

Tobias Jetzke

Elektrisches Fliegen: Von der Drohne zum Passagierflugzeug

Exakt 107 Jahre nach der ersten Überquerung des Ärmelkanals per Flugzeug hat ein französischer Pilot am 10. Juli 2015 die Meerenge erstmals mit einem elektrisch angetriebenen Flugzeug überquert (Hegmann und Wüpper 2015). Mit seiner Aktion kam der Franzose dem Flugzeughersteller Airbus wenige Stunden zuvor (Holland 2015). Die Parallele zur damaligen Ärmelkanalüberquerung zeigt, dass wieder ein Wettrennen entbrannt ist, nur dass es diesmal um den Beweis der technischen Machbarkeit elektrisch angetriebener Flugzeuge geht. Und die Entwicklungsdynamik scheint ungebremst: Im April 2017 hat das Münchner Unternehmen Lilium Aviation¹ einen ersten unbemannten Testflug für ein elektrisch betriebenes, vertikal startendes und landendes Fluggerät absolviert. In Zukunft soll das Flugzeug als Lufttaxi – nach erfolgreicher Markteinführung – Personen in einem Radius von 300 Kilometern transportieren (Penke 2017).

Bislang führt ein Kooperationsvorhaben von Airbus und Siemens das Feld an, doch andere Hersteller holen auf, wie die Anekdote des Rekordversuchs von Airbus zeigt: Kurz zuvor hatte nämlich Siemens einem slowenischen Flugzeugbauer die Durchführung der Ärmelkanalüberquerung mit Verweis auf die fehlende Zulassung der neuen Elektromotoren untersagen lassen (Hegmann und Wüpper 2015). Daneben existieren weitere Wettbewerber, die im Segment der Kleinflugzeuge Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchführen (Kruse 2016). Airbus und Siemens geht es jedoch nicht nur um Kleinflugzeuge. Der Ersatz herkömmlicher Verbrennungsmotoren oder die Kombination von Elektro- und Verbrennungsmotoren zu hybriden Antrieben soll künftig auch in großen Passagiermaschinen vollzogen werden und den Luftverkehr ressourcenschonend und emissionsarm transformieren. Daraus ergeben sich unter anderem Chancen für aufwendig subventionierte, aber oft unwirtschaftlich betriebene Regionalf Flughäfen – sie könnten einer neuen Renaissance entgegen sehen. Daneben bieten sich gleichermaßen Einsatzmöglichkeiten im Bereich autonomer Fluggeräte, wie das Beispiel Lilium Aviation zeigt.

Obwohl die technischen Hürden, die es bis zu einem Einsatz elektrischer Motoren in (mittel-)großen Passagiermaschinen zu überwinden gilt, noch enorm erscheinen, zeichnen sich schon heute vielfältige potenzielle Einsatzfelder für elektrisch betriebene Fluggeräte ab. Von den Lieferdrohnen im Nahbereich über „Mitflugzentralen“ auf Kurzstrecken bis hin zur engeren Vernetzung regionaler Ballungsräume bietet das Thema elektrisches Fliegen vielfältige Analyseperspektiven und Gestaltungspotenziale.

In der vorliegenden iit perspektive werden drei Entwicklungsstränge geschildert:

- ▶ eine eher **langfristig** gedachte, spekulative Entwicklung hin zu elektrisch angetriebenen Passagiermaschinen,
- ▶ eine **mittelfristig** realistisch erscheinende Entwicklung von elektrisch angetriebenen Flugzeugen für die Materiallogistik und
- ▶ die **kurzfristigen** Folgen einer weiteren Verbreitung von Drohnen.

Während die Darstellung des ersten Entwicklungsstranges sich insbesondere an Stakeholder von Regionalf Flughäfen richtet, ist der zweite Entwicklungsstrang sowohl für Unternehmen der Logistikbranche und Techniklieferanten als auch für Akteure der regionalen Wirtschaftsförderung gleichermaßen relevant. Der dritte Strang ist aus regulatorischen Gesichtspunkten relevant.

Hintergrund

Die Anstrengungen, Alternativen zu den derzeit in Flugzeugen eingesetzten Verbrennungsmotoren und Turbinen zu entwickeln, erscheinen vor dem Hintergrund steigender Umweltbelastungen nachvollziehbar. Vor allem die lokale Lärm- und Emissionsbelastung, aber auch die durch den Flughafen(aus)bau verursachte Flächenversiegelung, sind in den letzten Jahren stark gestiegen. Jährlich nehmen die Zahl der Flüge, die Zahl der zurückgelegten Kilometer sowie die Passagierzahlen zu,

¹ Lilium Aviation: <https://lilium.com>

sodass von einer weiteren Zunahme der Umweltbelastungen auszugehen ist (Lehmann 2008).

Um wenigstens das Emissionsproblem teilweise zu lösen, experimentieren Fluglinien und Flugzeugbauer zum Beispiel mit dem Einsatz von Biokerosin, also aus hydrierten Pflanzenölen wie Raps-, Palm- und Jatrophaöl oder aus Algen gewonnene Treibstoffe. Die Lufthansa und andere Linien der Star Alliance arbeiten im Projekt „burnFair“ an derartigen Lösungen (vgl. Lindekamp 2015; Münder 2015; Zocke 2014). Biokerosin auf Algenbasis wird im Projekt „AUFWIND“ unter Mitwirkung von Airbus und EADS erforscht (vgl. BMUB 2014).

Während damit zwar die Reduzierung von Treibhausgasemissionen angegangen wird, stellt sich die Frage, auf welche Art und Weise der Biotreibstoff gewonnen wird und ob diese Verfahren effizienter als herkömmliche Kerosinerzeugungsverfahren sind. In erster Linie wird Biokerosin derzeit aus Raps- oder Palmöl gewonnen, d.h. die für den Anbau notwendigen Flächen stehen anderer landwirtschaftlicher Nutzung nicht mehr zur Verfügung. Im Vergleich zur Gewinnung von herkömmlichem Kerosin ist Biokerosin derzeit noch die kostenintensivere Variante (Lindekamp 2015). Daher rücken – neben regulierenden Aspekten wie etwa dem Emissionshandel und dem Verbot von Nachtstarts und -landungen – zunehmend alternative Antriebstechnologien in den Fokus von Forschung und Entwicklung.

Ein solches Forschungs- und Entwicklungsfeld, dessen Bedeutung in den letzten fünf Jahren stark zugenommen hat, ist der Einsatz von Elektromotoren anstelle der bisher üblichen Verbrennungsmotoren in Flugzeugen. Auch wenn die ersten Versuche elektrisch betriebener Flugzeuge bereits im späten 19. Jahrhundert durchgeführt wurden (Garrison 2009), von ernsthaften Anstrengungen auf diesem Gebiet kann erst in den 70er Jahren gesprochen werden – nachdem in der Batterietechnologie die ersten nennenswerten Erfolge erzielt werden konnten.

Zwei zentrale Herausforderungen waren zunächst die Gewährleistung der Energieversorgung für den elektrischen Motor und die Realisierung einer ausreichenden Motorenleistung. Sowohl Batterien als auch Motoren zeichneten sich bei erhöhter Leistungsfähigkeit durch ein steigendes Gewicht aus. Alternative experimentelle Methoden der Energieversorgung waren die Verbindung über Kabel (eher geeignet für stationäre oder in engem Radius operierende Fluggeräte) oder Mikrowellen. Erst entscheidende Fortschritte im Bereich der Batterietechnologie konnten das Verhältnis von Gewicht und Ladekapazität reduzieren und einen Einsatz in Flugzeugen in den Bereich des Möglichen rücken.

