

GATE – HYBRIDANTRIEBSKONZEPT ZUR MODERNISIERUNG DER ALLGEMEINEN LUFTFAHRT

M. Mitzkat, mathiasmitzkat@hotmail.com

D. Münzing, da-vid@web.de

T. Schwabe, tina.schwabe@hotmail.com

Zusammenfassung

Im Folgenden werden die Ergebnisse einer Machbarkeitsstudie zur Einführung eines alternativen Antriebes auf Basis der Hybridtechnologie in der Allgemeinen Luftfahrt präsentiert. Ziel der Machbarkeitsstudie war es zu überprüfen, ob eine Symbiose aus moderner Verbrennungsmotorentechnologie und elektrischen Antriebssystemen technisch umsetzbar und in die Allgemeine Luftfahrt einführbar ist. Mit Hilfe von Methoden zur Konzept- und Komponentenauswahl, die auf eine ausgewählte Flugzeugklasse angewandt wurden, entstand das GATE-Antriebskonzept (General Aviation Temporary Electric). Anhand der Ergebnisse des GATE-Antriebes wird gezeigt, dass ein deutlicher Fortschritt in Bezug auf die Umweltverträglichkeit von Luftfahrtantrieben in der E-Klasse möglich ist.

1 Einleitung

Im Vergleich zur kommerziellen Luftfahrt und Automobilindustrie, hat in der E-Klasse der Allgemeinen Luftfahrt (AL) bis zuletzt keine signifikante technische Weiterentwicklung stattgefunden, die sich auf dem Markt durchsetzen konnte. Die am häufigsten verwendeten Antriebsaggregate, die Lycoming-Motoren O-320 und O-360, sind in den weitverbreiteten Flugzeugen Cessna 172 und Piper PA-28 verbaut. Die Motorentechnik dieser Flugzeugmuster basiert auf der nicht mehr zeitgemäßen Vergasertechnologie der 1940er Jahre. [1] Zudem werden diese mit dem verbleiten Kraftstoff Aviation Gasoline (Avgas) betrieben. Aufgrund ihrer veralteten Technologie und Kraftstoffverbräuche, Schadstoff- und Lärmemissionen auf. Um zukünftig die Akzeptanz der Schulungs- und Privatfliegerei weiterhin erhalten zu können und die Flugzeuge durch Anpassung an die Bedürfnisse der Anwender attraktiver zu machen, wird eine Modernisierung der Antriebe unumgänglich. Auch in Hinblick auf die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen, die es zu reduzieren gilt, führt der Weg für E-Klasse Flugzeuge zum Elektroantrieb. Die Hybridtechnologie, als Kombination von moderner Verbrennungskraftmaschine (VKM) und leis-

tungstarkem elektrischen Antriebsstrang, kann hierbei als Übergangstechnologie zum emissionslosen elektrischen Fliegen genutzt werden. Umgesetzt werden soll die Modernisierung der Antriebe in Form des GATE-Hybridantriebskonzeptes.

2 Stand der Forschung

Erste Versuche zur Elektrifizierung von Luftfahrzeugen in der AL haben bereits stattgefunden. Die elektrische, bzw. teilelektrische Antriebstechnologie findet in der Allgemeinen Luftfahrt heutzutage in fünf Bereichen Anwendung: Im Segelflugzeugbau ist sie über das Versuchsstadium hinaus und konnte sich bereits als Konkurrenz zu Verbrennungsmotoren etablieren. Elektrische Antriebe werden als sog. "Heimbringer" oder zum Erreichen von Eigenstartfähigkeit in Flugzeugen, wie der DG-1001TE oder Antares 20E eingesetzt. [2, 3] Derzeit gibt es nur noch wenige Segelflugzeughersteller, die keine elektrisch angetriebenen Flugzeuge anbieten.

Die Firma Pipistrel konnte mit ihrer Taurus G4 sogar die NASA Green Flight Challenge gewinnen, an der auch die e-Genius der Universität Stuttgart teilnahm. Die Flugzeuge erreichten Flugzeiten von 3,6 - 3,8 h bei Geschwindigkeiten von 105 – 107 kn. [4] Der zweite Einsatzbereich besteht aus Motorflugzeugen, die speziell dafür entwickelt wurden elektrisch

angetrieben zu werden. Ihr Leistungsbereich liegt bei 13 – 30 kW. [5, 6] Die bedeutendsten Vertreter sind die Elektra One der PC Aero GmbH und die e430 von Yuneec International (China) Co. Ltd.. Beide wurden mit dem Lindberghpreis ausgezeichnet. [7] Die e430 wird als einzige der etwa 15 existierenden derartigen Flugzeuge bereits kommerziell vertrieben.

Im dritten Bereich gibt es zur Zeit zwei Projekte, in denen an der Umrüstung eines alten Flugzeuges mit einem elektr. Antrieb geforscht wird. Die Firma Sonex Aircraft LLC hat für das Kitflugzeug Monnett Moni einen elektrischen Antrieb entworfen. Seine maximale Flugzeit liegt bei ca. 25 – 40 min. [8] Der Geschwindigkeitsrekord elektrischer Flugzeuge liegt bei $250 \frac{km}{h}$ und wird von der SkySpark, einer elektrifizierten Pioneer Alpi 300, gehalten. Ihre Energie erhält sie derzeit aus einer H₂-Brennstoffzelle und erreicht damit 2 h Flugzeit. [9]

Der vierte Bereich beinhaltet einmotorige, propellergetriebene Hybridflugzeuge. Die Firmen Pipistrel und Volta Volare haben, analog zur Elektra One, Flugzeuge entworfen, die den speziellen Anforderungen eines Hybridantriebes entsprechen. Dazu gehört im Falle der Volta Volare GT4 eine hohe max. Startmasse und ein Canardflügelkonzept, sodass viel Platz für Kraftstoff und Batterien vorhanden ist. Die elektrisch angetriebene Pipistrel Panthera befindet sich noch in der Entwicklung, während die GT4 bereits in der Flugerprobung ist. Laut Hersteller ist sie mit einer Lieferzeit von ca. 180 Tagen bereits bestellbar [10, 11].

