

KOMPAKTE HOCHEFFEKTIVE MIKROGASTURBINE MIT INTEGRIERTEM GENERATOR (MTiG): EINE KOMPONENTE FÜR DIE SERIELLEN HYBRIDEN ANTRIEBSSYSTEME DER ELEKTROFLUGZEUGE VON MORGEN

H. P. Berg, U. Malenky, O. Antoshkiv, R. Mattke
Lehrstuhl Verbrennungskraftmaschinen und Flugantriebe
Brandenburgische Technische Universität, 03046 Cottbus, Deutschland

Zusammenfassung

Bei der Neugestaltung unserer zukünftigen Lebensräume sucht die Forschung nach neuartigen Lösungen für die bodengebundene Mobilität. Weiterhin spielt die Erforschung umweltverträglicher Antriebstechnologien für die Luftfahrt der Zukunft eine wichtige Rolle. Neben den rein elektrischen Antrieben stehen insbesondere fortschrittliche hybride Antriebssysteme im Vordergrund. Systemlösungen werden kurz- bis mittelfristig für die unbemannten Flugzeuge und die allgemeine Luftfahrt benötigt. Es werden effiziente Flugantriebssysteme benötigt, die gegenüber aktuellen Antriebssystemen deutlich weniger Schadstoffe emittieren und Brennstoffressourcen schonen. Dabei bietet der Elektroantrieb ein großes Potenzial. Aufgrund des derzeit ungünstigen Verhältnisses zwischen Gewicht und Energieinhalt bei Traktionsbatterien ist jedoch die rein elektrische Flugweise nur für einen sehr kleinen Anwendungsbereich interessant. Deshalb müssen Elektroluftfahrzeuge mit zusätzlichen Energiewandlern und Speichern ausgestattet werden, um akzeptable Reichweiten und Antriebsleistungen bei moderaten Kosten zu gewährleisten. Als zukunftsfähiges Antriebskonzept wird u.a. das hybride elektrische Antriebssystem mit Kleinenergieerzeugern zur Reichweitenverlängerung angesehen. Für den Einsatz als Range-Extender stehen unterschiedliche Konzepte zur Verfügung, die eine Umwandlung von chemischer in elektrische Energie ermöglichen. Die Spezifikation eines Range-Extenders hängt dabei sehr stark von den Anforderungen an zukünftige Antriebskonzepte ab. Das bedeutet, dass Einbauraum, Gewicht, Kosten und Vielstofftauglichkeit eine neu zu definierende Gewichtung im Auswahlprozess des Energiewandlers erhalten. Schwerpunkt des Beitrages ist die Entwicklung und Applikation eines alternativen Energieumwandlungskonzeptes für E-Luftfahrzeuge traditioneller Bauweise (z.B. zur Verlängerung der Reichweite bei E-Kleinflugzeugen) und für innovative Luftfahrzeuge (als systemintegraler Bestandteil). Bei diesem Konzept handelt es sich um eine Mikrogasturbinen-Generator-Einheit, welche durch einen Rekuperator (Wärmetauscher zur Abgaswärmenutzung) einen hohen Wirkungsgrad ermöglicht und durch eine weitere Prozesshybridisierung (z.B. mit eingebetteter SOFC) auch für nicht luftfahrttechnische Bereiche interessant ist. Es werden die Mikrogasturbinen-Generator (MTG)–Basistechnologie beschrieben und die Leistung, der Wirkungsgrad und die Vielstofffähigkeit diskutiert. Außerdem wird eine kompakte Abwandlung mit integriertem Generator (sogenannte MTiG) dargestellt. Weiterhin wird die Bedeutung der Mikrogasturbinenbauart für ein zukünftiges MTG/MTiG-SOFC-Hochwirkungsgradsystem erklärt und die hohe luftfahrttechnische Tauglichkeit der kompakten, rekuperierten MTiG-Mikrogasturbinentechnologie für die seriellen hybriden Flugtriebwerkssysteme aufgezeigt.