Auch der Einsatz von Solarpanelen zur Sicherstellung der Energieversorgung ist ein Forschungsfeld, das seit den 70er Jahren verfolgt wird und in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen hat. Aufsehen erregt hat der Versuch der Weltumrundung des Piloten Bertrand Piccard, der in dem von 17.000 Solarzellen versorgten Elektroflugzeug „Solar Impulse 2“ in mehreren Etappen seit März 2015 auf einem Flug um die Welt ist und jüngst erfolgreich eine Atlantiküberquerung absolviert hat. Auch wenn es bei dem Versuch weniger um die Weiterentwicklung elektrischer Motoren und Batterien geht, sondern eher um eine Demonstration der Leistungsfähigkeit von Solartechnologie, kann das Vorhaben wertvolle Erkenntnisse für die Energieversorgung künftiger Elektroflugzeuge liefern, indem Zuverlässigkeit, Verschleiß und andere auftretende Herausforderungen analysiert werden (Amos 2016).

Neben den Fortschritten im Bereich Batterietechnologie und Energieversorgung werden heute vor allem auch Weiterentwicklungen bei den elektrischen Motoren angestrebt, die sich einerseits durch einen höheren Wirkungsgrad und andererseits durch ein geringeres Gewicht auszeichnen. Vorteile elektrischer Motoren sind die geringere Komplexität und wenige bewegliche (Verschleiß-)Teile (Calandrelli 2016). So existieren bereits Prototypen, die rund 5 Kilowatt pro Kilogramm Leistungsgewicht erreichen, d.h. bei einem Gewicht von 50 Kilogramm etwa 260 Kilowatt mechanische Dauerleistung liefern. Das ist momentan ausreichend, um kleine einmotorige Flugzeuge (z. B. Viersitzer) zu betreiben. In der Automobilindustrie liegt das derzeitige Leistungsgewicht der Antriebe bei 2 Kilowatt pro Kilogramm (Buck 2015). Da derart leistungsfähige Motoren eine entsprechende Stromversorgung und somit Batteriekapazität benötigen, bestehen die Entwicklungsziele daher vor allem in der Schaffung hybrider Antriebsstränge, die elektrische und Verbrennungsmotoren effizient miteinander kombinieren.

Weitere wichtige Forschungs- und Entwicklungsfelder sind die Leichtbauweise durch Einsatz neuer Materialien und das aerodynamische Verhalten durch neue Gestaltungsmöglichkeiten, die sich aus dem Einsatz moderner Produktionsmethoden wie der additiven Fertigung ergeben. Additive Fertigungsverfahren (3D-Druck) ermöglichen beispielsweise die Realisierung von Leichtbauweisen auf Basis bionischer Strukturen (vgl. Harhoff und Schnitzer 2015, S. 70; Marquardt 2014, S. 7–8). Auf diese Weise kann das Gewicht eines Flugzeuges reduziert und die äußere Form besser an aerodynamische Bedingungen angepasst werden. Dadurch reduzieren sich die benötigte Motorenleistung und der Energiebedarf entscheidend.

Als zentrale Akteure sind zum einen die großen Flugzeughersteller und deren Zulieferer zu nennen. Siemens als Motorenhersteller und Airbus als Flugzeugbauer kooperieren beispielsweise seit 2013 eng miteinander und entwickeln parallel neue

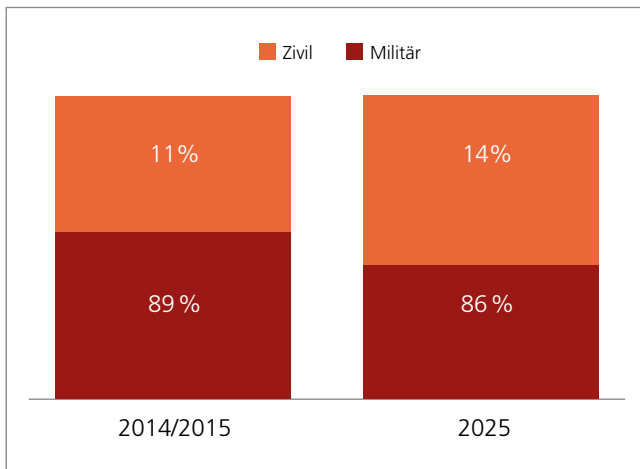


Abbildung 1: Nutzung je Einsatzgebiet (Statista 2017, S. 6)

Antriebsstränge und Luftfahrzeugkonzepte (Buck 2015). Gemeinsam wollen die beiden Unternehmen mehrere hundert Millionen Euro investieren und haben bereits ein Team mit rund 200 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern zusammengestellt, um Prototypen elektrisch und hybrid angetriebener Flugzeuge für Kurz- und Mittelstrecken zu entwickeln (Kruse 2016). Vorangetrieben werden die Forschungsarbeiten im Bereich hybrider Antriebsstränge auch von Instituten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), die an Brennstoffzell-Batteriesystemen arbeiten, mit denen Passagierflugzeuge angetrieben werden sollen (Nüsse und Kallo 2016).

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten finden parallel, z.T. auch in Kooperation mit Flugzeugherstellern, bei den Raumfahrtbehörden in den USA (NASA) und Japan (Jaxa) statt (Nüsse und Kallo 2016). Bei beiden liegt der Fokus derzeit vor allem auf der Modifikation bereits vorhandener Flugzeuge durch neue Tragflächen, auf denen eine Vielzahl kleiner Elektromotoren (Multipropeller) für den Antrieb sorgt (Pluta 2016). Dieser Multipropeller-Ansatz kommt auch beim NASA-Projekt X57² zum Einsatz: Hier sollen beim Start alle Motoren für den nötigen Schub sorgen. In der Luft übernehmen dann zwei große Motoren und sorgen für den weiteren Vortrieb (Calandrelli 2016).

Neben großen Herstellern und Anwendern experimentieren auch die Hersteller kleinerer Flugzeuge mit den neuen Antriebstechnologien. Dabei nutzen sie die derzeit verfügbare Leistungsfähigkeit der elektrischen Motoren aus, denn bisher ist ein zentrales Anwendungsfeld der Einsatz in kleinen (Sport-) Flugzeugen. Volta Volaré (USA), Cessna (USA), PC-Aero GmbH (Deutschland), Pipistrel (Slowenien) und Electric Aircraft Corporation (USA) sind nur einige der Hersteller, die bereits elektrisch

betriebene Kleinflugzeuge anbieten bzw. an deren Weiterentwicklung forschen (Gebhardt 2012; Hegmann und Wüpper 2015; Holland 2015).

Als letzte Akteursgruppe sind innovative und finanzstarke Technologieunternehmen wie beispielsweise Tesla zu nennen, deren originäres Geschäftsmodell bisher zwar wenig mit der Luftfahrt zu tun hatte, die jedoch über Kernkompetenzen in relevanten Technologiefeldern verfügen. Im Fall von Tesla sind das vor allem Erfahrungen im Bereich Elektroautomobile, Batterien aber auch Raketenbau und -betrieb (z. B. SpaceX des Tesla-Gründers Elon Musk) und Solarenergie. Auch wenn es hier erst vage Andeutungen hinsichtlich möglicher künftiger Forschungs- und Entwicklungsfelder gegeben hat (Groetzinger 2016), die den Aspekt des vertikalen Startens und Landens zum Kern haben, so ist denkbar, dass das Unternehmen mit einer vergleichbaren Dynamik, wie es sie im Bereich der Elektromobilität gegeben hat, auch in der Bereich der Luftfahrt vorstößt. Ein anderes Unternehmen, dessen Entwicklungsaktivitäten in eine ähnliche Richtung gehen, ist beispielsweise die XTI Aircraft Company³, deren vertikal abhebendes Flugzeug zurzeit in den USA entwickelt wird (Groetzinger 2016), oder das deutsche Startup Lilium Aviation mit Sitz bei München, das ebenfalls an einem vertikal startenden und landenden Elektrokleinflugzeug arbeitet (Wiemand et al. 2016).