Hybridkonzepte finden auch bei Motorseglern Anwendung, dem fünften Bereich. Die Embry-Riddle University hat das Hybridkonzept "EcoEagle" umgesetzt, welches in einer Stemme S-10 erprobt wird. Das Flugzeug ist für den Start und Steigflug mit einem Rotax-912S ausgerüstet. Im Reiseflug übernimmt ein 40 kW Elektromotor. Mit diesem Konzept können Reichweiten von 148 NM erreicht werden. [4, 12] Auch eine Ausstattung eines Motorseglers mit einem Hybrid auf H₂ - Brennstoffzellentechnologie ist sinnvoll, da Reichweiten von 500 NM theoretisch erzielt werden können, ohne die Startmasse des Flugzeuges zu erhöhen. [13] Forschungsarbeiten existieren bzgl. des Einsatzes elektr. Antriebe in Commuterklasse- oder senkrechtstartfähigen Flugzeugen. Ihr Ergebnis ist unter anderem, dass derartige Vorhaben erst Sinn machen, wenn Zukunftstechnologien wie Li-Luft Batterien oder HTS-Motoren eingesetzt werden können. [14, 15]

Die Ergebnisse der vorgestellten Projekte zeigen, dass Elektrifizierung auch mit sinnvollen Reichweiten möglich ist, wenn nur kleine Energiemengen benötigt

werden. [14] Bei Flugzeugen mit einer Leistung von 70 kW oder größer, ist die Leistungsfähigkeit vorhandener Technologien noch nicht ausreichend für eine vollständige Elektrifizierung. Eine Ausnahme stellen unter Umständen Motorsegler dar. Die Hybridtechnologie in der Luftfahrt ist allerdings in einem vielversprechenden Gebiet noch unerforscht: Die Machbarkeit eines Hybridantriebes als Retrofit für einmotorige, konventionell angetriebene Propellerflugzeuge, mit dem die weltweit bestehende Flugzeugflotte nachgerüstet werden kann. Im Rahmen dieser Studie soll ein Antrieb entstehen, der den Anforderungen der Kunden entspricht. Durch den Einsatz moderner Technologien bei den Antriebskomponenten sollen die Schadstoff- und CO₂-Emissionen sowie die Betriebskosten reduziert werden, sodass ein technisch umsetzbares und ein auf dem Markt einfühbares Konzept entsteht – der GATE-Antrieb.

3 Methodik

3.1 Anforderungen und Zielsetzung

Bei der Entwicklung des GATE-Antriebes lag ein besonderer Fokus auf der Erarbeitung von genauen Anforderungen an den Hybridantrieb und den Rahmenbedingungen, die einen Einsatz sinnvoll machen. Der GATE-Antrieb, bzw. das Flugzeug in das er verbaut wird, soll das technisch Mögliche darstellen, um so einen aktuellen und umweltfreundlichen Antrieb entstehen zu lassen. Während der Entwicklung wurden verschiedene Aspekte, wie Anwendungsbereich, Betriebswirtschaft und Kundenakzeptanz beleuchtet. Das Hauptaugenmerk bei der Entwicklung des GATE-Antriebes lag primär auf der Erhöhung der Umweltverträglichkeit. Als Kenngröße für die Umweltverträglichkeit muss der Emissionsausstoß eines Systemes betrachtet werden, der die Kohlenstoffdioxidemission und die Schadstoffemissionen beinhaltet. Weiterhin ist der Lärmausstoß zu beachten. Daher ist der erste Schritt die Reduktion des Verbrauches der VKM. Es wurde ein Vergleich von drei Motoren der Allgemeinen Luftfahrt erarbeitet. Zwischen dem Lycoming O-360, dem Centurion 2,0 und dem Porsche PFM 3200 N03, weist der Centurion mit $220 \frac{g}{kWh}$ den besten und der Lycoming O-360 mit $310 \frac{g}{kWh}$ den schlechtesten spezifischen Verbrauch im Bestpunkt auf. Damit gegenüber den jetzigen Lycoming Motoren, die größtenteils in der E-Klasse verbaut sind, eine Reduktion im Verbrauch stattfinden kann, muss eine VKM mit Direkteinspritzung, Turboaufladung und Hybridtechnologie ausgestattet

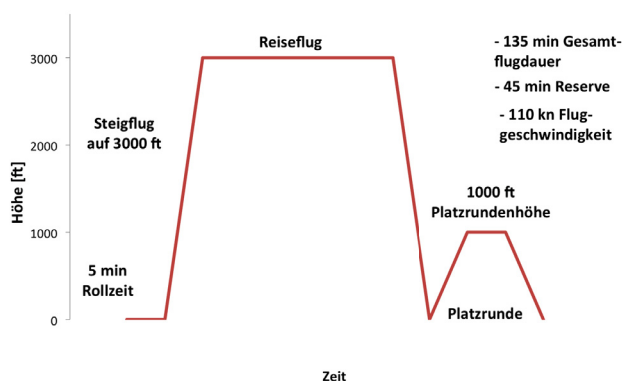


Abbildung 1: Flugzyklus für private Nutzer

sein. Durch diese Maßnahmen wäre eine theoretische Einsparung von bis zu 39 % [16] zu erreichen. Aber auch der Schadstoffausstoß muss mit Hilfe einer kontrollierten Verbrennung und Abgasnachbehandlung reduziert werden. Das bedeutet, dass eine elektronische Gemischregelung verbaut werden muss, um ein optimales Luft-Kraftstoffverhältnis von $\lambda = 1$ zu erreichen und eine Abgasnachbehandlung in Form eines Katalysators und/oder Rußpartikelfilters möglich zu machen.

Das Nutzungsverhalten der Piloten wurde anhand verschiedener Maschinen der E-Klasse mit einer maximalen Abflugmasse (MTOM) bis 1,2 t, im Privaten- und Schulungsbetrieb, untersucht. Daraus entstand ein repräsentativer Flugzyklus, der in Abb. 1 zu sehen ist. Dieser stellt 90 % der untersuchten privaten Flüge dar. Der repräsentative Schulungsflug unterscheidet sich lediglich durch eine auf vier erhöhte Anzahl an Platzrunden. Dieser Flugzyklus ist die Basis der weiteren Berechnungen, die sich von nun an auf einen kompletten Flugablauf beziehen und nicht mehr auf eine einzelne Flugstunde.

