ResearchGate

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: http://www.researchgate.net/publication/282332453

TURBOWANKEL-TRIEBWERKS-FAMILIEN: NEUARTIGE ANTRIEBSKONZEPTE FÜR DIE ALLGEMEINE LUFTFAHRT DER ZUKUNFT

CONFERENCE PAPER · SEPTEMBER 2015

READS
9

4 AUTHORS, INCLUDING:



Peter Berg
Brandenburg University of Technology Cott…

5 PUBLICATIONS **1** CITATION

SEE PROFILE

Available from: Peter Berg
Retrieved on: 23 October 2015

TURBOWANKEL-TRIEBWERKS-FAMILIEN:

NEUARTIGE ANTRIEBSKONZEPTE FÜR DIE ALLGEMEINE LUFTFAHRT DER ZUKUNFT

H. P. Berg, U. Malenky, A. Himmelberg, M. Mykhalyuk
Lehrstuhl Verbrennungskraftmaschinen und Flugantriebe
Brandenburgische Technische Universität, 03046 Cottbus, Deutschland

Zusammenfassung

Vorgestellt wird eine sich in Produktion befindliche Wankel-Wellentriebwerksfamilie im Bereich 20kW bis 300kW und eine projektierte Turbowankel-Hybridtriebwerksfamilie (HSD Hybrid-Super-Drive) im Bereich 300kW bis 1500kW. Beide verwenden ein vielstofffähiges Brennverfahren, welches die Verbrennung von Kerosin/Diesel, Benzin, Alkoholen, gasförmigen Brennstoffen (bis Wasserstoff) etc. erlaubt. Die gewählten Triebwerksarchitekturen basieren auf modularen Wankelmotorenfamilien mit einem Kammervolumen von 350ccm, 500ccm je Rotor (beide in Produktion) und einem neu projektierten Parallel-Hybridtriebwerk mit einem Kammervolumen von 650ccm je Rotor. In Kombination mit einer reinen Turboaufladung kann der untere Leistungsbereich abgedeckt werden, währenddessen der obere Leistungsbereich mit einem innovativen elektrischen parallel-hybriden Turbo-Compound-Konzept abgedeckt werden soll. Hierbei wird eine neuartige luftgelagerte Turbomaschine mit integrierter E-Maschine zum Einsatz kommen.
Im Rahmen dieser Konzepte können leichte, für die Luftfahrt taugliche Antriebe mit variablen Leistungsbereichen geliefert werden, die auch universell für viele andere Anwendungen einsetzbar sind, die einen gleichförmigen, vibrationsarmen Lauf benötigen.
Es wird weiterhin auf die Vielstofffähigkeiten der Triebwerksfamilie eingegangen, welche aus den gewählten Brennverfahren resultieren. Dazu wird das gewählte Konzept der Hochdruck- Direkteinspritzung analog zu einer Brennverfahrensentwicklung von Curtiss-Wright und Eiermann vorgestellt. Dieses Konzept lässt durch ein Common-Rail-Einspritzsystem eine weitere Verbesserung der Motoreigenschaften, bis hin zu einem sparsamen Verbrauch von unter 230g/kWh im Diesel- oder Kerosinbetrieb, zu. Für das genannte Brennverfahren wird eine Strategie zur Entwicklung hocheffizienter Aggregate vorgestellt, welche bei einem sparsamen Verbrauch ein sehr geringes Systemgewicht bieten.
Insbesondere wird auf die Möglichkeit eingegangen, die Motorenoptimierung anhand von thermodynamischen Erkenntnissen durchzuführen. Hierbei werden die Verbrennungsparameter und der Ladungswechsel so gesteuert, dass ein optimaler Kreisprozess möglich ist. In diesem Rahmen wird die Brennverfahrens-Entwicklungsstrategie vorgestellt. Es wird kurz aufgezeigt, wie mit den Simulationen Erkenntnisse zum Ladungswechsel, zur Gemischbildung, zur Zündung und zum gesamten thermodynamischen Prozess für die Optimierung des Antriebs genutzt werden. Auf wichtige konstruktive Entwicklungsdetails des neuartigen, hybriden Flugantriebes wird eingegangen und am Beispiel eines Regionalliners wird die ökoeffiziente Wirkung des Parallel-Hybrid-Triebwerkes (HSD-Konzept basierend auf der Wankel-Technologie) exemplarisch aufgezeigt.

1. EINLEITUNG

Von der Flugtriebwerksbranche weitgehend unbemerkt wurde seit 2003 durch die Cottbusser Firma WankelSuperTec (www.wankelsupertec.de, [14]) das Kreiskolbentriebwerk erfolgreich weiterentwickelt.

Es entstanden Motoren, welche in den unterschiedlichsten Marktnischen (Blockheizkraftwerke, leichte Notstromaggregate, Range-Extender, Außenbordmotoren, Tragkraftspritzen, Vorheizkraftwerke, etc) zum Einsatz kommen und nun eine bewährte Basistechnologie für den Luftfahrtantriebssektor darstellen. Durch das exzellente Leistungsgewicht, durch die einfache Bauraumanpassung, durch das modulare Design und durch ihre Vibrationsarmut liefern sie die Grundlage für die Entwicklung neuartiger Antriebskonzepte für die allgemeine Luftfahrt der Zukunft. Auf Grund der vielen Anwendungsgebiete konnten diese Motorenkonzepte auch hinsichtlich der Lebensdauer und eines wartungsarmen Betriebes überzeugen, d. h. sie liefern auch das Potential für die luftfahrttechnisch geforderten TBO-Zeiten. Eine große Besonderheit der „Cottbusser Motoren“ stellt aber auch die Vielstofffähigkeit dar, die aufgrund des besonderen Brennverfahrens (Schichtladeverfahren [1]) neben der Nutzung von alternativen Brennstoffen den für die Luftfahrt wichtigen Diesel- und Kerosinbetrieb erlaubt [9]. Nach einem langjährigen Forschungs- und Entwicklungsprozess konnte die Basistechnologie erfolgreich in die Industrialisierung überführt werden. Konkret befinden sich Motoren mit einem 350ccm- und einem 500ccm-Kammervolumen in

der Produktion. Dank des zu Beginn der Entwicklung eingeführten Baukastenkonzeptes lassen sich 1-, 2-, 3- und sogar 4-Läufermotoren in „Industrie- oder High Performance- und Luftfahrtausführung“ realisieren. Das Baukastenkonzept ist möglich, da sich die Antriebe zum Ladungswechsel der Umfangsein- und Auslasssteuerung bedienen, welche dank des luftverdichtenden Verfahrens mit innerer Gemischbildung sinnvoll ist [17]. Der grundlegende technologische Stand kann diversen Veröffentlichungen ([3],[4],[5],[8]) entnommen werden. Die hohe Zuverlässigkeit des Motorenkonzeptes in der Dieselanwendung konnte durch den NATO-Zyklustest und FAR-Zyklustest schon in früheren Untersuchungen belegt werden. Das Brennverfahren wurde in der Vergangenheit ausführlich untersucht, weiterentwickelt und ist heute im serienmäßigen Einsatz zu finden [6],[21]. Auch wurde das für die Luftfahrttechnik so wichtige Leistungsgewicht umfangreich diskutiert. Das Leistungsgewicht des Wankeltriebwerks (3kW/kg) lässt sich im Bereich zwischen den Gasturbinen (bis 5kW/kg) und der im Betrieb befindlichen Flugmotoren (1kW/kg) ansiedeln. Das Triebwerk ist sehr einfach, leicht und kompakt aufgebaut (keine Ventile, Nockenwelle etc.) [15].



BILD 1. 858kW Triebwerk HSD 8650E-10, d.h. 8=2x4 Scheiben, 650ccm pro Rotor, E-10=10% der Maximalleistung durch die 2 E-Maschinen [2]

Es besitzt eine hohe Drehgleichförmigkeit und keine oszillierenden Massenkräfte, was zu einer sekundären Gewichtsersparnis am Propeller, im Getriebe und an den Strukturteilen (wie z. B. Triebwerksaufhängung) führt und einen hohen Komfort ergibt. Diese positiven Eigenschaften machen das Wankel-Triebwerk auch sehr beliebt im Bereich der ultraleichten und kompakten Stromerzeuger, wodurch sich wiederum ein möglicher Markt für die seriellen elektrischen Flugantrieb der Zukunft ergibt (vgl. hierzu auch [25], [33]). Mit einer flexiblen Turboaufladung lassen sich neben einem guten Brennstoffverbrauch, die Leistungsgewichte weiter steigern und die Anforderungen an die Flughöhenkompensation erfüllen. In Kombination mit einer Hochaufladung in Verbindung mit einer Abgasenergienutzung (Turbo-Compound wie beim HSD-Konzept, BILD 1) liegt das Verbauchspotential im Diesel-/ Kerosinbetrieb im Bereich von 210-230g/kWh.