Bereits in der praktischen Anwendung finden sich sogenannte Drohnen – unbemannte Luftfahrzeuge (unmanned aerial vehicles / UAV). Sie werden zu militärischen Zwecken wie Aufklärung, Überwachung, Luftnahunterstützung und für experimentelle Zwecke eingesetzt. Wesentlich vielseitiger ist das zivile Anwendungsfeld. Hier können Drohnen zur Begutachtung (z. B. von Katastrophengebieten), zur Dokumentation, für landwirtschaftliche Zwecke, in der Logistik und von Medien zur Foto- und Videoproduktion eingesetzt werden. Weiterhin dienen sie in Anlehnung an ihr militärisches Einsatzgebiet auch der Polizei zur Aufklärung, der Wissenschaft zur Erforschung von Atmosphäre und Weltraum sowie der Luftbildarchäologie und der Ornithologie. Schließlich stellen kleinere Drohnen auch ein zunehmend beliebtes Spielzeug dar, das von Privatpersonen gesteuert werden kann. Eine derzeit in Dubai verfolgte Vision zielt auf die Entwicklung von Drohnen als autonome Flugkörper für den Passagiertransport ab.

Der überwiegende Teil der genutzten Drohnen dient militärischen Zwecken (ca. 89 Prozent in 2014/2015) (vgl. Statista 2017, S. 6). Eine leichte Verschiebung zugunsten zivil genutzter Drohnen auf einen Anteil von rund 14 Prozent wird in den nächsten zehn Jahren erwartet (Statista 2017, S. 6).

2 NASA's X-57 Electric Research Plane: www.nasa.gov/image-feature/nasas-x-57-electric-research-plane

3 XTI Aircraft Company: www.xtiaircraft.com

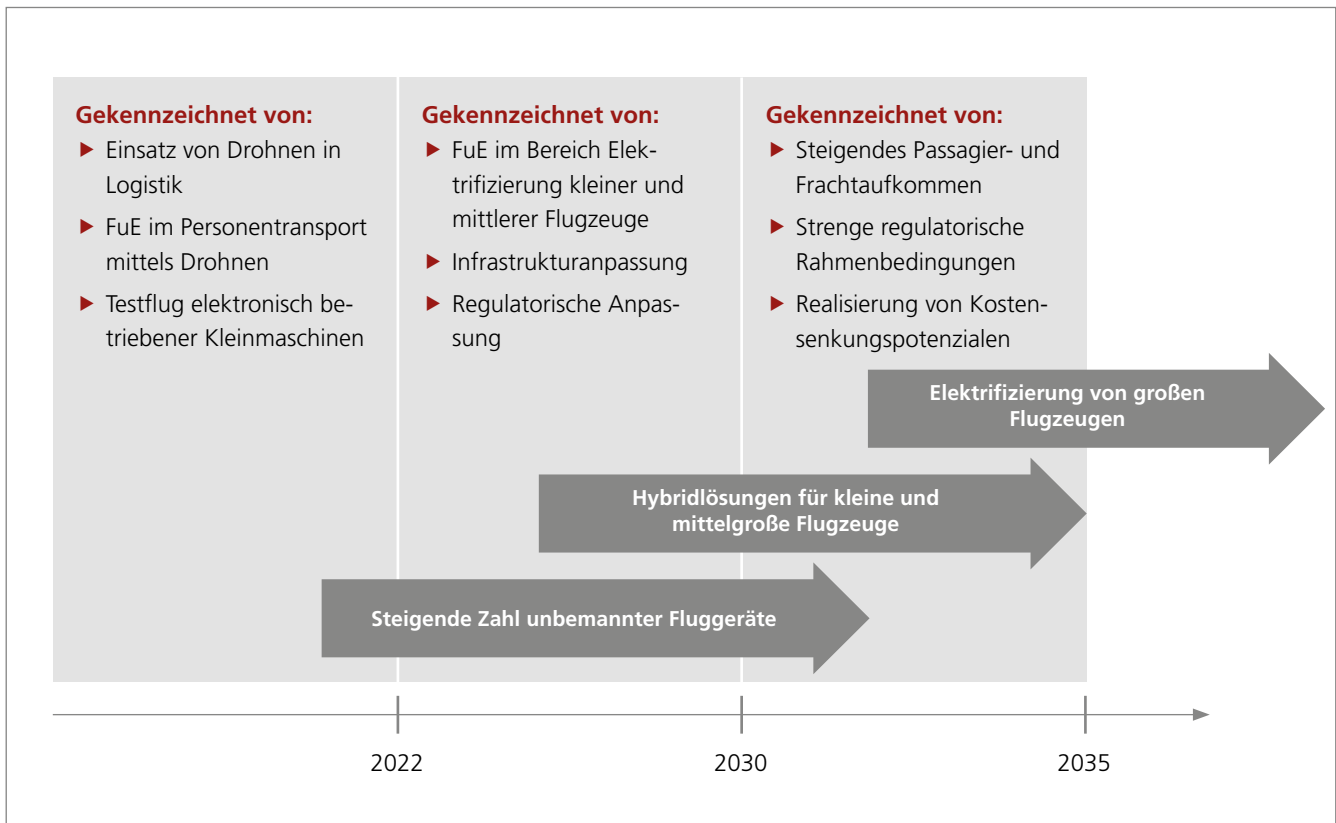


Abbildung 2: Merkmale der kurz-, mittel- und langfristigen Entwicklungsperspektive (eigene Darstellung)

Entwicklungsperspektiven des elektrischen Fliegens

Ausgehend von diesem Hintergrund lohnt die Betrachtung dreier Entwicklungsstränge:

1. einer **langfristigen**, die nächsten 25 bis 35 Jahre umfassenden Perspektive,
2. einer **mittelfristigen**, die nächsten zehn bis 15 Jahren umfassenden Perspektive, sowie
3. einer **kurzfristigen**, die nächsten fünf Jahre umfassenden Perspektive.

Die langfristige Perspektive ist entsprechend ihrer Weitsicht von größerer Unsicherheit hinsichtlich ihres Verlaufs gekennzeichnet. Sie eröffnet zwar auch Gestaltungsräume für strategische Entscheidungen, belastbare Entscheidungsgrundlagen sind jedoch nur bedingt verfügbar. Daher soll der Fokus auf die mittelfristige Perspektive gelegt werden, da hier einerseits die zentralen Entwicklungslinien besser erkannt werden können, andererseits aber auch die Gestaltungsoptionen aufgrund des eingenommenen Betrachtungshorizonts relevanter sind. Die kurzfristige Perspektive skizziert schließlich Lösungen, die bereits heute in unterschiedlichen Anwendungsfeldern zum Einsatz kommen.

Zwei Rahmenbedingungen flankieren alle drei Perspektiven: der erwartete Anstieg des Personen- und Frachtluftverkehrs (WBCSD 2004). Auch neuere Quellen gehen von einem anhaltenden Wachstum im Bereich der Fluggastzahlen, der zurückgelegten Kilometer pro Jahr und der transportierten Fracht aus. In Deutschland wird sich Schätzungen zufolge die Zahl der steigenden Passagiere von ca. 100 Mio. pro Jahr im Jahr 2015 auf 175 Mio. im Jahr 2030 steigern (Statista 2016). Parallel zum Welthandel entwickeln sich auch die Luftfrachtvolumina positiv (Langner 2015, S. 3f.). Weltweit betrachtet sollen sich die Passagierzahlen auf ca. 7 Mrd. im Jahr 2034 steigern, was einer Verdoppelung im Vergleich zu 2015 entspricht. Um dieser Entwicklung gerecht zu werden, sollen im selben Zeitraum bis zu 36.000 neue Flugzeuge in Dienst gehen (Stirn 2016). Auch der Luftfrachtverkehr entwickelt sich positiv: Bis 2033 kann sich die Zahl der Tonnenkilometer (RTK / Produkt der transportierten Maße und der zurückgelegten Strecke) auf ca. 521 Mrd. RTK mehr als verdoppeln (Crabtree et al. 2016).