1. EINLEITUNG

Zukünftige Luftfahrtgeräte sollen deutlich umweltverträglicher werden. Deshalb wurden die Umweltziele von ACARE [1] für das Jahr 2020 gegenüber einem Ausgangswert aus dem Jahr 2000 anspruchsvoll definiert. Es wird zum Beispiel eine Reduzierung der CO₂-Emissionen um 50% je Passagierkilometer verlangt. Desweiteren sollen die NO_x-Emissionen um 80% und der Fluglärm um 50% gesenkt werden. Der Weg zur Realisierung der gesteckten Ziele ist mit hohen technischen Herausforderungen verbunden, insbesondere da die genannten drei Kriterien gleichzeitig am Fluggerät erfüllt werden müssen. Konventionelle Triebwerksausführungen zeigen, dass bei

gleichzeitiger Verringerung der CO₂-, NO_x- und Lärm-Emission ein erheblicher technischer Aufwand erforderlich ist. Bei dem Abkommen des Global Aviation Sector 28 (umfasst IATA, ACI, CANSO und ICCAIA; [2], [3]) wurden die internationalen und nationalen Verfahren und das Ziel zur Emissionsminderung festgelegt. Hierbei sollen die CO₂-Emissionen folgendermaßen abgebaut werden:

- Abbau um durchschnittlich 1,5% pro Jahr bis 2020
- Stabilisierung der Netto-CO₂-Emissionen ab 2020 zur Erzeugung eines klimaneutralen Wachstums
- Zielerreichung in 2050: Die CO₂-Emission darf dann nur 50% des Wertes von 2005 betragen.

Mittel- bis langfristige Maßnahmen zur Zielerreichung befassen sich mit Lösungen außerhalb des konventionellen Triebwerks- und Flugzeugdesigns. Hierbei werden die Gesamtarchitektur des Fluggerätes und der Betrieb grundlegend überdacht. Man rechnet mit einer CO₂-Emissionsminderung durch die Triebwerke von ca. 15-20%. Flugzeugseitig werden ca. 20-25% erwartet und seitens des Flugverkehrsmanagements und der Betriebseffizienz sollen ca. 5-10% ermöglicht werden. Eine Minderung von Emissionen, insbesondere CO₂ kann nur durch die Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades des Fluggerätes erzielt werden. Eine signifikante Wirkungsgraderhöhung neben den herkömmlichen Maßnahmen kann auch durch die Kombination konventioneller Antriebe mit elektrischen Antrieben dargestellt werden. Nach Auffassung verschiedener Forscher und Entwickler kann durch eine intelligente Kombination von E-Antrieb und Verbrennungskraftmaschine (Hubkolben-, Kreiskolben-, Gasturbinentriebwerk) der Gesamtwirkungsgrad bei Einhaltung der zuvor genannten Ziele und des Abfluggewichtes erhöht werden. Das Ziel der Forscher, ein „Regionalflugzeug mit Hybridantrieb“ zu realisieren, könnte mit der Variante eines Parallelhybridtriebwerkes mittelfristig umgesetzt werden (vgl. HSD-Konzept [11]). Währenddessen gestaltet sich die Umsetzung einer seriellen Variante für diesen Klassenbereich durch das höhere Gewicht komplexer und kann deshalb nur als längerfristige Maßnahme zur Zielerreichung dienen. Als kurz- bis mittelfristige Maßnahme kann der serielle Hybridantrieb bei kleineren Flugzeugen angesehen werden (FAN 4.0 [13]). Er stellt auch eine „Zukunftsvorbereitung“ für das reine elektrische Fliegen (Pure Electric) dar und kann als Übergangsphase bis zur Verfügbarkeit der erforderlichen Batterietechnologie angesehen werden. Das öffentliche Interesse am elektrischen Fliegen ist groß und so findet man heute eine Vielzahl von visionären Publikationen und auch schon ersten Erfahrungsberichten mit ein- und doppelstzigen Elektroflugzeugen (vgl. E-Genius, Elektra Solar One, E-Fan 1.0, [14]). Getrieben durch die Entwicklungsaktivitäten des Automobilsektors wurde hier ein neuer Pioniergeist geweckt. Mit dem Blick auf den möglichen Zukunftsmarkt mit großem Potenzial befassen sich aktuell auch internationale Konzerne mit dem Thema des elektrischen Fliegens. Gemeinsam mit Airbus arbeitet beispielsweise die Firma Siemens daran, die Vision des elektrischen Fliegens umzusetzen. Während Airbus sich mit neuartigen Luftfahrtkonzepten befasst, entwickelt Siemens neue elektrische Antriebsstränge.