Als nächstes wurde der zukünftige Markt des GATE-Antriebes betrachtet. Es ist sinnvoll hierbei den Weltmarkt der Einmotorigen Kolbenmaschinen zu Grunde zu legen. Untersucht wurden E-Klasse Maschinen bis 1,2 t MTOM, Light Sport Aircraft (LSA) und Ultraleichtflugzeuge (UL). Die E-Klasse zeichnet sich dabei durch den größten Marktanteil und die große Uniformität, was Antriebs- und Flugleistungen betrifft, aus. Für die Hybridisierung ist die E-Klasse prädestiniert, da es das Ziel ist, einen Antrieb für eine breite Massen an Flugzeugen zu entwickeln. Besonders ist, dass in ein Flugzeug über die gesamte Lebensdauer mehrere Motoren verbaut werden, da diese eine wesentlich geringere Lebensdauer (TBO)

von meistens nur 2000 h besitzen. Aufgrund dieser Erkenntnis soll der GATE-Antrieb als Retrofit konzipiert werden, damit er auch in ältere Flugzeuge verbaut werden kann, wenn der Motor getauscht werden muss.

Anschließend wurde ein Referenzflugzeug gesucht, dass durch die Uniformität und ähnlichen Merkmalen der E-Klasse, als deren Repräsentant fungieren kann. Die Wahl fiel auf die Piper PA-28-161, da sie sowohl im privaten Bereich oft geflogen wird als auch als Schulungsflugzeug weitverbreitet im Einsatz ist.

Um demnach die Umweltfreundlichkeit und allgemeine Akzeptanz des Antriebes sicherstellen zu können, wurden weitere Anforderungen erarbeitet und an dieser Stelle zusammengefasst:

- Allgemein:
 - Elektrische Energie aus CO_2 neutralen Quellen
 - Erreichen der ursprünglichen Flugleistungen der Piper PA-28-161 (gegeben durch das Flughandbuch)
 - GATE-Antrieb als Nachrüstatz konzipieren, um alte Motoren nach deren Laufzeit zu ersetzen
 - Antriebskomponentenauswahl nach dem Baukastenprinzip
- Motorisch:
 - Maximaler spez. Verbrauch der VKM von $300 \frac{g}{kWh}$, im Reiseflug max. $260 \frac{g}{kWh}$
 - Direkteinspritzung mit elektronischer Gemisch-, Zünd-, und Lastregelung
 - Mogas, als bleifreien Kraftstoff
 - Abgasnachbehandlung durch 3-Wege-Katalysator, entweder NO_x -Speicherkatalysator oder Selektive katalytische Reduktion (SCR) und/oder Rußpartikelfilter
 - Abgasturbolader für höhenunabhängige Antriebsleistung
 - Hybridtechnologie zur variablen Auslegung und Steigerung der Flugzeit gegenüber rein elektrischen Antrieben
- Zulassung:
 - Redundanter Betrieb der Antriebe, sodass ein einzelner Ausfall nicht das gesamte System betrifft

- Überwachung und besonderer Schutz der elektrischen Speicher
- Max. 50 dB Lärmemission

Werden all diese Anforderungen erfüllt und im GATE-Antrieb zusammengefasst, entsteht ein technologisch aktueller und deutlich umweltfreundlicherer Antrieb, der den momentan eingesetzten Triebwerken überlegen ist.

3.2 Umsetzung

Der GATE-Antrieb soll die Hybridtechnologie als Basis verwenden, also eine Verbindung aus moderner Verbrennungsmotorentechologie und einem elektrischen Antrieb. In Abb. 2 ist die Vorgehensweise schematisch dargestellt. Ziel der Berechnung ist es die elektrische Betriebszeit des Antriebes herauszufinden, da sie als Machbarkeitsgrenze für Hybridisierung herangezogen wird.

Wie bereits vorgestellt wird die Piper PA-28-161 als Referenzflugzeug verwendet. Die Flugleistungen und aerodynamische Daten sind durch das Flughandbuch [17] und eine Studie gegeben [18].

Aus diesen Ausgangsparametern wird ein lineares Gleichungssystem aufgebaut, das drei Flugzustände der Flugmechanik beschreibt. Dargestellt wird der stationäre und unbeschleunigte Steig-, Reise- und Sinkflug. Dabei ist der Steigflug aufgrund der höchsten Wellenleistung und der Reiseflug aufgrund des größten zeitlichen Rahmens am wichtigsten. Die Umweltbedingungen entsprechen der Standardatmosphäre nach ISA-Bedingungen.

Für die einzelnen Flugzustände ergeben sich aus der Flugmechanik die benötigten Wellenleistungen um die Flugleistungen des Handbuchs zu erfüllen. Angenommen wird dabei als Steiggeschwindigkeit 79 kn für bestes Steigen und 110 kn Reisegeschwindigkeit.

Die Wellenleistungen werden mit Hilfe der Referenzmission und damit verknüpften Flugzeiten zu einer Gesamtenergie aufintegriert, die zur Erfüllung des Flugzyklus notwendig sind und somit an Bord mitgeführt werden muss.

Neben den Leistungen und Energien wird auch die für den GATE-Antrieb zur Verfügung stehende Antriebsmasse berechnet. Dies geschieht wieder mit Hilfe des Referenzflugzeuges und ist die Summe der für den alten Antrieb verbauten Komponenten. Diese bestehen aus Propeller, VKM incl. Öl, Kraftstoffsystem, Kraftstoff und der Starterbatterie. Die

Nutzlast wird initial auf die notwendige Masse für zwei Piloten und zwei Gepäckstücke nach ICAO Standardgewichten reduziert, um für die Startberechnung mehr Spielraum zu haben.

Diese Punkte bilden die notwendige Vorarbeit der eigentlichen Berechnung und gehen als Eingangsparameter ein. Der Berechnungskreislauf beginnt mit der Auswahl geeigneter Hybridkonzepte, die zuerst analog zur Automobilindustrie ausgewählt wurden. Hier findet eine Unterteilung anhand der Leistung des elektrischen Motors statt. Diese Herangehensweise hat sich für die Luftfahrt als nicht praktikabel herausgestellt, da die verbaute elektrische Energiemenge nicht betrachtet wird. Dadurch lässt sich nicht auf die Gesamtbetriebszeit des elektrischen Antriebsstranges schließen. Als Lösung wird die Elektrifizierungszahl, als Verhältnis von elektrischer Energie zur Gesamtenergie an Bord, eingeführt. Sie gilt gleichzeitig auch als Indikator für Umweltfreundlichkeit, da mit steigender Elektrifizierungszahl der Anteil elektrischer Energie steigt.

Bei der Auswahl wird von Anfang an auf die speziellen Anforderungen der Luftfahrt an einen Hybridantrieb eingegangen und geprüft, ob sich die Konzepte umsetzen lassen. Als diskretes Konzept wird jeweils der Parallel-, Seriell und Seriellhybrid mit Range Extender weiter betrachtet. Der leistungsverzweigte Hybrid wird nicht berechnet, da sein Aufbau zu komplex ist und somit die Anzahl der Komponenten zu groß wird.