2. ALLGEMEINES UND HINTERGRUND

Durch die beschriebenen Gegebenheiten lassen sich durch die Modulbauweise bereits mit den in der Produktion befindlichen und bewerten Basistriebwerken (Kammervolumenklassen 350 und 500ccm) große Leistungsklassenbereiche (20 kW bis 300 kW) abdecken [14], [34]. Die große Bandbreite wird durch 1-, 2-, 3- und 4-„Läufertriebwerke“ in Modulbauweise ermöglicht (siehe BILD 2). Aufbauend auf den Erfahrungen der Basistriebwerksfamilie (Kammervolumenklasse 500ccm) wurde eine eigene Voruntersuchung zum „Flugmotor 2030“ (BILD 1) mit der Projektbezeichnung HSD (Hybrid-Super-Drive) mit verbreiterten Kolben (Kammervolumenklasse 650ccm), paralleler E-Maschine, E-Turbolader (Basis MTiG) und E-Speicher durchgeführt. Dieses neuartige Flugmotorenkonzept deckt den Bereich nach oben bis 1500kW durch den konzipierten HSD 8650E-50 (50% der Maximalleistung durch die E-Maschinen) ab und nutzt die Vorteile der Wankeltriebwerkstechnologie in Verbindung mit einer Hochaufladung (MTiG-Technologie = Mikro Turbine mit integriertem Generator = luftgelagerter E-Turbolader).

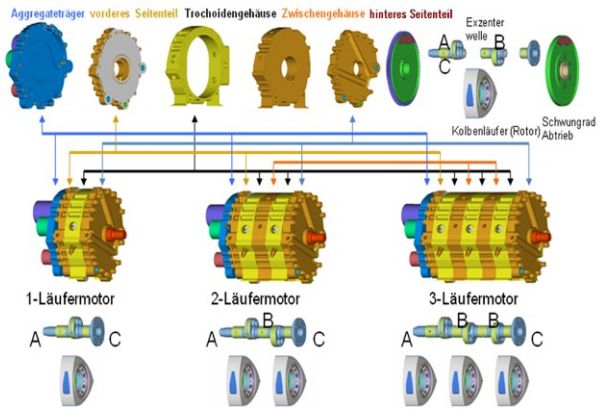


BILD 2. Beispielhafte Wankel-Motorenfamilie [6]

Verglichen mit Hubkolbenmotoren besitzen Wankeltriebwerke bei gleicher Leistung eine wesentlich geringere Teilezahl. Durch die spezielle konstruktive Ausführung mit einer hohen Gleichteilezahl werden Entwicklungskosten, Fertigungskosten und auch Kosten für die erforderliche Logistik minimiert. Die genannten guten spezifischen Kraftstoffverbräuche sind durch ein ausgeklügeltes Schichtladeverfahren möglich, welches die Nachteile des sichelförmigen Brennraumes durch „Eckenbereiche frei von Brennstoffgemisch“ beseitigt und somit auch zur Schadstoffreduktion beiträgt [6]. Die innere Gemischbildungsphase erfolgt im Überschneidungstotpunktbereich. Der Brennstoff wird dort in die entstehende Quetschströmung zur Gemischbildung eingetragen, welche durch die Verkleinerung des nacheilenden Volumens in Richtung des sich vergrößernden voreilenden Volumens entsteht. Der Kraftstoff wird durch einen Common-Rail-Injektor getaktet eingebracht. Für die Optimierung der lokalen zeitabhängigen Gemischbildungsqualitäten wurden die Brennraummuldengeometrie, die Spritzlochanordnung und die Zünd-/Glühkerzenlage in den vergangenen Jahren theoretisch und experimentell untersucht und im Motorenversuch validiert (vgl.[1],[7],[9],[13]). Die Seitenteile, die Zwischen- und Trochoidengehäuse bestehen aus fortschrittlichem, dünnwandigem Leichtmetallguss und können dank einer darauf angepassten

Konstruktion (Zuganker) die aus den hohen Verbrennungsdrücken resultierenden Reaktionskräfte aufnehmen. Da ein 2:3 Kreiskolbenmotor (KKM) zum Einsatz kommt, beschreibt der Kolben bei n Excenterwellenumdrehungen n/3 Kolben-Umdrehungen. Hierbei wurde das Verhältnis zwischen dem erzeugenden Radius (Strecke: Kolbenmittelpunkt-Dichtleiste) und dem Excenterradius (K-Faktor) sorgfältig gewählt, da es grundlegend die Hauptabmessungen, die Flammwege, das Oberflächen-/Volumen-Verhältnis und das Verdichtungsverhältnis beeinflusst (Verhältnis beim 500ccm und 650ccm Motors = 1:13,2). Bei 3 Excenterwellenumdrehungen laufen drei vollständige gleichmäßig phasenverschobene Arbeitsspiele bei einer Kolbenumdrehung ab. Hierzu würde ein 3-Zylinder-4-Takt-Hubkolbenmotor (HKM) zwei Kurbelwellenumdrehungen (Zündversatz von 240°) benötigen. Daraus resultiert ein Bauraum- und Gewichtsvorteil mit einem Faktor 2 (vergleichbar mit einem 2-Takt-Hubkolbenmotor). Die Drehmomentungleichförmigkeit eines 1-Läufer-Wankelmotors entspricht demnach derjenigen eines 3-Zylinder-Hubkolbenmotors (BILD 3: HSD-8-Scheiber = 24-Zylinder Hubkolbenmotor). Da ein Wankeltriebwerk keine oszillierenden Massenkräfte besitzt, ist auch die Kopplung von Doppelmotorenkonfiguration (BILD 3) sehr einfach. Auch ein Flugmotor mit 2x2, 2x3 oder 2x4 Scheiben, wie er in Kapitel 4 beschrieben wird, lässt sich hervorragend in Verbindung mit 2-E-Maschinen für Parallel-Hybrid-Konzepte unterschiedlicher Leistungsklassen nutzen (HSD-Familienkonzept). Durch die hohe Drehgleichförmigkeit ist das Triebwerk aber auch interessant für kleinere Range-Extender- bzw. Seriell-Hybrid-Konzepte ([7],[8]). Immerhin besitzt der einfache Einscheibenmotor schon die Drehgleichförmigkeit eines 3-Zylinder-Hubkolbenmotors, so dass bereits in der Vergangenheit Range-Extender-Konzepte mit einem kompakten Generator (E-Fahrzeuganwendung) erfolgreich realisiert wurden [8].

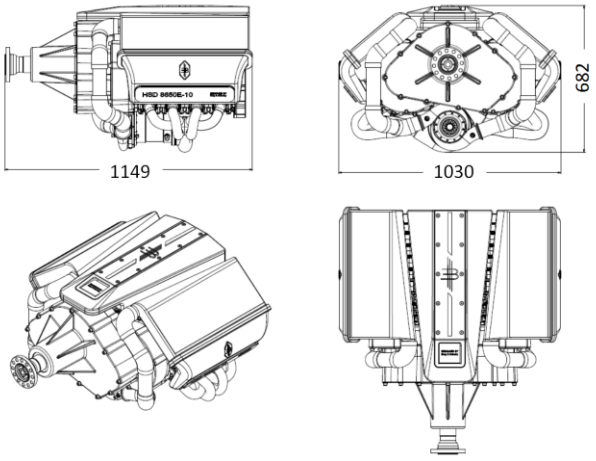


BILD 3. Kompaktes, leistungsstarkes 2x4-Scheiben-Turbowankel-Triebwerk, Drehgleichförmigkeit gleichwertig eines 24 Zylinder-Flugmotors (Konzeptbeispiel: HSD 8650E-10 Triebwerk) [2]

Bedingt durch die beschriebenen kinematischen Zusammenhänge dieses Triebwerkes, ergeben sich weitere Vorteile. So werden bestimmte Teile (z. B. Einspritzdüsen) nur 1/3-mal benötigt und die für das Brennverfahren wichtige Gemischbildungszeit ist im Verhältnis zum Hubkolbenmotor bei gleicher Drehzahl um den Faktor 3/2=1,5 länger. D. h. ein Wankeltriebwerk läuft bei etwa gleichen Gemischbildungs- und Zündverzugszeiten mit einer um den Faktor 3/2 höheren Drehzahl [15]. Verwirklicht das angestrebte Brennverfahren in diesem Beispiel den gleichen effektiven Mitteldruck, so ist die Leistung des Wankelmotors bei gleichem Hub-/Kammervolumen um 50% höher. Dies ist ein weiterer Beleg für die logische Entscheidung für das gewählte Triebwerkskonzept.

Seitens der Brennstoffflexibilität (alternative Brennstoffe in der Luftfahrt) bietet das Motorenkonzept auch gute Lösungen an ([7],[8]). So können beispielsweise gasförmige Brennstoffe (Wasserstoff, Flüssiggas, Biogas, Erdgas), über eine Nieder- und Mitteldruckeinblasung (die Gemischbildung erfolgt hier während der Ansaug- und Kompressionsphase vgl. [8],[9], BILD 4) eingebracht werden und flüssige Brennstoffe (Diesel, Biodiesel, Kerosin, Benzin, Alkohole...etc.) über die beschriebene Hochdruckinjektion eingespritzt werden [7].