Kurzfristige Perspektive bis zum Jahr 2022

In den nächsten fünf Jahren ist vor allem von einer weiteren Verbreitung von Drohnen auszugehen. Verschiedene Akteure sehen in Drohnen das technologische Potenzial, bestehende Wertschöpfungsketten zu verändern. Zu nennen sind an die-

ser Stelle Akteure, die Drohnen entwickeln, mit denen eine flächendeckende Breitband-Internetversorgung sichergestellt werden soll. Allen voran investieren digitale Plattformunternehmen wie Facebook und Google (Projekt „Skybender“) in die Entwicklung internetfähiger, autonomer Fluggeräte wie Drohnen, Ballons und Satelliten, um letztlich allen Menschen Zugang zum Internet zu ermöglichen (Harris 2016; Kelly 2015; Rajan 2016; Vogel 2015). Auch Logistikunternehmen wie DHL oder Amazon setzen auf Drohnen, um einen Teil des erwarteten wachsenden Frachtaufkommens zu bewältigen. Dabei geht es vor allem um die Überwindung der letzten Meile, also die Auslieferung von Waren zum Endkunden (DHL 2016).

Zwar sind für den kurzfristigen Zeithorizont einige Projekte angekündigt, die auch den Personentransport umfassen (Kitty Hawk Flyer⁴ und Uber mit „on-demand air transportation“; vgl. Lobo 2017). Aufgrund der in allen Fällen noch zu leistenden Entwicklungsarbeit ist es jedoch fraglich, ob hier bereits kurzfristig erfolgreiche Konzepte Anwendung im Nahverkehr urbaner Ballungsgebiete finden können. Vor allem regulatorische Fragen sind derzeit noch ungeklärt. Im Falle des Kitty Hawk Flyer beispielsweise ist ein Einsatz ausschließlich über Binnengewässern vorgesehen. Vor diesem Hintergrund sind derartige Konzepte eher als Experimente zu kennzeichnen, die dazu beitragen können, technische Fragen zu klären und rechtliche Rahmenbedingungen zu schaffen, die eine Übertragbarkeit in andere Anwendungsgebiete – wie zum Beispiel im innerstädtischen Personenverkehr – möglich machen.

Kurzfristig wird derzeit allerdings weniger die Frage gestellt, ob der Luftraum – insbesondere in Ballungsgebieten in Hinblick auf Frachtlogistik – sich zunehmend füllt, sondern wie dieser überfüllte Luftraum effizient gesteuert und reguliert werden kann (Lobo 2017).

Mittelfristige Perspektive bis zum Jahr 2030

Die künftigen Entwicklungen in den nächsten zehn bis 15 Jahren werden vor allem in zwei Richtungen Wirkung entfalten: Zum einen ist vorstellbar, dass kleinere Passagiermaschinen von der Elektrifizierung profitieren und das Entstehen neuer Geschäftsmodelle im Personentransport ermöglichen, was sich wiederum auf den Flugverkehr auswirkt. Zum anderen lassen sich die Auswirkungen der Elektrifizierung des Luftverkehrs auch anhand des an Bedeutung gewinnenden Frachtverkehrs illustrieren.

Die Elektrifizierung von kleinen Passagiermaschinen fußt vor allem auf Effizienzsteigerungen in den Bereichen Batterietechnologie, Motoren und Bauweise. Durch neue Produktions-

verfahren, wie beispielsweise die additive Fertigung, können Kostensenkungspotenziale vor allem für die Bauweise sowie die Wartung realisiert werden. Daraus können insbesondere neue Möglichkeiten für den Regionalverkehr mit Passagieren entstehen.

Dieser Entwicklungsstrang wird vor allem von den zunehmenden Individualisierungstendenzen in der heutigen Gesellschaft getrieben. Zum einen ist dies der Wunsch, zum anderen die Notwendigkeit nach überall verfügbarer Mobilität, die zum Beispiel aus einer deutlichen räumlichen Trennung zwischen Wohn- und Arbeitsort resultieren kann. Auch erhoffen sich Verkehrsexperten von einer Verlagerung des Personenverkehrs in den Luftraum eine Lösung vorherrschender Verkehrsprobleme in urbanen Ballungsgebieten. Hierzu zählen u. a. marode, sanierungsbedürftige Infrastrukturen oder aber überlastete Verkehrswege.

Bei der Gestaltung künftiger intermodaler Verkehrskonzepte können kleine und mittlere Passagiermaschinen, die elektrifiziert kurze und mittlere Distanzen zurücklegen können, eine entlastende Rolle spielen. Vor allem bei Verbindungen zwischen urbanen Ballungszentren oder zwischen Satellitenstädten und Stadtzentren könnten analog zu Autobahnen und Bahn-Schnellstrecken auch bevorzugte Luftverbindungen entstehen. Dies schafft Alternativen für Berufspendler und könnte zusätzlich die angespannte Wohnsituation in Großstädten entlasten.

Das Voranschreiten technischer Weiterentwicklungen befördert das Entstehen veränderter und neuer Geschäftsmodelle sowohl bei Fluggesellschaften als auch bei Zulieferern und bei Flughafenbetreibern. Wie derartige Geschäftsmodelle aussehen könnten, verdeutlicht das Beispiel Lilium Aviation.

So hat das Startup den Prototyp eines elektrisch getriebenen Senkrechtstartes bereits erfolgreich getestet. Angetrieben von 36 elektrischen Jet-Turbinen auf schwenkbaren Flügelklappen kann der Zweisitzer bis zu 300 Stundenkilometer und eine Reichweite von 300 Kilometern erreichen. Für die Technologie interessiert sich der US-Fahrdienstleister Uber, der für 2020 erste Testflüge angekündigt hat. Gegenüber einem Hubschrauber ist das Fluggerät nicht nur leiser. Gegenüber Konkurrenzprodukten, die auf rotorengetriebene Drohnentechnologie setzen, ist der Zweisitzer auch effizienter: Im Vergleich zu einer herkömmlichen Taxifahrt in New York soll der Lilium-Jet fünfmal schneller und anfangs nur halb so teuer sein (Magenheim 2017; Wiegand et al. 2016).

Die Etablierung eines derartigen Geschäftsmodells ermöglicht dem Startup einerseits als Zulieferer bzw. Technologiehersteller aufzutreten, andererseits aber auch als Anbieter von Mobilitäts-

4 Kitty Hawk Flyer: <https://kittyhawk.aero>

dienstleistungen in den Markt einzusteigen. Darüber hinaus sind noch viele weitere Geschäftsmodell-Transformationen vorstellbar.

Eine Elektrifizierung des Frachtluftverkehrs hat vor allem Auswirkungen auf die Materiallogistik. In regionalen Wirtschaftszentren, die im globalen Wettbewerb von ihrer Entwicklungs- und Produktionsdynamik profitieren, kommt es insbesondere bei kleinteiliger, just-in-time-Produktion auf eine flexible Materialverfügbarkeit an. Sowohl der Schienen- als auch der Straßenverkehr sind dabei einer Vielzahl von negativen Einflüssen ausgesetzt, die eine Materialverfügbarkeit zum notwendigen Zeitpunkt gefährden. Eine dritte Alternative in Form günstiger Luftfracht ermöglicht eine Risikosteuerung.