2. CHEMISCH-ELEKTRISCHER ENERGIEWANDLER FÜR DIE ELEKTRO-LUFTFAHRT

2.1. Allgemeines

Für die langfristige Sicherung der Allgemeinen Luftfahrt werden wie zuvor beschrieben effiziente Antriebssysteme benötigt, die gegenüber aktuellen Flugmotoren deutlich weniger Schadstoffe emittieren und Brennstoffressourcen schonen. Dabei bietet die Elektromobilität ein großes Potenzial. „Kleinflugzeuge mit Elektroantrieb halten Einzug in die Allgemeine Luftfahrt“. So plant beispielweise Airbus neben einigen mittelständigen Unternehmen Ende 2017 den vollelektrischen Zweisitzer (E-Fan 2.0) auf den Markt zu bringen. Aufgrund des derzeit ungünstigen Verhältnisses zwischen Gewicht und Energieinhalt der

Batteriespeicher ist jedoch die reine elektrische Flugweise nur für einen speziellen Anwendungsbereich mit kurzen Missionszeiten (beim E-Fan 2.0 sind es ca. 1 Stunde zzgl. 30 Minuten Reserve [14]) interessant. Deshalb müssen Elektroflugzeuge mit zusätzlichen Energiewandlern und –speichern ausgestattet werden, um akzeptable Reichweiten zu gewährleisten. Hierbei ist das gesamte System (Propeller/E-Antrieb/Hybrider Energiespeicher/Steuerung, etc.) zu bewerten. Seitens des elektrischen Antriebes konnte in der Vergangenheit bereits eine Leistung zu Gewichtsverhältnis von ca. 5 kW/kg nachgewiesen werden. Neben der optimierten Abstimmung zwischen der Leistungselektronik und der E-Maschine, spielt die konsequente Umsetzung der Konstruktion in eine Leichtbauform eine große Rolle. Die Energie kann bei elektrischen Systemen beispielsweise aus Batterie- oder Superkondensator-Speicher (oder eine Mischung aus beiden) oder durch einen sogenannten hybriden Energiespeicher (chemischen Brennstoffspeicher + chemische-elektrischer Energiewandler) bereitgestellt werden. Bei den hybriden Energiespeichern spielt die effektive Wandlung der chemischen Energie in elektrische Energie (hoher Wirkungsgrad) bei einem geringen Gewicht eine große Rolle. Dies kann im Einzelfall durch eine Verbrennungskraftmaschine (VKM z.B. Gasturbine oder Verbrennungsmotor) mit Generator, durch ein Brennstoffzellensystem oder durch eine beliebig sinnvolle Kombination der Systeme (z.B. Turbo-Compound- oder Gasturbinen-Brennstoffzellen-Generatorsystem) erfolgen. Eine weitere Variabilität ergibt sich durch den Energieträger, welcher zur Zeit ein flüssiger Brennstoff (Diesel, Kerosin, Benzin) ist. Zukünftig könnte sich aber auch der zum Einsatz kommende „chemische Energieträger“ ändern (z.B. wenn sich eine Wasserstoffwirtschaft durchsetzt oder „Bibrennstoffe“ zum Einsatz kommen). Für den Einsatz mit kurzen Missionszeiten (1-2 Stunden) stehen heute bereits Lösungen zur Verfügung, welche rein elektrisch realisiert werden. Um dem Problem der langen Ladezeit zu entgegnen, werden die Batterien am Boden einfach gegen volle ausgetauscht. 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 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 Energieträgern der Fall ist (Ballastverlust). Ganz anders sieht der Fall aus, wenn man einen hybriden Energiespeicher (chemisches-elektrisches Wandlersystem) zur Elektroenergiebereitstellung einsetzt. Die Verhältnisse sind hier nämlich denen bei konventionellen Antriebssystemen sehr ähnlich, da der Generator durch eine Verbrennungskraftmaschine (VKM) angetrieben wird und die positive Wirkung des Ballastverlustes gegeben ist. Durch die Kombination mit dem E-Antrieb besteht sogar das Potenzial einer Effizienz- und Leistungsverbesserung wenn man in der Lage ist, elektrische Energie zwischenspeichern. So kann man beispielsweise die stromerzeugende Generator-VKM-Einheit für den Reiseflug auslegen (Dauerleistung bei maximalem Wirkungsgrad) und für den „Startfall“ dem E-Antrieb die erforderliche elektrische Energie über das Batteriesystem bereitstellen. Im Fall des Steigfluges können sich das Hybride- und das Batteriespeichersystem energetisch ergänzen und im Sinkflug ist Energie durch den als Gene-