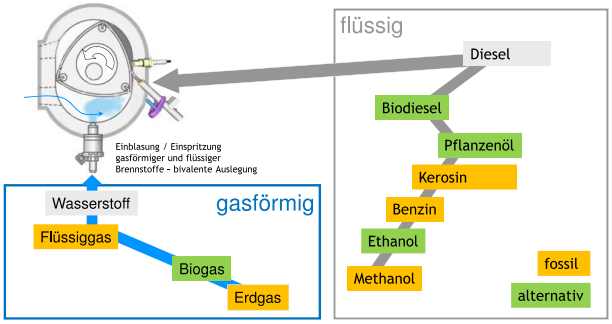


BILD 4. Vielstofffähigkeit des Triebwerkskonzeptes [7]

2.1. Brennverfahren des Diesel-/Kerosintriebwerks

Beim Arbeitsprozess des Wankelmotors und des Hubkolbenmotors gelten grundsätzlich die gleichen thermodynamischen Randbedingungen. Durch die länglichen Brennraumformen im Wankelmotor treten allerdings einige charakteristische Unterschiede auf, die einen erheblichen Einfluss auf die Realisierung des Brennverfahrens haben [6]. Anders als im Hubkolbenmotor ist beim KKM das Verdichtungsverhältnis durch die Tatsache begrenzt, dass die Kolbenkontur äußerstenfalls der Hüllkurve der Trochoiden entsprechen kann. Bei dem gewählten Prinzip hängt das Verdichtungsverhältnis nur noch vom K-Faktor und dem gewählten Muldenvolumen ab. Verdichtungsverhältnis und Muldenvolumen (Einfluss: Brennkammergröße, Gemischbildung, Quetschströmung, innere Verluste, etc.) haben aber eine direkte Auswirkung auf den gewünschten Brennverlauf. So ist beispielsweise ein reiner Dieselmotor bei der Erhaltung von wankelmotorischen Vorteilen nur mit einer hohen Vorverdichtung möglich. Aufgrund der geforderten Vielstoff-/Diesel- und Kerosintauglichkeit, war die Lösung zunächst nur auf dem Gebiet der hybriden Brennverfahren mit reiner Luftverdichtung zu suchen [5], [6],[7].

Bezüglich des Ladungswechsels wird mit einer Umfangssteuerung gearbeitet [15]. Da bei der Vorauswahl schon ein Turbomotorenkonzept gewählt wurde, konnte man schon in der Vorprojektierungsphase von einer guten Füllung ausgehen. Die bereits genannte, das Brennverfahren beeinflussende, Quetschströmung ist von der Geo-

metrieänderung bei unterschiedlichen Läuferstellungen und der Drehzahl abhängig. Beeinflusst wird das Brennverfahren stark durch die Kolbenmulde selbst (BILD 5, links), in Verbindung mit den Einspritzparametern, der Injektorlage und der Zünd- oder Glühkerzenlage. Hierbei ergeben sich sehr komplexe Zusammenhänge zwischen der Gemischbildung (BILD 5 rechts), der Ladungsschichtung, der Zündung, der Brennstoffumsetzungsrate, den Wandwärmeverlusten und der thermischen Belastung. Die Gasgeschwindigkeiten (bei 4000-6000 U/min) liegen relativ zur Trochoide bei ca. 80m/s (lokal auch höher), so dass die Flamme nicht stromauf laufen kann. Dies ist aber bei dem gewählten Ansatz nicht von Nachteil. Im Gegenteil, die Quetschströmung bietet günstige Voraussetzungen für eine Ladungsschichtung. Dieser Brennverfahrensansatz wurde somit auch gewählt und mit dem genannten Commonrailsystem realisiert [6],[13],[16],[18].

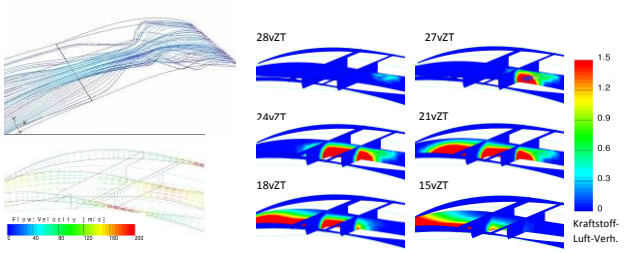


BILD 5. Beispielhafte Simulation zur Brennverfahrensentwicklung für Diesel-Wankel-Motoren [6]

Die in der Literatur beschriebenen Nachteile der wankelmotorischen Verbrennung beziehen sich auf den homogenen Betrieb (äußere Gemischbildung) und müssen bei dem gewählten Schichtladebrennverfahren in einem absolut anderen Licht gesehen werden. Bezüglich der Abgasemissionen wurden die ohnehin schon guten wankelmotorischen Stickstoffoxidwerte (ähnlich wie bei Schichtladungs-Hubkolbenmotoren) deutlich verbessert. Die Rohemissionen der Kohlenwasserstoffe können durch eine isolierte, sehr heiße Kolbenoberfläche deutlich unter die Werte des Hubkolbenmotors gebracht werden.

Basierend auf diesen und ähnlichen Erfahrungen wurden insbesondere von D. Eiermann (früherer Entwicklungsleiter von Felix Wankel) eine Vielzahl von Weiter- und Neuentwicklungen vorgenommen, welche heute dem eigenen Forschungs- und Entwicklungsteam zur Verfügung stehen und die Grundlagen für das hier vorgestellte Brennverfahren sind (vgl.[17])

Das Ziel bei der Brennverfahrensentwicklung ist die Realisierung von niedrigen Brennstoffverbräuchen (kleiner 230g/kWh Diesel), guten Kaltstarteigenschaften (mit Starthilfe bis -35°C) und hohen Triebwerkslaufzeiten. Das T-s-Diagramm (BILD 6) zeigt beispielshaft einen Vergleich zwischen einem modernen CR-Diesel-Hubkolbenmotor und einem Wankelversuchstriebwerk [5]. Die Maßnahme zur Erreichung des Entwicklungsteilziels „niedriger Brennstoffverbrauch“ kann nur durch eine Anpassung der Zyklusbereiche (A nach oben, B nach links), eine Optimierung der Wandwärmeverluste und der mechanischen Verluste erfolgen. Da der Kreiskolbenmotor eine andere Kinematik als der Hubkolbenmotor besitzt, sind vergleichende thermodynamische Diskussionen (HKM-KKM) nur im p-v-, q-v-, dq/dv-v- Diagramm oder am besten gleich im T-s-Diagramm mit p- und v–Hilfslinien sinnvoll. Eine Verbesserung der genannten Zyklusbereiche kann nur durch eine hohe Aufladung (wie beim HSD-Konzept, Druckverhältnis 3 bis 4) in Verbindung mit einer entsprechenden Brennstoffumsetzungsstrategie erfolgen. Diese ist von den Strömungs-, Einspritz-, Geometrie- und Zündverhältnissen abhängig.

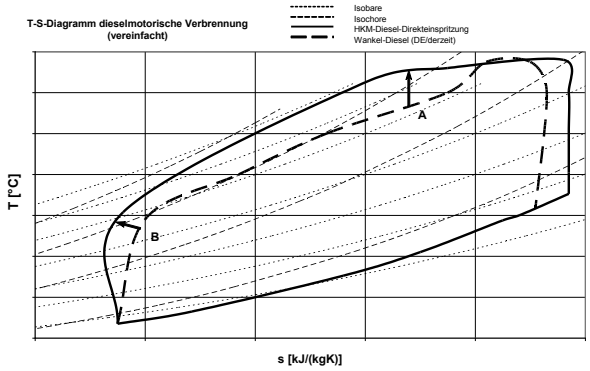


BILD 6. Vergleich der Direkteinspritzung zwischen Hubkolben- und Wankelmotor mit Entwicklungspotential [6]

3. TURBOWANKEL-HYBRIDKONZEPTE FÜR DIE ALLGEMEINEN LUFTFAHRT DER ZUKUNFT

3.1. Hintergrund zum elektrischen Fliegen

Man sollte niemals nie sagen. Das elektrische Fliegen könnte in der Zukunft deutlich an Bedeutung gewinnen, so die Meinung vieler Visionäre [25]. Aber der Weg dorthin wird auch hier nicht so gradlinig verlaufen wie man zunächst annimmt. Große Erfolge wurden bei den Elektroantrieben erreicht. So kann man heute bei den E-Antrieben von einem Leistungsgewicht von 5,2kW/kg ausgehen [28]. Die Nachteile stellen aber immer noch die elektrischen Speicher dar. Für den Einsatz mit kurzen Missionszeiten (bis zu einer Stunde) stehen heute bereits Lösungen zur Verfügung, welche rein elektrisch realisiert werden. Um dem Problem der langen Ladezeit zu begegnen, werden die Batterien am Boden einfach gegen volle ausgetauscht [33],[25]. Dies ist für kleinere Flugzeuge (wie sie beispielsweise in Flugschulen oder für Rundflüge zum Einsatz kommen) praktikabel und sinnvoll. Für größere Flugzeuge (mehr als 2 Passagiere) macht das Wechselsystem wegen der erforderlichen größeren Batteriekapazität keinen Sinn. Gleiches gilt bei einer Verlängerung der „rein elektrischen“ Flugzeit. Zu bedenken ist, dass bei Erhöhung der Flugzeit, das Abflugspeichergewicht (Batteriegewicht) deutlich steigt und sich dieses nicht während des Fluges verbraucht, wie es bei chemischen Energieträger der Fall ist (Ballastverlust, vgl. hierzu auch [38],[39]).