Beide Entwicklungsstränge sind von der Weiterentwicklung mehrerer Schlüsseltechnologien abhängig. Oben bereits genannt wurden Innovationen in den Bereichen Batterietechnologie, Motoren und Bauweise. Analog zur Entwicklung bei Passagiermaschinen prägen Innovationen in diesen drei Bereichen auch die Weiterentwicklung von Frachtmaschinen.

Langfristige Perspektive bis zum Jahr 2050

Wesentliche Entwicklungsschritte in den nächsten vierzig Jahren liegen vor allem im Nachweis der technologischen Machbarkeit der Konstruktion geeigneter Motoren und deren Einsatz in größeren Passagierflugzeugen. Airbus und Siemens rechnen damit, bereits im Jahr 2020 diesen Nachweis erbringen zu können (Kruse 2016). Bis 2030 sollen dann die ersten Flugzeuge mit weniger als 100 Passagieren elektrisch angetrieben werden (Kruse 2016). Noch einmal fünf Jahre später, bis zum Jahr 2035, sollen dann Flugzeuge mit 60 bis 100 Sitzen mit elektrischen Motoren im Routinebetrieb sein (Hegmann und Wüpper 2015). Auch die NASA strebt noch in diesem Jahrzehnt den Einsatz eines elektrischen Passagierflugzeugs für bis zu neun Passagiere an (Pluta 2016). Der Nachweis der technologischen Machbarkeit ist eine wesentliche Voraussetzung für die Umstellung insbesondere großer Passagiermaschinen auf elektrische Antriebe.

Die Umstellung mittlerer bis großer Passagierflugzeuge auf elektrische Antriebe wird von den genannten Akteuren in den nächsten 25 bis 35 Jahren angestrebt. Ob diese Ziele im anvisierten Zeitraum erreicht werden können, hängt von einer Vielzahl interdependenter Variablen und Randbedingungen ab. Zunächst ist die Weiterentwicklung und Integration mehrerer Schlüsseltechnologien notwendig. Dazu zählen neben Motoren und Triebwerken auch die Batterien, die Bauweise sowie die eingesetzten Sicherheitssysteme. Welche Rolle eine weiterführende Automatisierung großer Passagiermaschinen bis hin zu autonom agierenden Verkehrsflugzeuge spielt, ist derzeit noch nicht abzusehen.

Die technischen (Weiter-)Entwicklungen bewegen sich in einem Spannungsfeld übergeordneter Entwicklungen. An anderer Stelle in diesem Beitrag wurde bereits auf das weiter wachsende Passagieraufkommen und die Zunahme zurückgelegter Kilometer hingewiesen. Gleichzeitig verstärkt sich die Notwendigkeit einer Reduzierung der negativen Umweltwirkungen des Luftverkehrs. Schließlich stehen Fluggesellschaften unter wachsendem Kostendruck.

Wenn dieses Wechselspiel der hier skizzierten Entwicklungen zu Ende gedacht wird, und die genannten Hürden überwunden werden können, ist es durchaus vorstellbar, dass sich eine fundamentale Umwälzung des Flugverkehrs vollzieht. Emissionsarm fliegende, elektrisch angetriebene Flugzeuge können dem wachsenden Passagieraufkommen gerecht werden. Gleichzeitig könnten der negative Einfluss auf Klima und Umwelt reduziert und Kostensenkungspotenziale realisiert werden.

Die langfristige Perspektive vermag zu illustrieren, wie ein Luftverkehr der Zukunft aussehen könnte. Aufgrund bestehender Pfadabhängigkeiten ist eine revolutionäre Umwälzung jedoch allenfalls spekulativ. Auch die oben genannten Entwicklungsziele von Airbus und Siemens sind vor dem Hintergrund der komplexen Technologieentwicklung und -integration zwar wünschenswert, ihre Realisierung im anvisierten Zeithorizont jedoch eher spekulativ.

Anwendungsfelder

Entsprechend der mittelfristigen Betrachtungsperspektive bietet sich vor allem ein Einsatz von elektrisch angetriebenen Kleinflugzeugen und Hubschraubern in zwei weiter unten charakterisierten Anwendungsfeldern an. Diese Einschränkung resultiert aus dem oben erwähnten Leistungsgewicht der Motoren – also der Relation zwischen Gewicht und Leistung. Mittelfristig reichen die zur Verfügung stehenden Motoren noch nicht aus, um größere Flugzeuge zu betreiben. Aus technischer Sicht scheint in der mittelfristigen Perspektive eine Leistungsfähigkeit möglich zu sein, die für den regionalen Luftverkehr relevant wird (Buck 2015).

In Hinblick auf die derzeitigen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten liegen die Zukunftspotenziale elektrisch betriebener Flugzeuge in den beiden Anwendungsfeldern vor allem im Bereich der Kleinflugzeuge. Eine Diffusion neuer Antriebstechnologien eröffnet vor allem in zwei Anwendungsfeldern einen Umbruch in der Verkehrsinfrastruktur. Viele Länder sind von einer zunehmenden Urbanisierung betroffen, d. h. einem Anwachsen städtischer Ballungszentren und einer Zunahme der Bevölkerung. Daraus ergibt sich das erste Anwendungsfeld. Die aktuelle, historisch gewachsene und weiterhin primär boden-

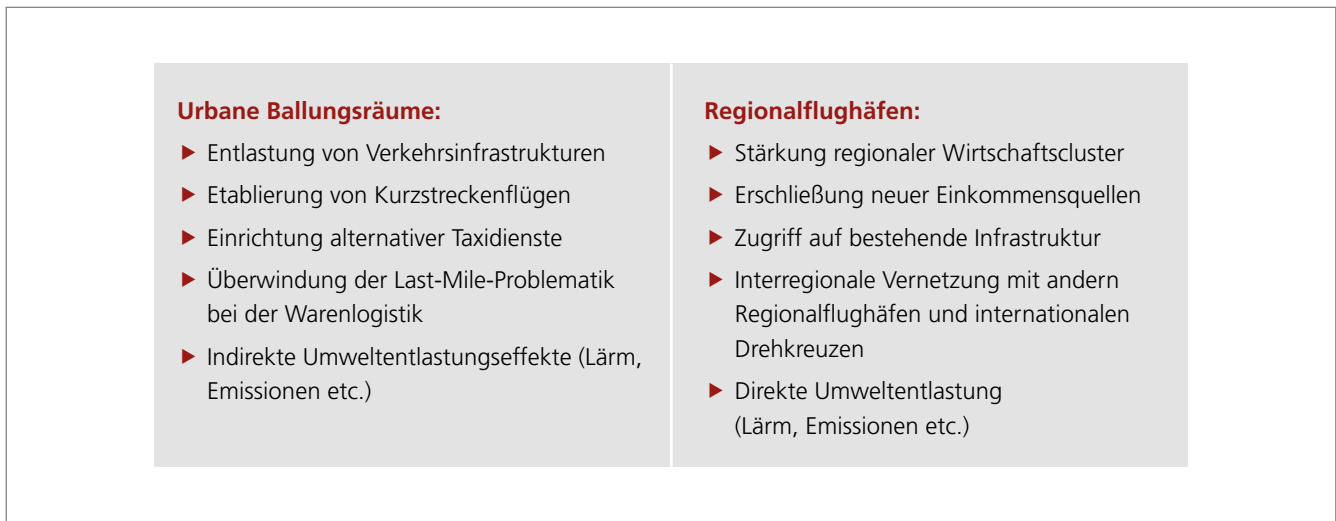


Abbildung 3: Anwendungsfelder und positive Effekte (eigene Darstellung)

gebundene Verkehrsinfrastruktur wird vor zunehmend größere Herausforderungen gestellt. Flächenversiegelungen, eine Zunahme an Treibhausgasemissionen und ein Kollaps existierender Verkehrsadern sind mögliche Folgen eines Anstiegs des motorisierten Individualverkehrs sowie des öffentlichen Personennahverkehrs. Elektrisch angetriebene Flugzeuge mit Reichweiten zwischen 100 und 200 Kilometern können die Verkehrsinfrastruktur in urbanen Ballungszentren mit vergleichbarer Ausdehnung entlasten (Nüssle und Kallo 2016, S. 2). Megastädte wie die brasilianische Stadt São Paulo haben schon heute die höchste Hubschrauberdichte der Welt, da der straßengebundene Verkehr gleichsam in einem Dauerstau weitgehend zum Erliegen kommt. Daher ist die Entwicklung von Konzepten, die einen Teil des Personen- und Frachtverkehrs in den Luftraum verlegen, eine naheliegende Konsequenz.