Ist die Auswahl abgeschlossen, werden die einzelnen Hybridkonzepte mit den Komponenten aus der Datenbank in das Rechenmodell eingepflegt. Dadurch wird von Anfang an ein praktikables System geschaffen, das mit realen Daten versehen ist. Als nächster Schritt folgt die finale Zusammensetzung des Antriebes mit Komponenten, die im Baukasten hinterlegt sind. Dort sind reale Leistungsdaten der Komponenten eingepflegt.

Daraus ergibt sich eine Leistungsaufteilung zwischen elektrischem und konventionellen Antrieb. Hiermit ist der erste Berechnungskreislauf abgeschlossen. Mit den gewonnenen Ergebnissen erfolgt eine Neueinteilung der Hybridkonzepte, die wieder aus der Datenbank und dem Baukasten aufgebaut werden.

Der Zyklus wird solange fortgesetzt bis die Anforderungen an elektrische und Gesamtbetriebszeit erfüllt sind. Das Ergebnis der Untersuchung ist der GATE-Antrieb und soll im nächsten Kapitel vorgestellt werden.

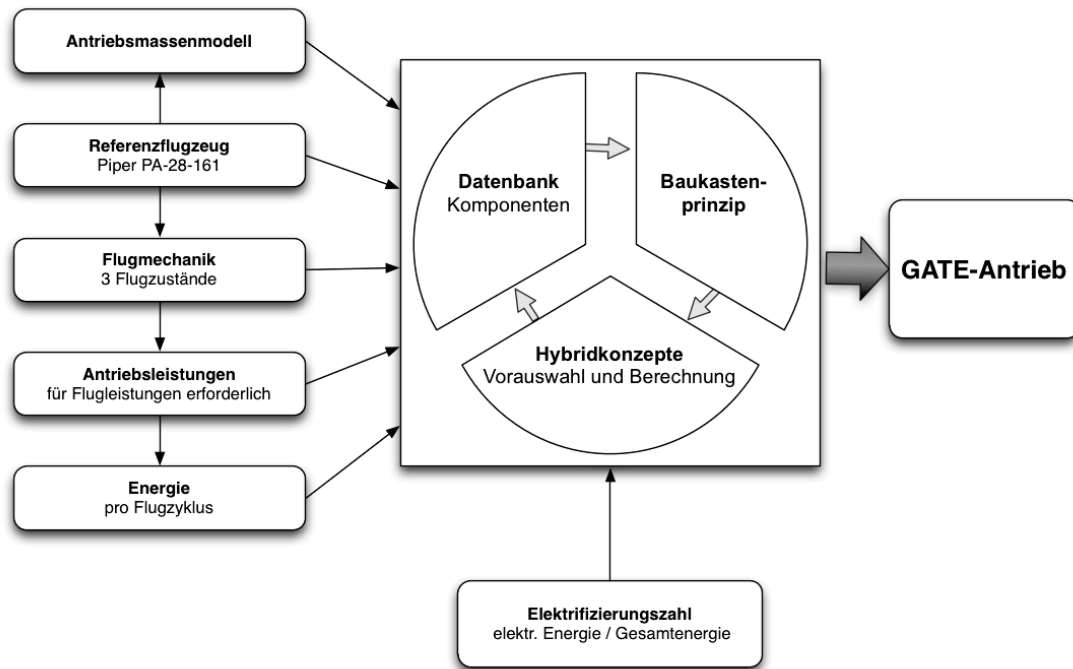


Abbildung 2: Berechnung GATE-Antrieb

4 Ergebnisse

4.1 GATE-Konzept

Bei der Entwicklung des Antriebes hat sich das Parallelhybridkonzept mit Plug-In Option im Vergleich zu einem Range-Extender-Konzept als günstige Lösung erwiesen. Ein Range-Extender benötigt aufgrund der großen zu verbauenden Motoren viel Masse. Eine E-Maschine großer Leistung muss von einer ebenso großen Ladegruppe mit Energie versorgt werden. Deswegen ist der Bauraum für eine für die Referenzmission ausreichend große Batterie nicht vorhanden. Bei einem Parallelhybridkonzept ist die Masse des gesamten elektrischen Stranges weitaus geringer. Dadurch sinkt die Masse des Gesamtantriebes inkl. einer ausreichend großen Batterie unter die durch die Flugzeuge vorgegebene kritische Obergrenze. In einem Parallelhybrid kann die Leistungsaufteilung zwischen Verbrennungskraftmaschine (VKM) und elektrischem Strang so gestaltet werden, dass die Vorteile beider Maschinen ausgenutzt werden können. Nach diesem Konzept wurde der GATE-Antrieb entworfen. Die vom Benutzer geforderte Reichweite wird durch den Einsatz der VKM im Reiseflug erreicht. Hierbei wird die VKM in ihrem Bestpunkt betrieben. Der elektrische Strang

Leistungsaufteilung GATE

Gesamtleistung 105 kW

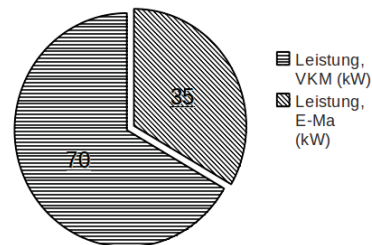


Abbildung 3: Leistungsaufteilung GATE

wird zum (Durch-)Starten und für den Steigflug, parallel zu der auf Reiseleistung laufenden VKM, zugeschaltet und erzeugt instantan die zusätzlich benötigte Leistung.

Die genaue Leistungsaufteilung ist in Abbildung 3 dargestellt.