3.2. Serieller und paralleler hybrider Antriebe

Ganz anders sieht der Fall aus, wenn man einen hybriden Energiespeicher (serielles Hybridsystem) zur Elektroenergiebereitstellung einsetzt. Die Verhältnisse sind hier sehr ähnlich denen bei konventionellen Antriebssystemen, da

der Generator durch eine VKM (Verbrennungskraftmaschine) angetrieben wird. Durch die Kombination mit dem E-Antrieb besteht das Potential einer Effizienz- und Leistungsverbesserung, wenn man in der Lage ist, elektrische Energie zwischenzuspeichern. So kann man beispielsweise die stromerzeugende Generator-VKM-Einheit für den Reiseflug auslegen (Dauerleistung bei maximalem Wirkungsgrad) und für den „Start und den Steigflug“ dem E-Antrieb zusätzliche elektrische Energie über das Batteriesystem bereitstellen. Die Generator-VKM ()-Einheit (serielles Hybrid-System) und die VKM-Einheit bei einem parallelen Hybrid-System müssten in diesem Fall nur für ca. 60% der maximalen Antriebsleistung (Startleistung) ausgelegt werden, währenddessen die antreibende E-Maschine bei der seriellen Hybridanwendung für 100% (gesamte Startleistung) und bei der parallelen Hybridanwendung etwa für die maximale Leistung, abzüglich der Reiseflugleistung (ca. 40%) ausgelegt werden müsste. Bei einem Mischhybrid liegt der Prozentsatz missionsabhängig zwischen 40 und 100%. Im Fall eines E-Flugzeuges mit Range-Extender (serieller Hybrid) kann die VKM-Generator-Einheit mit einem deutlich kleineren Prozentsatz ausgelegt werden (je nach Mission).

Betrachtet man den möglichen mittelfristigen Marktbedarf an hybriden Antriebssystemen, so zeichnet sich ein kompaktes und leichtes VKM-Generatorsystem für die kleinen E-Flugzeuge für die seriellen Flugzeugsysteme (z. B. E-Fan 4.0 vgl. [40]) ab.

Für den oberen Leistungsklassenbereich könnte mittel- bis langfristig ein neuer Markt auf dem Gebiet der parallelen Hybridsysteme im Bereich bis 1500kW entstehen. Diese Antriebssysteme könnten als Mild- bzw. Medium-Hybrid oder als Voll-Hybrid realisiert werden. Aus diesem Grund wurde das Konzept einer weiterführenden HSD-Triebwerksfamilie (bis 1500kW) konzeptionell untersucht [2]. Die HSD-Triebwerksfamilie besitzt ein Kammervolumen pro Rotor von 650ccm und basiert auf der Grundlage des beschriebenen 500ccm- Kammervolumentriebwerkes, d. h. hier wird auf Erfahrungswerte und Erkenntnisse aus den validierten Komponenten- und Systemtests der 500er-Baureihen aufgebaut. Da weiterhin auch noch das beschriebene modulare Konzept zum Einsatz kommt, kann sich die unternehmerische Realisierung dieser neuartigen Flugmotoren-Familie wirtschaftlich darstellen lassen. Dies wird zusätzlich durch die mögliche Technologie-Synergie im Marine- und Automotivbereich unterstützt.

Als Hybridantriebe verwendet man heute beispielweise im Fahrzeugsektor serielle, parallele und leistungsverzweigte hybride Systeme ([37], [35]). Bei einem seriell angeordneten Hybridantrieb hat der zweite Energiewandler, wie zuvor beschrieben, keinerlei mechanische Verbindung mehr zur eigentlichen Antriebsachse. Meist treibt aber ein Verbrennungsmotor einen elektrischen Generator an, der die Antriebsenergie bereitstellt oder einen Akku lädt. Diese Funktionalität lässt sich aber auch mit einem Turbinengeneratorsystem oder und einem Brennstoffzellensystem darstellen (vgl. [10], [41])

Beim parallelen Hybridantrieb (wie beim HSD-Familienkonzept) wirken elektrischer Antrieb und Verbrennungsmotor gemeinsam auf den Antriebsstrang. Dabei können Kräfte oder Drehmomente der einzelnen Antriebe auch gleichzeitig abgerufen werden. Das ermöglicht eine schwächere Auslegung des Elektromotors und des Verbrennungsmotors. Dadurch können Kosten, Gewicht und Bauraum gespart werden.

Weiterhin sind leistungsverzweigende Hybride oder auch Mischhybride für Luftfahrtanwendungen denkbar.

3.3. Stromerzeuger für ein serielles Luffahrtantriebssystem

„TurboWankel-Triebwerks-Familien: Neuartige Antrieb für die allgemeine Luftfahrt der Zukunft“ lautet der Titel. Wankelmotoren, und hier insbesondere die turboaufgeladenen leistungsstarken, vielstofffähigen Wankeltriebwerke, wie sie als Basistechnologie im Rahmen dieser Veröffentlichung vorgestellt werden, könnten in der Zukunft eine große Rolle spielen. Einerseits sind Antriebe, welche mit alternativen Brennstoffen zurecht kommen, in der Zukunft erforderlich. Anderseits spielen auch leistungsstarke kompakte Energiewandler und Hybridantriebe eine große Rolle auf dem Weg zum Elektroflugzeug. Beides besitzt der Wankelmotor und konnte deshalb schon zu Beginn der automotiven Elektromobilität seine Vorteile deutlich herausstellen (siehe [36], [37]). Insbesondere wurde im Rahmen der vorangegangenen Arbeiten der Wankelmotor in Kombination mit einem Generator bereits für Range-Extender-Systeme und im Rahmen von seriellen Antriebskonzepten erfolgreich eingesetzt. Das System basierte hier auf dem 350ccm-Kammervolumen-Motor [7]. Am häufigsten wurden Einläufersysteme zusammen mit einem Generator realisiert (Ausführungsbeispiele siehe BILD 7).

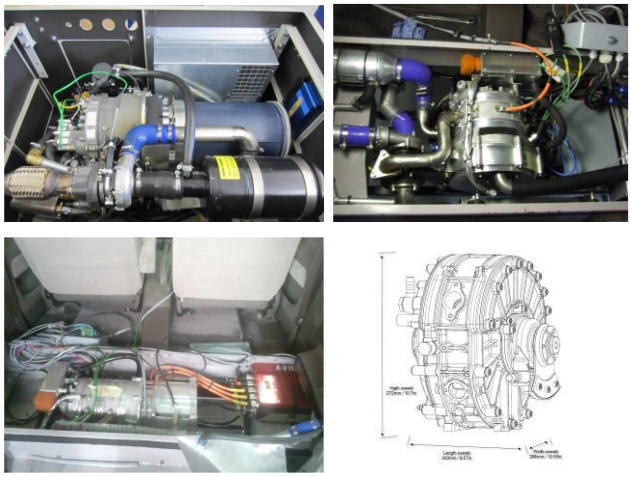


BILD 7. Anwendung eines Wankelmotors in einem seriellen Hybridsystem

Dieses Triebwerk kann in einer wasser-, einer reinen glykol- oder ölgekühlten (Heißkühlung) brennstoffflexiblen Bauweise ausgeführt werden. Die Heißkühlung hat den Vorteil, dass kleinere Kühler (geringerer Luftwiderstand und weniger Kühlmittel) verwendet werden können. Da für diese Anwendung eine sehr hohe Flexibilität bei den Einbauverhältnissen gefordert wird, spielt neben dem Gewicht auch das Volumen (Packaging) eine große Rolle. Die Größenverhältnisse dieses Basis-Triebwerkes können BILD 7 entnommen werden. Das Basisvolumen dieses Triebwerkes von 272mm x 243mm x 268mm (ca.17,7 Liter) stellt das Minimum dar.

Die Wankelfamilien für die serielle Luftfahrt- und Fahrzeuganwendung werden sinnvollerweise in 2 modularen

Familienkonzepten realisiert, so dass der Leistungsbereich gleichförmig abgedeckt werden kann. Der derzeitige Entwicklungsstand zeigt Prototypen im Leistungsklassenbereich von 35kW-90kW (BILD 8).