Während, wie oben dargestellt, die Bestrebungen zwar hin zu einem Einsatz in großen Passagiermaschinen gehen und vor allem von großen Flugzeugbauern vorangetrieben werden, ergeben sich für die Hersteller kleiner Maschinen ebenfalls Chancen: Der Entwicklungsaufwand ist geringer, sodass weniger Kosten aufgewendet werden müssen. Die beiden skizzierten Anwendungsfelder – Entlastung des ÖPNV in Metropolregionen und Vernetzung strukturschwacher Regionen – können das Entstehen neuer Geschäftsmodelle begünstigen. Denkbar ist zum Beispiel der Betrieb kleiner Passagiermaschinen für bis zu zehn Passagiere als fliegende Bus- bzw. Taxiunternehmen in urbanen Ballungsräumen. Erste derartige Geschäftsmodelle – eine Art „Mitflugzentrale“ im Internet⁵ – sind bereits entstanden und ermöglichen Privatpiloten Rund- und Streckenflüge anzubieten und Passagiere mitzunehmen (Lepies 2016).

Ein zweites Anwendungsfeld entsteht vor allem in jenen Regionen, in denen noch um die Jahrtausendwende und unter Einsatz hoher öffentlicher Fördersummen Regionalflughäfen entstanden sind. Zumindest in Deutschland lassen sich Regionalflughäfen nicht ohne Verluste betreiben, da selten kostendeckende Passagierzahlen erreicht werden. Im Jahr 2012 schrieben beispielsweise lediglich 17 von 18 Regionalflughäfen rote Zahlen (Randelhoff 2016). Häufig sind künftige Bedarfe nicht korrekt ermittelt worden und internationale Flughäfen ebenfalls verkehrsgünstig zu erreichen (Koschnick 2015). Somit stellt sich die Frage, welche Entwicklungspotenziale aktiviert werden können und wie künftige Geschäftsmodelle von Regionalflughäfen aussehen müssen. Bereits jetzt werden insbesondere strukturschwache Regionen bevorzugt per Bahn angebunden (Busse 2016).

Gerade hier kann ein Umstieg auf kleine elektrisch betriebene Passagiermaschinen einen positiven Effekt hervorbringen (Nüssle und Kallo 2016). Eine bessere Auslastung der Flughäfen kann durch neue, kostengünstige Kurzstreckenangebote erreicht werden. Die negativen Auswirkungen des bisherigen Betriebs, wie zum Beispiel Lärm und lokal anfallende Emissionen, entfallen. Gleichzeitig sind nur geringe Investitionen in die bereits existierende Infrastruktur notwendig. Auch hier können vor allem kleinere Maschinen mit mittlerer Reichweite zum Einsatz kommen und auf diese Weise Regionalflughäfen untereinander und mit den größeren, internationalen Flughäfen vernetzen. Denkbar ist, dass so eine effiziente, kostengünstige und vor allem umweltfreundliche Alternative zum Schienen- bzw. Straßenverkehr entsteht.

5 Wingly: <https://de.wingly.io>

Gestaltungspotenziale

Insbesondere in Deutschland sind aufgrund dieser strukturellen Bedingungen die Voraussetzungen für eine Weiterentwicklung und einen späteren Einsatz von Elektroflugzeugen gegeben. Zudem besteht im internationalen Vergleich ein Wissens- und Kompetenzvorsprung im Bereich der Elektromobilität. Synergien aus der Entwicklung von Batterien und Antriebssträngen aus der Automobilindustrie können genutzt werden, um Weiterentwicklungen im Bereich der Luftfahrt zu erleichtern. Auch die Vernetzung zentraler Akteure – wie Siemens und Airbus durch den Ausbau ihres „E-Aircraft Systemhauses“ zeigen (Hegmann und Wüpper 2015; Kruse 2016) – kann zur Realisierung vorhandener Innovationspotenziale führen. Ebenso können die Erkenntnisse über Ladeinfrastruktur sowie Steuerung und Sensorik zur Weiterentwicklung des elektrischen Fliegens beitragen. Analog zur Verwendung des aus der Luftfahrt bekannten Gyroskops als Drehratensensor im Automobil, kann es nun zu einer Technologiediffusion vom Auto ins Flugzeug kommen.

Für die Fluglinien bieten die Entwicklungen im Bereich elektrischer Flugzeuge perspektivisch Kostensenkungspotenziale. Mehr als die Hälfte der Lebenszykluskosten werden durch die Ausgaben für Kerosin verursacht. Allein der Einsatz hybrider Elektroantriebe könnte den Kraftstoffverbrauch um rund ein

Viertel senken und zu Kosteneinsparungen von etwa 12 Prozent führen (Buck 2015). Die oben kurz skizzierte Alternative von Biokerosin als Treibstoff befindet sich zwar ebenfalls in der Entwicklung, zielt aber zunächst auf eine Minderung der Treibhausgasemissionsproblematik ab und ist derzeit noch nicht wirtschaftlicher bzw. ressourceneffizienter als herkömmliches Kerosin.

Für Flughafenbetreiber – insbesondere von Regionalflughäfen – bieten sich Gestaltungspotenziale in der Neuausrichtung ihrer Aktivitäten. Vor dem Hintergrund der zu erwartenden Änderung der Subventionsrichtlinien auf Drängen der EU-Kommission dürfte es ab 2024 für Regionalflughäfen deutlich schwerer werden, Subventionen aus öffentlichen Quellen zu erhalten. Eine mit der Elektrifizierung des Flugverkehrs einhergehende Kostensenkung für den Transport von Fracht und Personen kann neue Einnahmequellen erschließen. Im regionalen Umfeld angesiedelte Betriebe könnten beispielsweise die Luftfracht als kostengünstige und effiziente Alternative in der Materiallogistik wählen.

Abbildung 4 zeigt die Gestaltungspotenziale, die sich im Personen- und Frachtluftverkehr ergeben und die aus einer Gegenüberstellung der unterschiedlichen zeitlichen Entwicklungsperspektiven mit den denkbaren, betroffenen Akteuren resultieren.