rator wirkenden E-Antrieb rekuperierbar. Die Generator-VKM-Einheit müsste in diesem Fall bei langen Missionen nur für die Reiseflugleistung (ca. 60% der Steigleistung) ausgelegt werden. Hierbei sind Leistungs- zu Gewichtsverhältnisse der elektrischen Maschine von ca. 5 kW/kg und ein Leistungsgewicht von ca. 1kW/kg der VKM-Generatoreinheit realisierbar. So plant Airbus bereits den E-Fan 4.0, einen Viersitzer, welcher als hybride Variante frühestens 2019 marktreif sein soll [13].

2.2. Serielle Hybride Systeme

In Projekten zukünftiger hybrider Systeme für Fluganwendungen, z.B. E-Thrust oder E-Fan, soll ein nicht unwesentlicher Anteil (25 bis 100%) der für eine Mission benötigten Energie durch Akkumulatoren bereitgestellt werden. Trotz beachtlicher Fortschritte in der Batterietechnik scheinen Kapazitäten von 0,4 kWh/kg nicht kurzfristig und postulierte Energiedichten von bis zu 3.0 kWh/kg nur langfristig erreichbar. Marktreife Batteriesysteme mit ca. 0,2 kWh/kg stehen flüssigen Energiespeichern (Flugtreibstoff) mit ca. 11,5 kWh/kg gegenüber. Eine Möglichkeit, die Vorteile des elektrischen Fliegens mit den hohen Speicherdichten konventioneller Treibstoffe zu verbinden, liegt in der Entwicklung eines hybriden Speichersystems. Innerhalb dieses hybriden Speichers wird die chemisch im Treibstoff gebundene Energie durch eine beliebige Verbrennungskraftmaschine zunächst in mechanische und dann durch Generator und Wechselrichter in elektrische Energie umgewandelt. Diese Energiewandlung kann aber auch durch ein Brennstoffzellensystem oder ein beliebig kombiniertes hybrides System erfolgen. Durch Auslegung auf optimale Lastpunkte und die Verwendung kleiner (und somit leichter) Pufferbatterien können hohe Wirkungsgrade erreicht werden. Insbesondere bei der Kombination einer Mikrogasturbine (MGT) mit eingebetteten SOFC-Stacks (SOFC=Solid Oxid Fuel Cell) zeigt sich ein Wirkungsgradpotential größer 70% (siehe Kapitel 3).