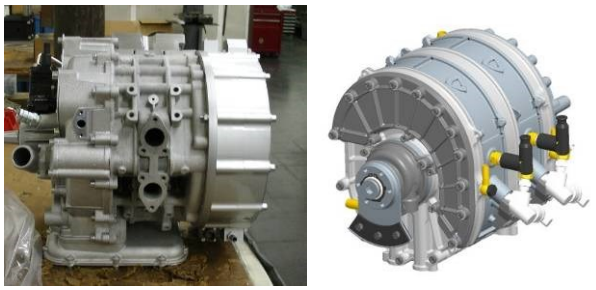


BILD 8. Beispiel einer 50kW-Rangeextender-Einheit (Einscheiber 500ccm) und einer 70kW-Einheit (Zweischeiber 350ccm)

In der Entwicklung befinden sich z. Z. 2 Range-Extender-Familien. Der Bereich bis 105kW kann durch die in BILD 8 dargestellte 350er-Triebwerksfamilie abgedeckt werden.

Der Bereich 50kW-300kW wird durch die 500er-Familie bestehend aus 1- ,2- und 3-Scheiber abgedeckt.

4. FLUGMOTOR 2030 MIT LEITUNGSSTARKEM PARALLEL-HYBRID-ANTRIEB

Eine Alternative für einen effizienten und schadstoffarmen Flugbetrieb können Hybridtriebwerke aus Wankelmotoren und E-Maschinen darstellen. Dabei können mit dem System eine hohe Energieeffizienz sowohl für Start- und Steigphase, wie auch für den eigentlichen Reiseflug erreicht werden.

4.1. Schadstoffminimierung durch den elektrischen/coelektrischen Flugbetrieb

Im Rahmen internationaler Vereinbarungen hat die UN-Organisation ICAO festgehalten, dass zwischen 2005 und 2050 die CO_2-Emissionen um 50% verringert werden soll. Zudem soll durch effizientere Kraftstoffnutzung jedes Jahr mind. 1,5% Kraftstoff eingespart werden. Letztlich soll ab 2020 eine weitere Steigerung der Flugkapazitäten nur noch CO_2-neutral erreicht werden [1], [23].

Eine solche Emissionsreduzierung kann nur durch effizientere Triebwerke, ein optimales Flugmanagement und durch die Nutzung alternativer Kraftstoffe erreicht werden. Man benötigt also Kraftstoffe aus regenerativen Rohstoffen oder auch emissionsfrei nutzbare Energieformen. So wird der Elektrifizierung oder einer Teilelektrifizierung der Luftfahrt gute Chancen eingeräumt, zukünftig einen wirkungsvollen Beitrag am umweltfreundlichen Fliegen liefern zu können [24], [25].

Unter dieser Vorgabe kann ein passend abgestimmtes hybrides Triebwerk aus Wankelmotor und E-Maschine einen wichtigen Beitrag zur Modernisierung und Schadstoffreduzierung in der Luftfahrt leisten. Neben einer hohen Effizienz bietet das Kolbensystem auch gute Möglichkeiten der Schadstoffreduzierung, wobei das System vor allem für kleinere Maschinen mit Passagierkapazitäten von bis zu 60 Plätzen eine Alternative darstellen könnte.

4.2. Flugmotor der Zukunft: die HSD-Familie

Die Baureihen der Twin-Pack-Triebwerke stellen eine Kopplung von 2 Rotorbänken dar. Für die projektierten Motoren erscheinen 2x3 und 2x4 Bauarten mit und ohne E-Maschine (abhängig von der Hybridisierung) als sinnvoll. 2x(2+E) Bauarten kommen für einen hohen Hybridisierungsgrad (ab 50:50) in Frage, da die relative Baulänge einer 1x4+E Einheit zu groß wird. Die angedachten Bauarten können durch die Modulbauweise mit 350ccm- und 500ccm-Kammervolumen-Scheiben realisiert werden. Für das Flugmotorenkonzept 2030 wurde basierend auf der 500er-Technologie, durch Verbreiterung des Kolbens um den Faktor 1,3, das architektonische Konzept entwickelt. Der Grundaufbau dieser 650er-Kammervolumen-Bauart ist in den Bildern BILD 9 und BILD 13 dargestellt.

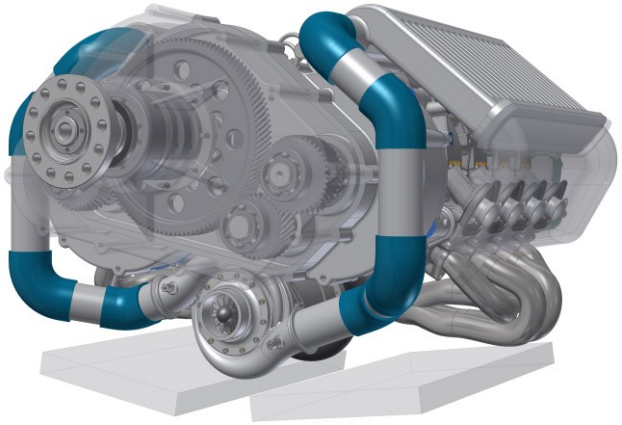
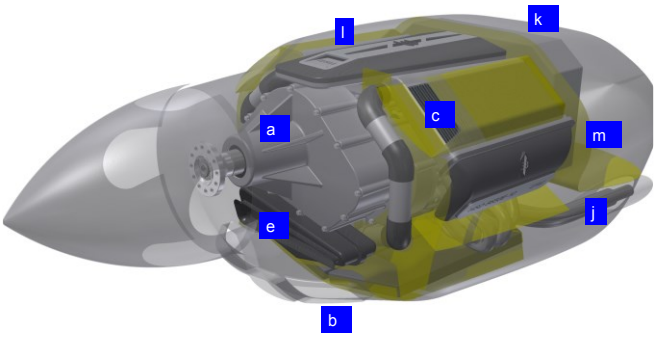


BILD 9. „Flugmotors 2030“/ HSD-Konzept: hybrides Turbo-Wankel Twin-Pack-Triebwerk [2]

Um eine optimale Zuströmung zur Turbine zu erhalten, die Motorenfüllung zu erhöhen und das Packaging zu verbessern wurden die beiden Bänke um einen Winkelbetrag gegenüber der Einzelbankausführung gedreht und die Motoren gegenläufig realisiert. Gleichläufige Anordung hat den Nachteil, dass die Abgas- und Ansaugkanäle den Ladungswechsel negativ beeinflussen und die Anordnung der Einspritzdüsen und Zündkerzen nicht in einem zentralen Bereich erfolgen können. Die Winkeldrehung wurde so realisiert, dass die Zugänglichkeit der Zündkerzen und der Einspritzdüsen montagefreundlich ist (BILD 9). Das Sammelgetriebe kann mit Übersetzungsverhältnissen von 1:2 bis 1:4 ausgeführt werden. Da die Motoren gegenläufig drehen, ist ein Zwischenzahnrad erforderlich. Die Lage wurde so gewählt, dass die Deaxierung der Propellerwelle nur unerheblich ist. Durch den symmetrischen Aufbau ergeben sich positive Effekte auf die thermische Situation unter der Verkleidung. So werden beispielsweise die 2 Ladeluftkühler über die beiden symmetrisch angeordneten Lufteinläufe (links und rechts) angeströmt.

Die Luft überströmt nach dem Durchströmen der Wärmetauscher die oberen Motorenbänke in Richtung der zwei heißen Bögen. Diese werden aus luftfahrttechnisch optimierten Lanzettrohrwärmetauschern aufgegebaut

werden [11]. Danach durchfließt sie den kompakten Motorraum (in Richtung der Turbine) um letztendlich über dem zentralen Abgasdiffusor auszuströmen und mit dem Abgas zu mischen. Um ein optimales Packaging zu erhalten, wurden die Wasser und Ölkühler unterhalb des Triebwerkes (siehe BILD 10) installiert. Die Luft strömt über den zentralen unteren Einlauf ein und strömt als Teilstrom durch den Luftfilterkasten dem Kompressor des E-Zentralturbos (MTiG-Technologie) zu. Dieser kann ein Druckverhältnis von 4 realisieren. Die komprimierte Luft strömt zu der integralen Ladeluftkühler-Ansaugbrücke (links und rechts), um nach dem Abkühlen über die Ansaugtrichter den Motor zu laden. Der zweite Teilstrom strömt durch den unteren Raum zu den Wasser- und Ölkühlern und strömt unterhalb des zentralen Abgasdiffusors aus. Ein entsprechendes Schottarangement (in den Bildern gelb dargestellt) erlaubt eine optimale Thermalsituation. Die Motorentechnologie entspricht dem beschriebenen Verfahren. Beide Bänke stellen in sich eigenständige Triebwerke dar.