	Flugzeughersteller	Zulieferer	Technologieunternehmen (z. B. Tesla)	Betreiber von Regionalflughäfen	Betreiber von internationalen Drehkreuzen	Politik	Sonstige (z. B. lokale Wirtschaftsakteure)
Kurzfristig: Zunahme an unbemannten, autonomen bzw. automatisierten Fluggeräten	Erprobung alternativer Antriebs- und Steuerungskonzepte	FuE im Bereich Antrieb und Batterie	Know-how-Transfer im Bereich Batterie-fertigung	Einrichten von Lenk- und Leitsystemen zur Steuerung autonomer Fluggeräte		Schaffung von Experimentier-räumen zur Überprüfung des regulatorischen Anpassungsbedarfes	Entwicklung und Erprobung neuer Logistikkonzepte
Mittelfristig: Elektrifizierung von Kleinmaschinen und Hybridlösung von mittelgroßen Passagiermaschinen	Umsetzung von Innovationen im Bereich Fertigung	FuE im Bereich Leichtbau, Hybridisierung	Generierung von Marktanteilen als Zulieferer	Einrichtung von Kurz- und Mittelstrecken	Neugestaltung des Zubringerflugverkehrs	Entwicklung alternativer Mobilitätskonzepte; Anpassung der Infrastruktur	Entwicklung von Standortvorteilen durch vielfältige Verkehrs-anbindung
Langfristig: Elektrifizierung großer Passagier- und Frachtmaschinen	Einhaltung regulatorischer Anforderungen; Realisierung von Kostensenkungspotenzialen	Umstellung der Produktions- und Wertschöpfungsketten				Durchsetzung von Maßnahmen zum Erreichen von Klimaschutzzielen	Realisierung von Kostensenkungspotenzialen in der Material-logistik

Abbildung 4: Gestaltungspotenziale im Personen- und Frachtluftverkehr (eigene Darstellung)

Fazit

Vor dem Hintergrund des wachsenden Personen- und Frachtaufkommens im Luftverkehr ist mit einer Zunahme der Fluggeräte am Himmel zu rechnen – ergänzt um unbemannte, autonom agierende oder automatisch gesteuerte Fluggeräte, die zu wissenschaftlichen, militärischen oder zivilgesellschaftlichen Zwecken eingesetzt werden. Welcher Weg dabei beschritten wird, hängt von einer Vielzahl an Einflussfaktoren ab – ebenso wie die oben zitierten Prognosen des zunehmenden Luftverkehrs auch davon abhängen, ob die globale Wirtschaftsleistung weiter wächst.

Die technischen Entwicklungsschritte, die bis zu einer vollständigen Elektrifizierung großer Passagiermaschinen notwendig sind, stellen eine langfristige Herausforderung dar und sind äußerst komplex. Dies bedeutet, dass die Realisierung von Hybridlösungen, in denen nur Teile des Fluggerätes elektrifiziert sind, eine vielversprechende Perspektive für kleine und mittelgroße Passagiermaschinen darstellt.

Ebenfalls für Kleinmaschinen scheint eine Verzahnung mit Drohnentechnologie eine realistische Entwicklungsperspektive zu sein. Setzen sich derartige Konzepte – wie die oben erwähnten Beispiele von Kitty Hawk und Liliium Aviation – durch, so könnte der Individualverkehr im Luftraum einen deutlichen Aufschwung erfahren.

Eine Zunahme des Luftverkehrs ist eine regulatorische Herausforderung, wie ein Vergleich mit der Debatte rund um die Zulassung unbemannter Fluggeräte durch Privatpersonen und Logistikunternehmen zeigt. Eine Förderung der Entwicklungs- und Forschungsaktivitäten, die zu einer Verbreitung des elektrisch angetriebenen Luftverkehrs führen soll, ist nur durch eine parallele Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen möglich.

Die hier aufgezeigten Entwicklungsperspektiven, vor allem die konzeptionellen Ansätze für Drohnen, die auch durch Personen genutzt werden können, bieten trotz regulatorischer Hürden auch Experimentierfelder. Diese können dazu dienen, bislang offene regulatorische Fragen zu beantworten, die technische Machbarkeit verschiedener Konzepte sicherzustellen und die Marktfähigkeit der entwickelten Lösungen zu bewerten sowie passende Geschäftsmodelle zu entwickeln. Eine vollständige Transformation der für den elektrifizierten Flugverkehr notwendigen Infrastruktur ist derzeit noch nicht zu beobachten. Es konnten aber Potenziale insbesondere für Regionalflughäfen aufgezeigt werden. Eine frühzeitige Berücksichtigung alternativer Verkehrskonzepte kann jedoch dazu beitragen, diese Potenziale zu nutzen und positive wirtschaftliche Effekte zu erzielen.

Zur Ermittlung dieser Potenziale können Machbarkeitsstudien beitragen, die aufzeigen,

- ▶ welche technischen, wirtschaftlichen, gesellschaftlichen, politischen und ökologischen Rahmenbedingungen vorherrschen,
- ▶ welche künftigen Entwicklungspfade zu erwarten sind und
- ▶ welche Gestaltungsoptionen für Regionalflughäfen und lokale Wirtschaftsstandorte existieren.

Die Machbarkeitsstudien richten sich dementsprechend an regionale Flughafenbetreiber, ihre kommunalen Partner und an Technologieentwickler, können aber auch von Fluggesellschaften zur Evaluation ihrer Strategien und Geschäftsmodelle genutzt werden.

Ferner bieten Machbarkeitsstudien die Möglichkeit, im Sinne einer Szenario-Konstruktion, unterschiedliche Entwicklungslinien zu beschreiben und hinsichtlich ihrer jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeit und ihrer potenziellen Auswirkungen gegeneinander aufzuwiegen.

Literaturverzeichnis

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2014). GreenTech made in Germany 4.0. Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland. Verfügbar unter: www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/greentech_atlas_4_0_bf.pdf, zuletzt zugegriffen am 02.08.2017.

Amos, J. (2016). Solar Impulse completes Atlantic crossing with landing in Seville. In: BBC News, 23.06.2016. Verfügbar unter: www.bbc.com/news/science-environment-36598140, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.

Buck, C. (2015). Ultraleichtes Kraftpaket für das elektrische Fliegen. In: Pictures of the Future, Siemens AG (Hrsg.). Verfügbar unter: www.siemens.com/innovation/de/home/pictures-of-the-future/mobilitaet-uns-antriebe/elektromobilitaet-elektrisches-fliegen.html, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.

Busse, C. (2016). Regionalflughäfen haben sich überlebt. In: Süddeutsche.de, 06.06.2016. Verfügbar unter: www.sueddeutsche.de/wirtschaft/luftfahrt-regionalflughafen-haben-sich-ueberlebt-1.3022151, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.

Calandrelli, E. (2016). NASA's new X-plane and the future of electric aircraft. In: Techcrunch, 17.01.2016. Verfügbar unter: <https://techcrunch.com/2016/06/17/nasas-new-x-plane-and-the-future-of-electric-aircraft/>, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.