4.2 GATE-Aufbau

Mechanisch wird die Zusammenführung der Leistung von E-Maschine und VKM durch ein Kegelradgetriebe erreicht, siehe Abbildung 4. Der Propeller wird di-

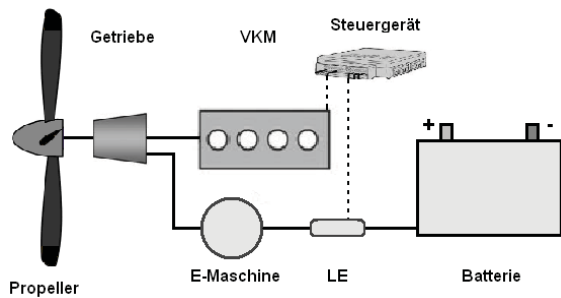


Abbildung 4: Aufbau GATE-Antrieb

rekt durch die Kurbelwelle der VKM angetrieben. Parallel dazu kann die im rechten Winkel angeordnete E-Maschine über das Kegelradgetriebe dazugeschaltet werden. Die E-Maschine bezieht ihre Energie aus Batterien, die in den Tragflächen oder in der Fluggastzelle aufbewahrt werden. Der Kraftstofftank ist ebenfalls in den Tragflächen untergebracht. Die Regelung des gesamten Antriebes erfolgt über ein Steuergerät für VKM und E-Maschine. Der Pilot gibt per Ein-Hebel-Steuerung im Cockpit eine Leistungsanforderung (in % Leistung) an das Steuergerät, welches den Befehl verarbeitet und an die beiden Antriebsstränge weiterverteilt. Ihr untergeordnet ist die Leistungselektronik (LE) der E-Maschine. Sie schaltet auf Befehl des Steuergerätes die E-Maschine mit der gewünschten Leistung hinzu oder ab. Das Steuergerät ist doppelt vorhanden, um im Falle eines Versagens eine Redundanz zu sichern. Mit dieser Steuerungsmethode vereinfacht sich die Führung des Flugzeuges für den Piloten entscheidend gegenüber herkömmlichen Motoren. Er muss nur noch eine Leistungsanforderung an den Motor stellen, während der richtige Anstellwinkel der Propellerblätter sowie das richtige Gemisch automatisch eingestellt werden. Für die Auswahl der Antriebskomponenten wurden systemrelevante Kriterien definiert, um die Leistungsfähigkeit des GATE-Antriebes sicher zu stellen. Darunter fallen allgemein:

- Wirkungsgrad
- Masse
- Umweltverträglichkeit
- Zuverlässigkeit
- Benchmarktechnologie
- Maximale Laufruhe der VKM
- Kompatibilität mit anderen Systemkomponenten

Als Propeller ist ein 3-Blatt-Verstellpropeller mit einem Durchmesser von 1,88 m vorgesehen, um einen möglichst hohen Wirkungsgrad von $\eta \geq 0.85$ zu erreichen. Die zugehörige Propellerdrehzahl beträgt dabei 2200 min^{-1} . Die VKM ist idealerweise ein turboaufgeladener 4-Zylinder Boxermotor mit 1,8 l Hubraum. Sie soll mit Mogas (Motor Gasoline) oder Superbenzin betrieben werden. Wichtig ist eine vollkommen automatische, elektronische Motorsteuerung, sodass Direkteinspritzung und Abgasnachbehandlung mittels Katalysator einsetzbar werden. Der spezifische Kraftstoffverbrauch sollte $260 \frac{\text{g}}{\text{kWh}}$ im Bestpunkt nicht überschreiten, um den CO_2 -Ausstoß zu begrenzen. Den Bestpunkt, in dem die VKM die meiste Zeit gehalten wird, sollte bei einer Drehzahl von ca. 2200 min^{-1} liegen und eine Leistung von 70 kW bereitstellen. Der Wirkungsgrad der ausgewählten E-Maschine liegt bei einer Drehzahl von 2500 min^{-1} am höchsten ($\eta = 0.94$). Damit läßt sich die bezüglich Verschleiß ungünstige Getriebeübersetzung von $i = 1$ vermeiden und die elektrische Energie optimal nutzen. Angestrebt wird ein Übersetzungsverhältnis von $i = 0,88$. Die Dauerleistung des E-Maschine beträgt, siehe Abbildung 3, 35 kW bei einer sehr niedrigen Masse von 12 kg. Bei der Auswahl der Leistungselektronik wurde daraufgeachtet, dass der Systemverbund aus E-Maschine und LE bereits getestet wurde. Bezüglich der Batterien wird auf Lithium-Ionen-Technologie zurückgegriffen. Sie eignet sich aufgrund ihres robusten Aufbaus und ihrer hohen spezifischen Energie über eine hohe Zyklenzahl. Die im GATE-Antrieb einzusetzenden Batterien verfügen derzeit über die höchste spezifische Energie ($185 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$) in dieser Kategorie. Die Gesamtmasse des GATE-Antriebes von 321 kg teilt sich in die in Abbildung 5 dargestellten Teile auf. Unter "Diverses" sind Bauteile, wie z.B. Kühlsystem, Abgasnachbehandlung, Steuergeräte u.Ä. zusammengefasst.

Während bei Verbrennungstriebwerken Energiespeicher und Antriebsaggregat zu ungefähr gleichen Anteilen der Masse ausmachen, ist es bei einem elektrischen Triebwerk anders. Die Batterie nimmt den weitaus größten Anteil ein. Durch ihre, im Vergleich zu anderen Batterien, hohe spezifische Energie und die sehr geringen Massen der anderen elektrischen Komponenten wird der elektrische Strang leicht genug und die Hybridisierung beim GATE-Konzept möglich.

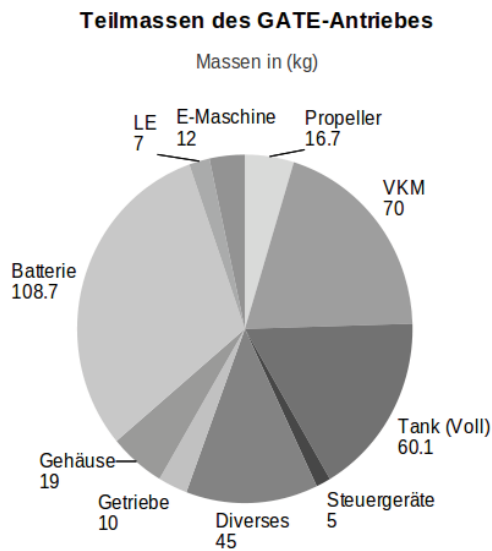


Abbildung 5: Teilmassen des GATE-Antriebes in [kg]

4.3 GATE-Leistungen und Vergleich

Als Retrofittriebwerk muss der GATE-Antrieb Leistungsdaten vorweisen, die ihn gegenüber den vorhandenen Motoren konkurrenzfähig machen. Um dies zu belegen wird ein Vergleich des GATE-Antriebes mit zwei wichtigen Kleinflugzeugtriebwerken in Tabelle 1 durchgeführt. Der Lycoming O-320 wird als Vertreter der den Markt dominierenden Motorenfamilie herangezogen. Als technologisch modernster Motor ist der Centurion 2.0 (C 2.0) von der Firma Centurion (ehemals Thielert) der zweite Vergleichsantrieb. Das Referenzflugzeug ist die Piper PA-28-161 bei maximaler Startmasse. Die in der Tabelle 1 enthaltenen Werte für den O-320 und C 2.0 sind den veröffentlichten Handbüchern entnommen. [17, 19] Als Versuchsgrundlage gilt die internationale Standardatmosphäre ISA sowie der Reiseflug in 3000 ft über Grund bei einer Fluggeschwindigkeit von 110 kn.