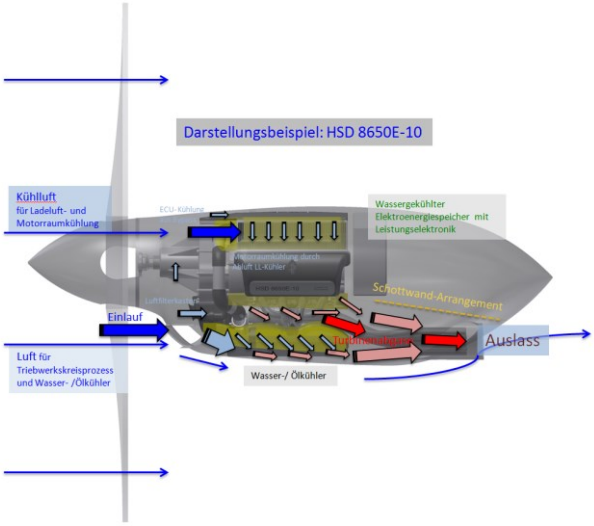


BILD 10. Beispiel eines HSD 8650 mit Verkleidung [2]: a) Getriebe mit 2 E-Maschinen pro Bank, b) unterer Einlauf, c) oberer Einlauf für Ladeluftkühlung, d) Ladeluftkühler mit integrierter Zulaufbrücke, e) Luftfilter, f) Wasser- und Ölkühler, g) MTiG-Technologie (E-Zentralturbo), h) Turbinenzulauf, i) Turbinenaustritt, j) Abgas-Luftmischer, k) Batteriesytem, l) ECU, m) hintere Schottwand/ Schott- und Leitwände sind gelb dargestellt.

Die Ankopplung an das Sammelgetriebe kann je nach Klasse mit einem Freilauf der beiden Rotationskolbenbänke erfolgen, so dass bei Ausfall oder Abschaltung einer Einheit die verbleibende Einheit die Schlepparbeit der anderen nicht mit übernehmen muss. Der Rotationskolbenmotor besitzt keine oszillierenden Massenkräfte und -momente deshalb bleibt in diesem Fall die Vibrationsqualität gleich. Da das Triebwerk in diesem Fall aber seine Drehgleichförmigkeit verändert und dies theoretisch eine Rückwirkung über das Propeller-Reaktionsmoment hat, erfolgt im Falle der erneuten Triebwerksbankzuschaltung eine Synchronisation durch die Exzenterwellenwinkeldetektierung. In Kombination mit E-Maschinen (Booster / Hybridisierung) kann die Synchronistaion von hoher Qualität erfolgen. Das in diesem Beitrag dargestellte 2x4-Wankeltriebwerk hat eine Drehgleichförmigkeit der einzelnen Bank vergleichbar mit einem V12-Hubkolbenmotor, so dass Drehgleichförmigkeitseinflüsse hierbei unbedeutend sind.

Eine mögliche Hybridbauart geht von jeweils einer festverbundenen E-Maschine pro Bank aus. Die Antriebsbank (Turbo-Wankeltriebwerk mit E-Maschine) wird über das Sammelgetriebe wie beim Antrieb ohne E-Maschine gekoppelt und zum Antrieb der Propellerwelle genutzt (in der Diskussion ist z. Z. ein Freilauf jeweils zwischen der E- und Wankelmaschine). Im Reiseflug liefert der luftgelagerte [43] Generator des E-Zentralturbos (MTiG-Technologie) aus dem überschüssigen Turbinengefälle elektrische Leistung (18-25%, je nach Flughöhe), welche zum Antrieb durch die E-Maschine und/oder zum Laden des E-Speichers (Akkumulator oder/und Superkondensatorsystem) genutzt wird. Im übertragenen Sinn stellt der Antrieb bei den zwei beschriebenen Hybridbauarten im Falle der energetischen Nutzung des Turbinengefälles durch die E-Maschinen für die Antriebsaufgabe ein Turbo-Compound-System dar. Der Antrieb befindet sich dann im „ECO-Modus“. Beim Flugzeug-Start oder bei erhöhter Steigleistung während der Mission wird der Antrieb in einem „Boost-Modus“ betrieben. Hierbei arbeiten die E-Maschinen und die beiden Wankeltriebwerke bei maximalem Ladedruck. Der Ladedruck wird hierbei durch die MTiG auf den zulässigen Wert angepasst.

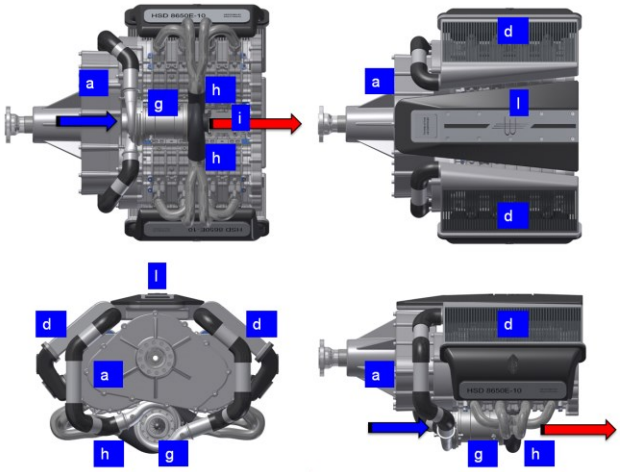


BILD 11. Beispiel eines HSD 8650, Beschreibung wie BILD 10

Die E-Maschinen beziehen ihre Zusatzenergie auch aus dem E-Speicher (Akkumulator oder/und ggf. Superkondensatoren). Mit den E-Maschinen ist auch der Sinkflug energetisch nutzbar, da diese über den Propeller „Bremsenergie“ über die Generatorfunktionen im E-Speicher abladen können. Durch die synergetische Verbindung der Turbomaschine, der 2 Haupttriebwerksbänke und der E-Maschinen in Verbindung mit einem intelligenten Ener-

giemanagementsystem arbeitet ein Hybrid AeroProp besonders leise und vibrationsarm. Die Haupttriebwerksbänke wirken in Verbindung mit der MTiG-Technologie (E-Zentralturbo) wie zuvor beschrieben. Durch die synergetische Verbindung mit den E-Maschinen, in Verbindung mit Kraftweichen, könnte dieser Antrieb die Grundlage für das elektrische Fliegen darstellen. Erfahrungswerte aus der Automobilindustrie ließen sich bei diesem Projekt sinnvoll übertragen.

4.3. Beispielhafte Anwendung eines hybriden Flugmotors in einem Regionalliner

Die Vorteile des Einsatzes eines HSD-Triebwerkskonzeptes in Kombination mit einem geeigneten E-Speichersystem kann am Beispiel eines Regional-Zubringerflugzeugs demonstriert werden (BILD 12). Für dieses Beispiel wurden zwei 975kW HSD 6650E-40-Triebwerke gewählt. Diese besitzen Wankel-Twinpacks mit 2x3 Scheiben (650ccm Kammervolumen) und einem E-Motorenleistungsanteil von 40% der Maximalleistung. Die Triebwerksarchitektur entspricht in ihrem grundlegenden Aufbau dem zuvor dargestellten HSD 8650E-10-Triebwerk.

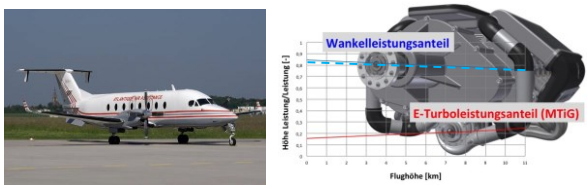


BILD 12. Regionalliner Beechcraft 1900D [32] (links), Aufteilung der Leistungsanteile zwischen Wankel- und Turbomaschine über der Höhe (rechts)

Eine Beechcraft 1900D (BILD 12) mit einem max. Gesamtgewicht von ca. 7500kg ist für den Transport von 19 Passagieren und bis zu 3 Besatzungsmitgliedern mit 2 Triebwerken PT6A-65B mit je 865kW Leistung ausgestattet. Dabei wird die max. Leistung nur für den Start benötigt. Im eigentlichen Reiseflugmodus (Cruise) werden auf einer Flughöhe von 7500m nur noch ca. 60% der Leistung von den Triebwerken, d. h. ca. 521kW abgefordert. Durch die Einführung eines hybriden Triebwerks aus Elektroantrieb und Wankelmotor ist es möglich den CO_2-Fussabdruck des Fliegers deutlich zu verringern.

Im Rahmen der Entwicklungslinie für Wankelmotoren mit einem Kammervolumen von 650ccm kann ein Twinpack-Dreischeiber (2x3) aufgebaut werden, der eine max. mechanische Leistung von 585kW liefert und damit die Erfordernisse der Cruise-Leistung für das Regionalflugzeug abdeckt. Die für eine 15-minütige Take Off- und Climb-Phase benötigte, höhere Leistung kann durch ein zusätzliches elektrisches Motorensystem, das 40% der Gesamtleistung liefern muss, erzeugt werden.