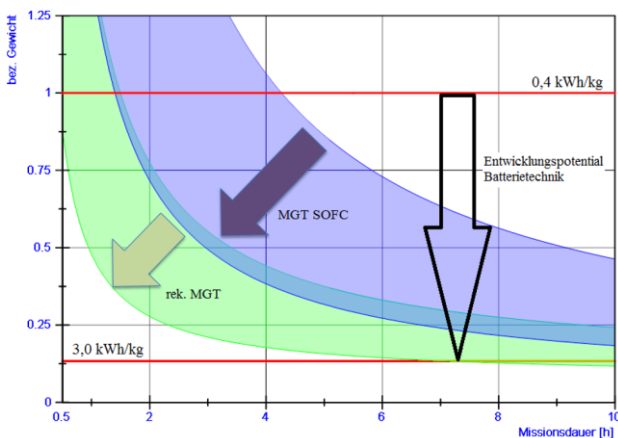


BILD 1. Bezogenes Abfluggewicht hybrider Energiespeichersysteme in Abhängigkeit der Missionsdauer ohne Berücksichtigung des positiv wirkenden Ballastverlustes der MTG und MTG-SOFC Technologie

Bis zum Erreichen der angestrebten Energiedichten für die Batterien können hybride Speicher deren Aufgaben übernehmen. Bild 1 veranschaulicht das Potenzial der Gewichtseinsparung am Speichersystem. Dafür wurde als Referenz (bezogenes Gewicht = 1) ein Batteriesystem mit

optimistischen 0,4 kWh/kg (mittelfristig erreichbar) angenommen und das Speichergewicht über der Missionsdauer aufgetragen. Das Diagramm veranschaulicht exemplarisch für ein rekuperiertes MGT-System und ein MGT-SOFC-System die Gewichtsvorteile der hybriden Speichersysteme gegenüber verfügbaren Batteriespeichern. In Pfeilrichtung ist das Potenzial für zukünftige Entwicklungen zu erkennen. Dies gilt insbesondere für Missionszeiten größer als 1,5 Stunden für rekuperierte MGT-Systeme und größer 4,5 Stunden für MGT-SOFC-Systeme. Mit zunehmender Missionsdauer macht sich die hohe Speicherdichte von 11,5kWh/kg immer mehr bemerkbar. Bei den extrem hohen Wirkungsgraden der MGT-SOFC-Systeme macht sich dieser positive Effekt stark bemerkbar und das höhere Energiewandergewicht wird immer unbedeutender. Lösungen mit Hub- und Kreiskolbenmotoren erreichen ähnliche Werte, wie in Bild 1 für rekuperierte Gasturbinen dargestellt. Durch konsequente Optimierung können diese Werte weiter minimiert werden. Einen Beitrag hierzu können unter anderem neue Materialien, höhere Turbineneintrittstemperaturen, der Einsatz von Luftlagern und die integrale Bauweise (MTiG) leisten.

2.3. Anforderungen an Stromerzeuger

Für den Einsatz als Stromerzeuger-Einheit in einer solchen hybriden Anwendung stehen prinzipiell unterschiedliche Konzepte zur Verfügung, die eine Umwandlung von chemischer (Brennstoff) in elektrische Energie ermöglichen. Die Spezifikation einer Stromerzeuger-Einheit hängt dabei sehr stark von den Anforderungen an zukünftige Flugzeugkonzepte ab, d.h. Einbauraum, Gewicht, Kosten und Vielstofftauglichkeit erhalten eine neue zu definierende Gewichtung im Auswahlprozess des Energiewandlers. Energieumwandlungskonzepte werden aber vor allem durch die vom Kunden geforderten Flugzeuge beeinflusst, die zu einem großen Anteil mit leichten, kompakten, komfortablen, kostengünstigen und effektiven Stromerzeugern ausgerüstet werden sollen. Um den zukünftigen Forderungen gerecht zu werden, müssen Hersteller aus einer Vielzahl von konventionellen und unkonventionellen Prinzipien schöpfen können.