Die installierte Leistung P_{Max} des O-320 ist am höchsten. Trotzdem erreicht der GATE-Antrieb die höchste Maximalgeschwindigkeit v_{Max} von 134 kn, wenn die E-Maschine im Reiseflug dazugeschaltet wird. Aufgrund des günstigeren Treibstoffverbrauches hat der Centurion 2.0 die längste maximale Flugzeit t_{Max} . Die niedrige t_{Max} des GATE liegt an der begrenzten Kraftstoffmasse, die für den Referenzflugzyklus bemessen ist. Im Steigflug hingegen übertrifft der GATE-Antrieb beide Motoren. Die maximale Steigrate $w_{SteigMax}$ von $945 \frac{ft}{min}$ wird durch die

	O-320	C 2.0	GATE
Flugleistungen			
P_{Max} [kW]	118	99	105
v_{Max} [kn]	127	111	134
t_{Max} [h]	5,45	6,3	2,33
$w_{SteigMax}$ [$\frac{ft}{min}$]	680	606	945
$t_{Steig1000}$ [min]	1,47	1,6	1,05
$t_{Steig3000}$ [min]	4,4	5	3,17
Betriebsdaten			
m_{Nutz} [kg]	236	222	196
DOC [$\frac{Euro}{FZ}$]	252	160	141-161
b_{eReise} [$\frac{kg}{FZh}$]	0,33	0,23	0,26
CO ₂ [$\frac{kg}{FZ}$]	151	96,4	86

Tabelle 1: Motorenvergleich

hohe (spezifische) Leistung der E-Maschine erreicht. Dadurch ermöglicht er die niedrigsten Steigzeiten auf die Schwellen von 1000 ft bzw. 3000 ft. Die maximale Nutzlast m_{Nutz} des GATE-Antriebes wurde zu Gunsten einer höheren Batteriemasse soweit eingeschränkt, dass ein Pilot und ein Passagier plus 30 kg Gepäck mitgenommen werden können. Der C 2.0 ist als Dieselmotor etwas schwerer als der O-320, weswegen auch seine Nutzlast leicht vermindert ist. Trotz eines deutlich höheren Anschaffungspreises von ca. 67000 - 91000 €, liegen die vrsl. Betriebskosten DOC des GATE-Antriebes unter denen des O-320 bzw. C 2.0. Gegenüber dem O-320 ist der signifikant niedrigere Kraftstoffpreis (Mogas bzw. elek. Energie zu Avgas) der ausschlaggebende Faktor, wodurch sich die anfängliche Mehrinvestition nach 1-3 Jahren Betrieb amortisiert hat. Der C 2.0 ist aufgrund der Lebensdauer von 1500 h, je nach Anschaffungspreis des GATE teurer oder zum gleichen Preis zu betreiben. Bezüglich des spez. Kraftstoffverbrauches im Reiseflug (b_{eReise}) ist erwartungsgemäß der C 2.0 als Dieselmotor am besten. Da der b_{eReise} des GATE-Antriebes dem Niveau des C 2.0 nahekommt, ist er weit unter dem Verbrauch des O-320. Dies schlägt sich auch in seinen CO₂-Emissionen nieder. Verglichen mit dem O-320 ist eine Einsparung von 43 % möglich. Die VKM des GATE-Antriebes wird im Reiseflug mit lediglich 70 kW betrieben, weswegen die CO₂-Emissionen des bei 90 kW laufenden C 2.0 ca. 10 % höher sind. Die in dieser Studie verglichenen Daten zeigen, dass mit einer Hybridisierung, neben Einschränkungen bei der maximalen Flugzeit, auch eine deutliche Leistungssteigerung einhergehen kann. Dabei können die CO₂-Emissionen durch Verbrauchsreduktion und

	Variablen				
	P_{Ema} [kW]	m_{Nutz} [kg]	t_{Elek} [min]	t_{Max} [min]	N_{PR}
Privat	35	196	27,59	140	26
Gr. Nutzlast	35	236,2	18,87	140	18
Schulung	28	196	34,45	140	28

Tabelle 2: Auslegungsvarianten

die Schadstoffemissionen durch Abgasnachbehandlung stark verringert werden. Je nach Kraftstoffpreis ist auch eine Absenkung der Betriebskosten durch Hybridisierung erreichbar, wodurch ein Hybridantriebskonzept, wie der GATE, durchaus konkurrenzfähig sein kann.

Für den GATE-Antrieb gibt es weiterhin einige Auslegungsvarianten, da es nicht gelang, einen Antrieb zu entwickeln, der den Ansprüchen aller im Flugzyklus enthaltenen Betriebsszenarien gerecht wird. Sie sind in Tabelle 2 aufgeführt. Unterschieden werden drei Konzepte, in denen entweder die Größe der Batterie dem Zweck entsprechend angepasst oder die Leistung der E-Maschine gedrosselt wird. Für den privaten Gebrauch eignet sich, laut Flugzyklus, ein Flugzeug mit einer höheren Reichweite, aber niedriger Platzrundenanzahl N_{PR} besser. In diesem Fall wird Batteriemasse gegen Kraftstoff sinnvoll ausgetauscht. Die Reichweite dieser Variante kann durch eine geringfügig verkleinerte Batterie um 20 min gesteigert werden, sodass 95 % der ausgewerteten Flüge darstellbar werden. Alternativ kann auch die Batteriemasse verkleinert werden, um die volle Nutzlast des O-320-betriebenen Flugzeuges zu erreichen. Damit wäre die Mitnahme von zwei Passagieren plus Pilot wieder möglich. Um einen Schulungsbetrieb zu ermöglichen ist eine hohe Zahl an Platzrunden vonnöten, während die Anzahl der Personen an Bord ohne Einschränkung auf zwei begrenzt werden kann. Physisch ist diese Auslegungsvariante die gleiche wie die für den Privatflug. Bei ihr wird lediglich die Leistung der E-Maschine elektronisch gedrosselt. Eine Veränderung der Batteriemasse hingegen bedarf einer professionellen Werkstatt.