Beim konzipierten, mit einem E-Zentralturbo aufgeladenen Triebwerk werden je 292,5kW Leistung durch zwei 3-Scheiben-Wankelmotoren geleistet. Dazu werden vor jedes Pack Elektromotoren mit je 195kW Zusatzleistung geschaltet (2x3+E). Über das zuvor dargestellte Kopplungsgetriebe werden die hybriden Wankelsysteme zu einem Twinpack verschmolzen, das die Startleistung von bis zu 975kW aufbringen kann. Geht man von einer Startzeit von 15 min. mit Volllast aus, benötigt das E-Triebwerk ca. 98kWh elektrische Energie, um das Flugzeug auf Reiseflughöhe zu transportieren. BILD 13 zeigt die Zusammenstellung eines solchen Triebwerks. Die elektrische Energieversorgung der Startunterstützung erfolgt über Li-Po-Batteriesysteme. Neueste Batterietechnik des KIT Karlsruhe [26],[30],[31] ermöglicht eine Speicherdichte von 430Wh/kg bei einem spezifischen Volumen von 2,3 kWh/l, so dass die Energie je Triebwerk in einer Batterie mit ca. 227kg Gewicht und einem Volumen von 42l gespeichert werden kann. Dazu muss eine moderne Leistungselektronik von ca. 160kg (Continental [27]) mitgeführt werden. Moderne Elektromotoren, die auch in Flugmotoren eingesetzt werden können, haben laut Siemens schon aktuell ein Leistungsgewicht von 5,2kW/kg [28] und ergeben so ein Gewicht des E-Antriebs von ca. 75kg

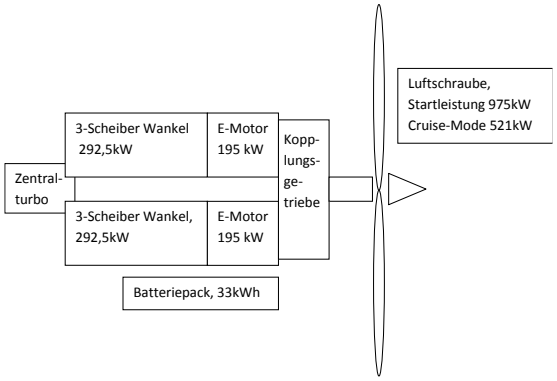


BILD 13. Motorenkonzept für einen Hybrid-Flugmotor

Berücksichtigt man nun das Mehrgewicht des Wankel-Triebwerk-Systems, so kann trotzdem aufgrund der höheren Effektivität des Triebwerks von einer Kraftstoffeinsparung von ca. 90l Kerosin auf einem zweistündigen Flug ausgegangen werden. Damit erreicht man eine Kraftstoffeinsparung von mehr als 12% des Gesamtverbrauchs durch die Verwendung eines hybriden Flugmotors.

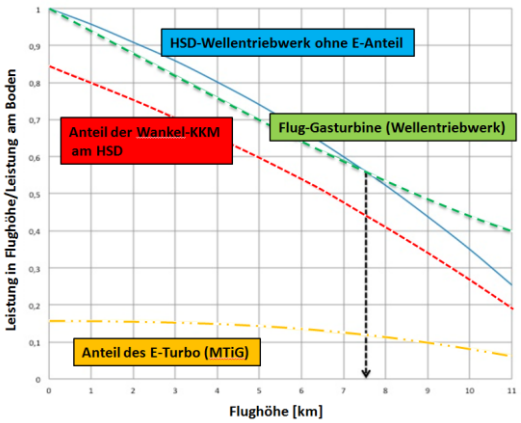


BILD 14. Relativer Vergleich der Leistung eines Gasturbinenflugtriebwerks nach [29] (grüne Kurve) mit dem HSD-Wellentriebwerk ohne E-Energieeinsatz aus der Batterie

Die Dienstgipfelhöhe der Beechcraft 1900 liegt bei ca. 7500m. In höheren Luftschichten hat ein Wellentriebwerk aufgrund der verringerten Luftdichte Leistungsverluste auszugleichen. In BILD 14 wird der Leistungsverlust mit zunehmender Flughöhe eines Flugtriebwerks auf Turbomaschinenbasis zum HSD-Triebwerk in den Vergleich

gesetzt. Das HSD-Triebwerk (hier ohne E-Energieeinsatz) hat bis 7500m eine höhere relative Leistung. Durch Zusatz von E-Energie könnte diese noch einmal deutlich erhöht werden. Im vorgestellten Hybrid-Triebwerk könnte der Leistungsverlust in höheren Luftschichten (über 7,5km) durch Anpassung der Aufladung und einer Veränderung des Verbrennungsluftverhältnisses mit dem vorgestellten Konzept angepasst werden. Auch ist eine zusätzliche Energiezufuhr durch den E-Turbolader denkbar (je nach Missionsanforderungen/Auslegung). Gleichzeitig sind Leistungsreserven vorhanden, um das Batteriesystem für den nächsten Startvorgang aufzuladen. Insgesamt wird der Kraftstoffverbrauch während des Cruisens auf eine effektive Leistungsabnahme des Wankelsystems reduziert. Damit ist gegenüber einem Turboprop-Triebwerk eine weitere Kraftstoffeinsparung möglich. Zudem kann mit einer verringerten Baugröße der Triebwerksgondel kalkuliert werden.

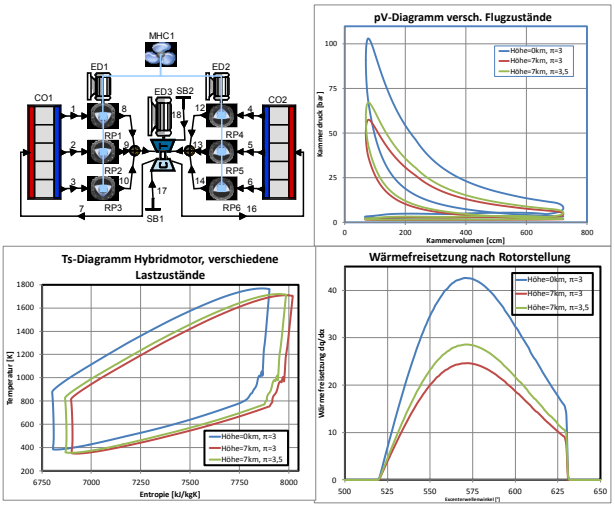


BILD 15. Beispielhafte Simulations- und Analyseansätze für das untersuchte Motorensystem

In weiteren Untersuchungen sollen Simulation und Analysen die Leistungsfähigkeit des Verbrennungsmotors verbessern und mit der Gesamtflugzeugsimulation das Einsatzszenario des Hybridsystems in Regionaljets optimiert werden. Dazu gehören auch CFD-Simulationen zur Optimierung von Kühlung, Verbrennungssystem und Triebwerksumströmung. BILD 15 zeigt dazu Methoden zur eindimensionalen Simulation und Analyse des untersuchten Kreiskolben-Hybrid-Motorensystems [1],[5].

5. FAZIT

Durch die Entwicklung eines Hybridtriebwerks aus Twinpack-Wankelmotor und elektrischer Maschine kann ein energiesparender Flugmotor auf Basis der Wankeltriebwerkstechnologie in Verbindung mit einem Elektro-Zentralturbo entwickelt werden. Durch den Elektro-Zentralturbo (hier MTiG-Technologie) wird ein ca. 20%iger Zusatzenergieanteil bereitgestellt, welcher aus der Verwertung der Abgasexergie (Verglichen mit herkömmlichen Verbrennungsmotoren) resultiert. Das Motorenkonzept entspricht in der Prozessführung dem eines Turbo-Compound-Antriebes. Kombiniert mit einer E-Maschine lassen sich die Emissionen eines Flugzeugs stark vermindern. Durch das HSD-Konzept, welches seitens des Verbrennungskraftprozesses auf Cruising-Leistung ausgelegt ist, wird der Grundstock für einen effizienten Luftfahrtantrieb gelegt. Die ergänzende E-Maschine kann während der Startphase die notwendige Überlast aus hocheffizienten Batteriesystemen entnehmen, die über den Strecken- und Sinkflug wieder für den nächsten Start (oder Fluglevelanpassung) aufgeladen werden können. Durch die hohe Brennstoffflexibiltät der WST-Wankelmotorentechnologie können auch CO_2-neutrale Kraftstoffe zum Einsatz kommen. Hierdurch kann der CO_2-Fussabdruck eines Regionalliners weiter verringert werden, so dass mit dem Flugmotor 2030 ökoeffizientes Fliegen ermöglicht wird.

Durch die Verwendung hocheffektiver Speichersysteme und moderner Materialien kann die beschriebene Leistung des Systems weiter gesteigert werden, so dass die Maschinen auch die gewünschten Ziele 2050 der ICAO/ACARE einhalten können [22],[23],[42]. Weiterhin konnte ein Einblick in den fortgeschrittenen Stand der Wankeltechnologie gegeben werden und die große Familienkonzeptbandbreite aufgezeigt werden. Eine Basis für neuartige Antriebskonzepte für die allgemeine Luftfahrt der Zukunft wurde gelegt.

Danksagung

Die Autoren danken den Mitarbeitern der WankelSuperTec GmbH für die stetige kooperative Zusammenarbeit auf dem F&E-Gebiet der Kreiskolbenmotoren.

Einen ganz besonderen Dank gilt dem in diesem Jahr am 23. Februar 2015 verstorbenen Gründer und Geschäftsführer der WST GmbH und Altpräsident der BTU-Cottbus Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Dr. Dr. Ernst Sigmund.