Crabtree, T.; Hoang, T.; Tom, R.; Gildemann, G. (2016). World Air Cargo Forecast. 2016-2017. Boeing Commercial Airplanes

- (Hrsg.). Verfügbar unter: www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/about-our-market/cargo-market-detail-wacf/download-report/assets/pdfs/wacf.pdf, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Deutsche Post DHL Group (DHL) (2016). Einbindung des DHL-Paketkopters in die Logistikkette erfolgreich getestet. Pressemitteilung vom 09.05.2016. Verfügbar unter: www.dpdhl.com/de/presse/pressemitteilungen/2016/einbindung_dhl_paketkopter_logistikkette_erfolgreich_getestet.html, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Garrison, P. (2009). The Electric Airplane. Quiet, smooth, dependable—shouldn't we be flying these by now?, Smithsonian Institution's National Air and Space Museum. Air & Space/Smithsonian (Hrsg.). Verfügbar unter: www.airspacemag.com/flight-today/the-electric-airplane-34986164/?no-ist, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Gebhardt, B. (2012). Volta Volare GT4 – das erste serienreife Elektroflugzeug. Trends der Zukunft (Hrsg.). Verfügbar unter: www.trendsderzukunft.de/volta-volare-gt4-das-erste-serienreife-elektroflugzeug/2012/05/02, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Groetzinger, K. (2016). Elon Musk is thinking about building an electric airplane that takes off vertically. In: Quartz, 07.02.2016. Verfügbar unter: <http://qz.com/611677/elon-musk-is-thinking-about-building-an-electric-airplane-that-takes-off-vertically>, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Harhoff, D.; Schnitzer, M. (2015). EFI Gutachten 2015. Berlin: Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI).
- Harris, M. (2016). Project Skybender: Google's secretive 5G internet drone tests revealed. In: The Guardian, 29.01.2016. Verfügbar unter: www.theguardian.com/technology/2016/jan/29/project-skybender-google-drone-tests-internet-spaceport-virgin-galactic, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Hegmann, G.; Wüpper, G. (2015). Warum Siemens einen historischen Flug verhinderte In: Welt.de, 09.07.2015. Verfügbar unter: www.welt.de/wirtschaft/article143751438/Warum-Siemens-einen-historischen-Flug-verhinderte.html, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Holland, M. (2015). Airbus verliert Wettlauf um erste Ärmelkanalquerung im Elektroflugzeug, In: Heise Medien, 10.07.2015. Verfügbar unter: www.heise.de/newsticker/meldung/Airbus-verliert-Wettlauf-um-erste-Aermelkanalquerung-im-Elektroflugzeug-2748214.html, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Kelly, H. (2015). Facebook built a giant Internet drone. In: CNN tech, 31.07.2015. Verfügbar unter: <http://money.cnn.com/2015/07/30/technology/facebook-drone-aquila>, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Koschnick, W. J. (2015). Deutschland im regionalen Flughafen-Wahn. In: Telepolis, 22.11.2015. Verfügbar unter: www.heise.de/tp/druck/ob/artikel/46/46520/1.html, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Kruse, G. (2016). Airbus und Siemens forschen gemeinsam am elektrischen Fliegen. In: airliners.de, 07.04.2016. Verfügbar unter: www.airliners.de/airbus-siemens-fliegen/38300, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Langner, B. (2015). Die deutsche Luftfracht im internationalen Wettbewerb. Zur Markt- und Wettbewerbsentwicklung. Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e. V. (BDL) (Hrsg.). Verfügbar unter: www.bdl.aero/download/1950/marktentwicklungsanalyse.pdf, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Lehmann, H. (2008). Umweltbelastungen durch den Flugverkehr und Überblick über Minderungsmaßnahmen. Konferenz zur Internalisierung der flughafennahen externen Umweltkosten. Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.), Foliensatz, 13.05.2008. Verfügbar unter: www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/dokumente/lehmann.pdf, Zugriff am 21.06.2016.
- Lepies, J. (2016). Ausprobiert: Eine Wing-Wing-Situation. In: Technology Review, 04.07.2017. Verfügbar unter: www.heise.de/tr/artikel/Ausprobiert-Eine-Wing-Wing-Situation-3253305.html, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Lindekamp, C. (2015). Bio-Kerosin. Die Jagd nach dem Wundertreibstoff. In: Handelsblatt.de, 20.06.2015. Verfügbar unter: www.handelsblatt.com/technik/bourget2015/bio-kerosin-die-jagd-nach-dem-wundertreibstoff/11942872.html, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Lobo, S. (2017). Zukunft ohne Straßen: Man hat uns fliegende Autos versprochen, verdammt! In: SPIEGEL Online, 26.04.2017. Verfügbar unter: www.spiegel.de/netzwelt/web/sascha-lobo-ueber-fliegende-autos-und-die-zukunft-der-strasse-a-1144927.html, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Magenheim, T. (2017). Das Elektro-Taxi hebt ab. In: Frankfurter Rundschau, 22.05.2017. Verfügbar unter: www.fr.de/wirtschaft/verkehr-das-elektrotaxi-hebt-ab-a-1282975, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.

- Marquardt, E. (2014). Statusreport Additive Fertigungsverfahren. Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.).
- Münder, P. (2015). Mit Biokerosin in 10.000 Metern Höhe. In: ZEIT ONLINE, 29.04.2015. Verfügbar unter: www.zeit.de/mobilitaet/2015-04/luftfahrt-biokerosin-reichweite, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Nüssle, D.; Kallo, J. (2016). Emissionsarm elektrisch Fliegen: Was sind die Herausforderungen für elektrische Antriebe in der Luftfahrt?. Institut für Technische Thermodynamik, Koordinator Gruppe Energiesystemintegration. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (Hrsg.). Verfügbar unter: www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10081/151_read-16766/#/gallery/22051, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Penke, M. (2017). Flugtaxi von Lilium absolviert erfolgreichen Testflug. In: Gründerszene.de, 21.04.2017. Verfügbar unter: www.gruenderszene.de/allgemein/lilium-jet-testflug, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Pluta, W. (2016). Die Nasa entwickelt ein Elektroflugzeug. In: Golem.de, 10.02.2016. Verfügbar unter: www.golem.de/news/sceptor-die-nasa-entwickelt-ein-elektroflugzeug-1602-119035.html, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Rajan, N. (2016). Google's Project Loon to Facebook Aquila: Everything you need to know about Internet from the skies. In: The Indian Express, 31.01.2016. Verfügbar unter: <http://indianexpress.com/article/technology/tech-news-technology/google-project-loon-to-facebook-aquila-everything-you-need-to-know-about-internet-from-the-skies>, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Randelhoff, M. (2016). Gesamtverlust der achtzehn deutschen Regionalf Flughäfen 2012: 152,31 Millionen Euro. In: Zukunft Mobilität, 27.12.2016. Verfügbar unter: www.zukunft-mobilitaet.net/84759/flugverkehr/verluste-regionalflyghaefen-2012-weeze-dortmund-dresden-luebeck-kassel-calden-leipzig-frankfurt-hahn/#comments, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Statista (2016). Anzahl der beförderten Personen im deutschen Luftverkehr in den Jahren 2000 bis 2030 (Einsteigende Passagiere in Millionen), zuletzt zugegriffen am 28.04.2017.
- Statista GmbH (2017). Zivile Drohnen (Dossier), zuletzt zugegriffen am 28.04.2017.
- Stirn, A. (2016). „Wir werden die Luftfahrt verändern“. In: Süddeutsche.de, 23.08.2017. Verfügbar unter: www.sueddeutsche.de/wissen/flugtechnik-wir-werden-die-luftfahrt-veraendern-1.3127918, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- Vogel, M. (2015). Himmlische Offensive. Ballons, Drohnen und Satelliten können das Internet auch in entlegene Winkel der Erde bringen. In: bild der wissenschaft (9), 94-98.
- Wiegand, D.; Nathen, P.; Born, S.; Meiner, M. (2016). Lilium Aviation, TU München. Lilium GmbH (Hrsg.). Verfügbar unter: <http://lilium-aviation.com>, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.
- World business council for sustainable development (WBCSD). (2004). Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability.
- Zschocke, A. (2014). Projekt BurnFAIR. Arbeitspakete 1.1 bis 1.4. Abschlussbericht. Deutsche Lufthansa (Hrsg.). Verfügbar unter: www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Berichte/Abschlussbericht_BurnFAIR.pdf, zuletzt zugegriffen am 08.08.2017.

Kontakt:

Institut für Innovation und Technik (iit)
Steinplatz 1, 10623 Berlin

Tobias Jetzke

Tel.: 030 310078-5414
E-Mail: jetzke@iit-berlin.de

iit perspektive Nr. 33

August 2017

Layout: Poli Quintana
ISBN: 978-3-89750-180-5