5 Diskussion

Die Ergebnisse der Berechnungen, die zur Umsetzung des GATE-Antriebes geführt haben, lassen Schlussfolgerungen zu, die sich in zwei Kategorien unterteilen lassen. Allgemein gültige Erkenntnisse,

die unabhängig von der untersuchten Flugzeugklasse sind und Schlussfolgerungen die sich ausschließlich auf Flugzeuge der E-Klasse beziehen. Sie sollen an dieser Stelle eingeordnet und bewertet werden.

Einer der entscheidenden Aspekte für die technische Machbarkeit des GATE-Antriebes ist der Dualismus aus mitführbarer Energie, die durch die zur Verfügung stehende Masse stark eingeschränkt ist und der effizienten Nutzung dieser mitgeführten Energie. Sowohl für die elektrische Energie der Batterie als auch für die chemische Energie im Tank hat die Betrachtung des Energieverbrauches und der effizienten Energienutzung eine entscheidende Bedeutung. Durch die motorischen Maßnahmen Direkteinspritzung, elektronische Gemischregelung und Abgasturboaufladung kann es gelingen seitens des konventionellen Antriebsstranges eine erhebliche Verbrauchseinsparung von 16 % im Reiseflug zu generieren, ohne dabei die Flugleistungen einzuschränken. Das bedeutet, dass die Einzelwirkungsgrade der VKM durch ein höheres Verdichtungsverhältnis, eine stöchiometrische Verbrennung sowie eine erhebliche Reduktion der mechanischen Verluste deutlich verbessert werden, was eine optimale Nutzung der mitgeführten Kraftstoffmenge zur Folge hat. Es entsteht weiterhin die Möglichkeit über die Motorsteuerung eine dynamische Leistungsaufteilung während des Fluges zu gewährleisten, d.h. den elektrischen Strang beliebig, je nach Betriebszustand und Leistungsabfrage zuschalten zu können. Für die effiziente Nutzung der elektrischen Energie der Batterie, wird ein intelligentes Batteriemanagementsystem benötigt, welches auf das jeweilig verbaute Batteriepaket angepasst ist. Es übernimmt die Überwachungsfunktion der Batterie. Dazu gehören die Überwachung des Ladezustandes der einzelnen Zellen, der über die Lebensdauer der Batterie entscheidet, die Steuerung der Energieabfrage, ein mögliches Laden während des Fluges usw.. Dies muss durch extensive Tests an einem Versuchsflugzeug entwickelt und erprobt werden.

Der ausschlaggebende Faktor, der über die Umsetzbarkeit von Hybridisierung in der E-Klasse entscheidet, ist der Propellerwirkungsgrad. Er beschreibt den Verlust zwischen Wellen- und Vortriebsleistung. Die aktuell zugelassenen Propeller des Referenzflugzeuges PA-28-161 besitzen im Punkt der höchsten Leistungsabfrage einen Wirkungsgrad von $\eta = 0,52 - 0,54$. Um die benötigte Wellenleistung und dadurch über die Reichweitenvorgaben, die Energiemenge soweit zu reduzieren, dass rechnerisch die Mitnahme eines zweiten Antriebs-

stranges darstellbar wird, muss der Propellerwirkungsgrad einen Wert von $\geq 0,85$ aufweisen. Durch die Veränderung der Blattgeometrie und einer Erhöhung der Blattzahl bei gleichbleibendem Propellerdurchmesser, können Wirkungsgrade dieser Größenordnung erzielt werden und sind in dieser Form für den GATE-Antrieb berechnet worden. Der dritte Einflussfaktor, von dem die Umsetzbarkeit der Hybridisierung von E-Klasse Flugzeugen und somit später auch die weitere Elektrifizierung unmittelbar abhängt, ist die spezifische Energie der Batterie. Momentan eignen sich für die Anwendung in der Luftfahrt, unter Berücksichtigung der Zulassungskriterien (Zykluslebensdauer, kalendarische Lebensdauer usw.) am besten Lithium-Eisenphosphat Zellen mit einer spezifischen Energie von $185 \frac{Wh}{kg}$. Diese spezifische Energie stellt die derzeit machbare, technische Grenze dar. Grundsätzlich wird aber davon ausgegangen, dass in Zukunft spezifische Energien von bis zu $1000 \frac{Wh}{kg}$ mit Lithium-Fluor oder Lithium-Luft Batterien zu erreichen sind. Konkret bedeutet dies, dass der gleichen benötigten Energiemenge eines Luftfahrzeuges, weniger als ein Viertel der im Moment verbauten Batteriemasse gegenübersteht. Bei einer Verdopplung der spezifischen Energie der Batterie, würde sich die elektrische Betriebszeit verdoppeln. Der Betrieb des elektrischen Stranges wäre bei gleicher Leistungsabfrage für eine Stunde möglich. Eine weitere Möglichkeit wäre auch die Elektrifizierungszahl zu erhöhen. Dann würde sich das Mild-Hybridkonzept in Richtung Full-Hybridkonzept verändern.

Neben den genannten allgemeingültigen Schlussfolgerungen lässt sich spezifisch für die E-Klasse feststellen, dass zwei Charakteristika dieser Flugzeugklasse der Hybridisierung entgegenkommen. Die relativ niedrigen Flugleistungen sind verantwortlich dafür, dass die absolute Energiemenge sowie die benötigte Wellenleistung verhältnismäßig gering ausfallen. Im Vergleich zu Flugzeugen wie verschiedene Light Sport Aircraft (z.B. Pipistrel Virus), die für hohe Reisegeschwindigkeiten und Steigraten ausgelegt wurden, sind die Leistungsanforderungen die das Schulungsflugzeug PA-28-161 (als Repräsentant der E-Klasse) stellt einfacher umzusetzen. Demnach reduziert sich wiederum die Masse, die in Form von Batteriezellen eingebaut werden muss. Dieser Beobachtung gegenüber steht der überdurchschnittlich hohe Kraftstoffverbrauch des in der PA-28-161 ursprünglich verbauten Antriebsaggregates. Beim GATE-Antrieb sollte die mitgeführte Kraftstoffmenge, durch die oben genannten motorischen Maßnahmen und den damit einherge-

henden Wirkungsgradsteigerung der VKM, deutlich effizienter genutzt werden können. Die Reduktion des spezifischen Kraftstoffverbrauches und die geringen Flugleistungen der PA-28-161 führen zudem, in Kombination mit einer hohen zur Verfügung stehenden Nutzlast, zur erfolgreichen Umsetzung des GATE-Antriebes. Obwohl der prozentuale Anteil der Nutzlast an der Flugzeuggesamtmasse sich von dem anderer Flugzeugklassen nicht unterscheidet, ist die große absolut verfügbare Nutzlast, ein Merkmal der untersuchten E-Klasse Flugzeuge. Das liegt einerseits an den 4 Personen (ohne Gepäck) oder 3,5 Personen mit Gepäck, die mitgeführt werden können. Andererseits ist auch die Tankmenge von vornherein größer. Beides zusammen begünstigt den Einbau eines zweiten Antriebsstranges.