Schrifttum:

[1] H. P. Berg, H. T. Izweik, T. Poojitganont, O. Antoshkiv: Anwendung fortschrittlicher Simulationswerkzeuge in der Wankelmotorenentwicklung ATZ / MTZ - Konferenz Virtual Powertrain Creation 2006.

[2] H. P. Berg, U. Malenky: Designstudie zum HSD-Flugmotorenkonzept, Vorarbeiten zum Flugmotor 2030, LS VFA/ BTU CS August 2015

[3] O. Antoshkiv, A. Himmelberg, H. P. Berg: Optimierung der Zündkerzenposition in einem Wankelmotor, Motorische Verbrennung, Heft 7.1, S: 351 - 360, BEV, Motorische Verbrennung, März. 2007

[4] H. Izweik: Interner Bericht zur numerischen Berechnung der Gasströmung in einem rotierenden Modell mit AVL Fire am LS VFA/BTU Cottbus

[5] T. Poojitganont, H. P. Berg, H. T. Izweik, A. Himmelberg, Multi-fuel Wankel Engine for Small Aircrafts and UAVs Applications: Strategies of the Engine Development, ISABE-2007-1128

[6] H.P. Berg, Antoshkiv, O., et. al.: Brennverfahrensentwicklung für eine neuartige Kreiskolbenmotorenfamilie, ATZ / MTZ - Konferenz Virtual Powertrain Creation 2008

[7] H. P. Berg: Entwicklung eines neuartigen, vielstofffähigen Range-Extenders für zukünftige Elektrofahrzeuge, ATZ/TÜV Süd Konferenz, Engine.Tech 2009, Wolfsburg, Germany, June 2009

[8] H. P. Berg, P. Steinberg: Vielstofffähiger "Turbo-Range-Extender (TRE)" - Ein technologischer Anstoß für die Elektromobilität der Zukunft, Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs VII, Haus der Technik, Berlin 2010

[9] H. P. Berg, O. Antoshkiv, P. Steinberg, E. Sigmund: Entwicklung von „Multifuel Power Unit (MFPU)“ - Familien für die Anwendung in zukünftigen hybriden Gasfahrzeugen. "Gasfahrzeuge - Die Schlüsseltechnologie auf dem Weg zum emissionsfreien Antrieb der Zukunft?", Expert-Verlag, Renningen, 2008,
[10] H. P. Berg, Y. Reichel, M. Neumann, O. Antoshkiv: Turbo Range Extenders – Recuperative Micro Gas Turbines as an Alternative Concept of Energy Conversion in Plug-In Hybrid Vehicles, 11th Stuttgart International Symposium Automotive and Engine Technology, 22 and 23 February 2011,Stuttgart, Germany
[11] S. Ahlinder, V. Biesold, H. P. Berg: Hot side flow investigation on the exhaust case of a recuperated industrial gas turbine, BTU Cottbus, Forum der Forschung, Vol. 10, Issue 19, Cottbus, Germany, 2006
[12] S. Ahlinder; H. P. Berg; E. Reile: Modelling of compact tube bundle heat exchanger as porous medium using Reynold’s analogy, EUROTHERM 82, Numerical Heat Transfer, Cliwice-Cracow, Poland, 2005
[13] R. Klotz, D. Eiermann, S. Kolossow: Abschlußbericht zum Projekt „Untersuchung der Tauglichkeit des WANKEL-Kerosin-Kreiskolbenmotors für den Einsatz in der allgemeinen Luftfahrt“ der Wankel-Rotary GmbH 1999
[14] Internetpräsentation der Wankelsupertec GmbH http://www.wankelsupertec.de, abgerufen am 21.08.15
[15] W. D. Bensinger: Rotationskolben-Verbrennungsmotoren, Springer 1973
[16] T. Muroki, Y. Moriyoshi, M. Takaki: Combustion Characteristics of a Direct Injection Stratified Charge Rotary Engine Using Spark Ignition an Pilot Flame Ignition Systems, SAE-Paper 2002-32-1791
[17] D. Eiermann, R. Nuber, J. Breuer, M. Soimar, M. Gheorghiu: Experimentelle Untersuchung zur Entwicklung eines kleinen Rotationskolbenmotors mit zusätzlicher Zündung und Betrieb mit Dieselöl, Wankel R&D, Lindau, DE; Rotary Power International, Wood-Ridge, US, SAE Technical Paper Nr. 930683 (1993), S. 1-12
[18] R.W. Loyd: Curtiss-Wright Stratified-Charge Rotary Engine Development, Combustion Science and Technology, Vol. 12, S. 44-61 (1976)
[19] J. Abraham, F. V. Bracco: 3-D Computations to Improve Combustion in a Stratified-Charge Rotary Engine, Part IV: Modified Geometries, SAE Techn. Paper Nr. 930679 (1993), S. 1-13
[20] F. Pischinger, G. Adomeit, et al.: Abschlußbericht zum Sonderforschungsbereich Motorische Verbrennung SFB 224, RWTH Aachen 2000
[21] H. P. Berg, X.-M. Chen, F. Liu, O. Antoshkiv - Einsatz von neuartigen Entwicklungswerkzeugen bei der Brennraumgestaltung von Flugmotoren, Jahrbuch 2002 Band II der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt – Lilienthal-Oberth e.V. (DGLR), Bonn
[22] P. Fonta: Pushing the Technology Envelope, ICAO Secretariat: Aircraft Technology Improvements – ICAO Environmental Report 2010
[23] ICAO Secretary General: Assembly Resolutions in Force, ICAO 2007
[24] T.C. Gmelin, G. Hütting, O. Lehmann: Summarized description of aircraft efficiency potentials taking account of current engine technology and foreseeable medium-term developments, Abschlussbericht, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, FKZ UM 07 06 602/01, Berlin 2008
[25] D. Empl, C. Lorenz, et al.: Essential Raw Materials For The Electrification Of Aircraft, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2014, DocumentID: 340117
[26] M. Landgraf: Forscher steigern Energiedichte von Lithiumspeichermaterialien, Pressemitteilung des KIT Karlsruhe und HIU Ulm, Karlsruhe, 15.3.2015
[27] K. Pudenz: Continental Leistungselektronik wird kompakter und leistungsfähiger, Springer für Professionals, Nachrichten aus der Branche - Automobil- und Motorentechnik vom 27.04.2015
[28] F. Anton: Siemens entwickelt Weltrekord-Elektromotor für Luftfahrzeuge, Pressemitteilung Siemens AG v. 24.03.2015, http://www.siemens.com
[29] S. A. Tereshchenko, Y. Matveevich: The theory of aviation gas turbine engines, National Aviation University Press 2005
[30] R. Chen, R. Ren, M. Knapp, R. Witter, M. Fichtner, H. Hahn: Disordered Lithium-Rich Oxyfluoride as a Stable Host for Enhanced Li + Intercalation Storage, Advanced Energy Materials, Wiley 02/2015
[31] L. Gaines, R. Roy Cuenca: Costs of Lithium-Ion Batteries for Vehicles, Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, Argonne 2000
[32] „Atlantique Air Assistance B190 F-GNBR“ von Juergen Lehle - Eigenes Werk (See also AlbSpotter Flugzeugbilder Aircraft Photos). Lizenziert unter CC BY-SA 3.0 über Wikimedia Commons - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atlantique_Air_Assistance_B190_F-GNBR.jpg #/media/File:Atlantique_Air_Assistance_B190_F-GNBR.jpg
[33] M. Gründer: Werden wir bald elektrisch fliegen, Flugrevue 11/2012
[34] Wankelsupertec, BTU Cottbus-Senftenberg, Prof. H. P. Berg: ILA2014, Handzettel zum Flugmotor KKM 352
[35] H. Tschöke: Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer, Wiesbaden 2015
[36] T. Grünweg: Audi A1-E-Tron - Wankelmut im Elektroauto, Spiegel-Online vom 11.11.2010, http://www.spiegel.de/
[37] P. Hoffmann: Hybridfahrzeuge, ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft, DOI 10.1007/978-3-7091-1780-4, Springer-Verlag, Wien 2014
[38] X. Zhu, Z. Guo, Z. Hou: Solar-powered airplanes: A historical perspective and future challenges, Progress in Aerospace Sciences 71(2014)36–53
[39] Federal Aviation Administration: Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge, Chapter 9, Oklahoma City 2008
[40] Airbus Group: E-FAN-THE NEW WAY TO FLY, Broschüre, München 2015
[41] H.P. Berg, U. Malenky, O. Antoshkiv, R. Mattke: Kompakte hocheffiziente Mikrogasturbine mit integriertem Generator (MTiG) – eine Komponente für die seriellen hybriden Antriebssysteme der Elektroflugzeuge von morgen, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Rostock 2015
[42] ACARE: FlightPath 2050 Goals, esp.: Protecting the environment and the energy supply, http://www.acare4europe.com/sria/flightpath-2050-goals, abgerufen am 31.08.2015
[43] N. Prechavut, H.P. Berg: An experimental study on structural characteristics of cantilever-type foil bearings, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Rostock 2015