Das Energieumwandlungskonzept muss u. a. nach folgenden Kriterien ausgewählt werden:

- Kommerzialisierungsgrad (Akzeptanz neuer Konzepte, Herstellungskosten, Betriebskosten)
- Skalierbarkeit, Wirkungsgrad
- Umweltbelastung (positive CO₂-Bilanz bei Betrieb und Herstellung)
- Systemgewicht und Bauvolumen (hohe Leistungsdichte)
- NVH (geringe Geräusch- und Schwingungsentwicklung)
- Vielstofffähigkeit (biogene, synthetische, fossile Gas- und Flüssigbrennstoffe).

2.4. Verschiedene Stromerzeuger

Im Rahmen verschiedener Forschungsarbeiten am Lehrstuhl Verbrennungskraftmaschinen und Flugantriebe wurden in den letzten Jahren die unterschiedlichsten Range-Extender-Systeme für den seriellen Hybrideinsatz in automotiven Anwendungen untersucht. Die gewonne-

nen Erkenntnisse sind größtenteils auf den Bereich der seriellen Hybridsysteme übertragbar. Neben der allgemeinen Betrachtung, der auf Hubkolbenmotoren basierenden Systeme fanden diverse Entwicklungen der unterschiedlichsten Rotationskolben- und Mikrogasturbinengeneratoren statt. Die Systeme wurden erforscht, entwickelt und anwendungsspezifisch verglichen, bis zum Demonstratorstatus gebracht und unter realitätsnahen Bedingungen getestet (weiterführende Literatur [6], [7] und [8]). In der angegebenen Literatur werden die Vor- und Nachteile der Systeme vorgestellt. Die Rotationskolben-Systeme basieren auf einem modularen Konzept, gepaart mit zwei verschiedenen realisierten Kammervolumenklassen der Rotoren (350ccm und 500ccm), womit ein Leistungsbereich von 20-200kW abgedeckt werden kann und einer konzipierten Kammervolumenklasse von 650ccm, womit ein Leistungsbereich bis 1.500kW (Parallelhybrid-Triebwerk, vgl. [11]) erzielt wird. Bild 2 zeigt beispielhaft eine WRE 350-1 Stromerzeuger mit 33kW Leistung (in der Turboversion bei 6000 U/min).

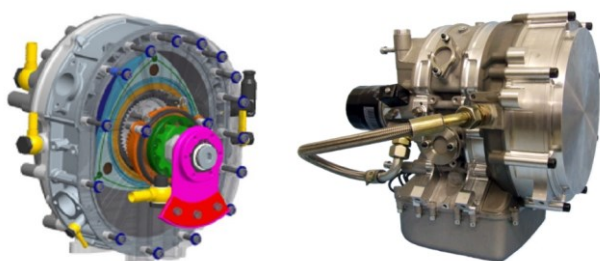


BILD 2. Beispiel eines Wankel-Range-Extenders (Kammervolumen 350 ccm, 1-Rotorsystem)

Einfache mit Generatoren gekoppelte Mikrogasturbinen könnten auch eine Lösung darstellen (z.B. als Emergency-Power-Unit). Allerdings besitzen einfache Mikrogasturbinen aufgrund der großen Exergie, die mit dem Abgas ungenutzt verloren geht, einen vergleichsweise schlechten thermischen Wirkungsgrad. Um teilweise die Abgasexergie dennoch nutzen zu können, wird die vom Verdichter der Brennkammer zuströmende Luft durch das Abgas der Turbine vorgewärmt. Dies geschieht durch einen Leichtbaurekuperator, welcher in den Kreisprozess integriert ist. Im Ergebnis steigt der thermische Wirkungsgrad. Heutzutage sind damit bei MTG-Systemen mittels neuartiger Wärmetauschertechnologien und „all-metallic“-Turbinenkomponenten Wirkungsgrade von über 30% vor dem Generator möglich. In der Zukunft könnten durch den Einsatz neuartiger Komponentenbauarten (z.B. Steigerung der Turbineneintrittstemperatur durch ein innengekühltes Radialturbinenrad) Werte über 40% realisiert werden. Die Systeme basieren auf einem Mikrogasturbinenfamilienkonzept, durch das ein Leistungsbereich von derzeit 20-80 kW (später bis 200kW) abgedeckt wird.