Zusätzlich zu den Erkenntnissen zur Machbarkeit eines teilelektrischen Antriebes, lässt sich feststellen, dass das Baukastenprinzip bei der Umsetzung des GATE-Antriebes weitestgehend erfolgreich war. Bis auf die VKM und das Getriebe stehen geeignete Komponenten zur Verfügung, die den Leistungsanforderungen des GATE-Antriebes gerecht werden. Außerdem sind die Komponenten bezüglich der Zulassungskriterien für einen Einsatz in der Allgemeinen Luftfahrt geeignet. Die Anforderungen an die VKM liegen in einem Bereich, der sich technisch einfach realisieren lässt. Ohne passendes Motorkennfeld und praktische Erprobung ist die Auswahl einer VKM jedoch unzulässig. Beim Getriebe verhält es sich ähnlich. Durch das Baukastenprinzip und durch Weiterentwicklungen wird ermöglicht, dass der GATE-Antrieb für Testzwecke in Zukunft praktisch aufgebaut werden könnte. Abstimmungstests, Abgastests, Dauerläufe und Kostenaufstellungen müssen den praktischen Beweis der Umsetzbarkeit liefern.

6 Schluss

Auf dem Weg zur Elektromobilität in der Allgemeinen Luftfahrt stellt die Hybridisierung eine Zwischentechnologie dar. Sie eignet sich aber hervorragend, um Erfahrungen mit dem elektrischen Antriebsstrang zu sammeln und diesen weiterentwickeln zu können. Potenzial bieten in dieser Hinsicht auch andere Flugzeugklassen wie die G-Klasse (2-motorige Kolbenmaschinen) sowie E-Klasse Flugzeuge mit einem maximalen Abfluggewicht von größer zwei Tonnen. Als Zwischentechnologie hat die Hybridisierung auch die Aufgabe dem Benutzer die Möglichkeit zu liefern, sich an eine weitreichende technologische Veränderung zu gewöhnen. Dabei wird ein

entscheidender Aspekt sein, dass in Zukunft die Gesamtflugzeit und die Flugleistungen geringfügig eingeschränkt werden könnten, zugunsten von Kraftstoffverbrauch, Kohlendioxid- und Schadstoffaustoß und Bedienerfreundlichkeit. Durch eine praktische Umsetzung des GATE-Antriebskonzeptes gilt es diese Thesen zu überprüfen. Bei allem Potenzial, welches die Elektromobilität der Allgemeinen Luftfahrt bietet, sollte die Gesamtökobilanz nicht vergessen werden. Nur wenn der Kraftstoff Strom und dessen Bereitstellung CO₂-neutral sind, kann von einem entscheidenden Fortschritt in Bezug auf Umweltverträglichkeit gesprochen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] L. Burkardt, Lewis Research Center. General aviation light aircraft propulsion: from the 1940's to the next century, 1998.
- [2] DG Flugzeugbau GmbH. DG-1001TE - lautlos und sicher nach Hause kommen!, 2012. <http://www.dg-flugzeugbau.de/dg1000te-d.html>.
- [3] Lange Aviation GmbH. Antares 20E, 2011. http://www.lange-aviation.com/htm/deutsch/produkte/antares_20e/antares_20E.html.
- [4] CAFE-Foundation. Green Flight Challenge Sponsored by Google - Final Results, 2012. http://cafefoundation.org/v2/gfc_2011_results.html.
- [5] C. Gologan. PC-Aero, 2012. <http://www.pc-aero.de/>.
- [6] Yuneec International (China) Co. Ltd. Power Systems, 2011. http://yuneec.com/PowerMotor_Tech_spec.html.
- [7] Creative Solutions Alliance. Lindbergh Prizes, 2012. <http://lindberghprize.org/lindbergh-prizes/lindbergh-prizes/>.
- [8] Sonex Aircraft LLC. Sonex and AeroConversions E-Flight Initiative, 2012. <http://www.sonexaircraft.com/research/e-flight/electric.html>.
- [9] Digisky S.r.l. SkySpark, 2012. <http://www.skyspark.eu/web/eng/storia.php>.
- [10] Pipistrel d.o.o. Ajdoščina. Panthera, 2012. <http://www.pipistrel.si/plane/panthera/overview>.
- [11] Volta Volar. High Performance Efficient Aircraft With GT4, 2012. <http://www.voltavolare.com/>.
- [12] Embry-Riddle Aeronautical University. Eagle Flight Research Center, 2012. http://www.wix.com/embryriddle/greenflight3#!__eagle-flight-research-center/the-eco-eagle.
- [13] D. Aktas. DA-II Electric-Powered Sport Aircraft Utilizing Fuel Cell and Liquid Hydrogen Technologies, 2010. http://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/598.
- [14] S. Stückl. "the all electric aircraft" - emissions-freies fliegen im jahr 2035? In *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress Tagungsband – Manuskripte*, Bremen, Deutschland, 2010.
- [15] F. Stagliano. Modellierung von hybridelektrischen antriebssystemen für senkrecht-startfähige flugzeugkonzepte. In *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress Tagungsband – Manuskripte*, Bremen, Deutschland, 2011.
- [16] B. Geringer, W.K. Tober. Abgasemissionen, 2011. http://www.auto-umwelt.at/_emissionen/em_abg.htm.
- [17] Piper Aircraft Corporation. *Flughandbuch Piper PA-28-161 Cadet*. Piper Aircraft Corporation, Vero Beach, Florida, USA, Februar 1989.
- [18] E.G. Tulapurkara, S. Ananth, and Tejas M. Kulkarni. Performance Analysis of a Piston Engined Airplane - Piper Cherokee PA-28-180, February 2007. Report No: AE TR 2007-1.
- [19] Thielert Aircraft Engines GmbH. *Supplement Pilot's Operating Handbook*. Thielert Aircraft Engines GmbH, April 2011.