	7,24	Progressive Annahme
Langstrecke (Referenz A350-900)	Evolutionäre Gasturbine	585	0	0	585	980	1,68	
	Evolutionäre Gasturbine und Flügel hoher Spannweite	585	1000	0	1585	1216	0,77	
	Revolutionäre Gasturbine und Flügel hoher Spannweite	1700	1000	500	3200	4143	1,29	

* Konsequenzen: 1. massive Änderung der Betriebsmodelle der Airlines und 2. sehr hohe Anzahl von Flugzeugen erforderlich mit entsprechenden kapazitiven Herausforderungen an Produktion und Betrieb (Flughäfen, ATM)

Anlage 3: Autoren dieses Abschlussberichtes

Dr. Anna Bauch, Airbus Operations GmbH

André Breuer, Wehrtechnische Dienststelle für Luftfahrzeuge und Luftfahrtgerät der Bundeswehr

Fabian Donus, MTU Aero Engines

Hans Fischer, Airbus SAS

Dr. Ingmar Geiß, Deutsche Aircraft

Dr. Thomas Haase, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Dr. Marc Häming, Diehl Aerospace

Prof. Dr. Uwe Heßler, Rolls-Royce Deutschland

Gerrit Rexhausen, Lufthansa Technik

Sebastian Ziehm, Liebherr-Aerospace Lindenberg