Im folgenden Beitrag wird das auf dem Mikrogasturbinengenerator (MTG) bzw. MTiG (i steht für einen integrierten Generator) basierende System behandelt. Das MTG/MTiG-System bietet die Möglichkeit, extrem hohe Wirkungsgrade durch die Integration von Hochtemperaturbrennstoffzellen in den MGT-Kreisprozess zu realisieren (MGT steht für Mikrogasturbine).

3. KOMPAKTE HOCHEFFEKTIVE MIKROGASTURBINE MIT INTEGRIERTEM GENERATOR UND IHRE HYBRIDISIERUNGSFÄHIGKEIT

3.1. Basistechnologie

Im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden unterschiedliche Mikrogasturbinengeneratorsysteme (MTG) für die stationären und mobilen Anwendungen realisiert. Somit konnte von Grund auf ein detailliertes Wissen in dem neuartigen Technologiebereich geschaffen werden, um zukünftige Konstruktionen für die „E-Luftfahrt“-Anwendungen zu kreieren. Es wurde eine Basistechnologie geschaffen, die es erlaubt, unterschiedliche Leistungen bei einer hohen Brennstoffflexibilität abzubilden. Die gewählte modularisierte MTG-Triebwerksarchitektur eignet sich insbesondere für die mobile Anwendung, da sie eine hohe Integrationsfähigkeit besitzt.

Bild 3 zeigt eine Prinzipskizze der realisierten Triebwerksarchitektur, wie sie von den Autoren bereits in [6] und [8] vorgestellt wurde. In diesen Literaturstellen findet man auch die Einteilung in unterschiedliche Triebwerksarchitekturen.

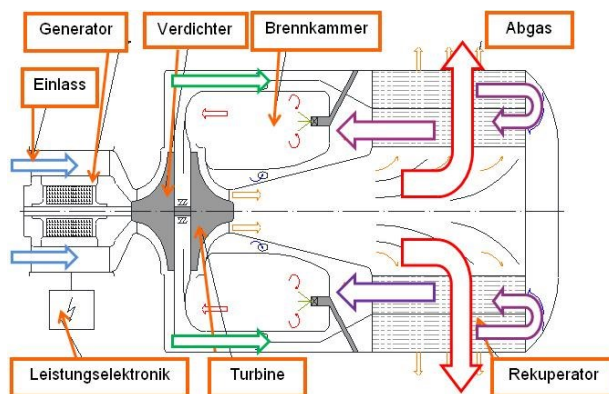


BILD 3. Prinzipskizze der Triebwerksarchitektur des rekuperierten Mikrogasturbinenprozesses

Die Basistechnologie wurde in [9] erforscht und in Demonstrator-Triebwerken realisiert. Sie besitzt einen maximalen Gesamtwirkungsgrad (elektrische Energie zur eingesetzten chemischen Energie) von ca. 32% und kann durch diverse technologische Maßnahmen bis in den Bereich um 40% erhöht werden. Der grundlegende Aufbau basiert auf einem luftgelagerten System mit einer direkt angetriebenen Generatorwelle. In dieser sitzen die Hochenergiemagnete (realisierte Variante). Das Statorgehäuse des Generators wird mit der Zuluft (bei kleineren Einheiten) oder mit Wasser (dient auch zur Elektronikkomponentenkühlung) gekühlt. Hierbei wird die Wärmeenergie über einen externen Kühler abgeführt, welcher im Luftfahrzeug variabel untergebracht werden kann. Der Verdichter und die Turbine sind in radialer Bauweise mit hohen isentropen Wirkungsgraden ausgeführt. Bevor die Luft in die Brennkammer strömt, wird sie im Rekuperator durch die Abgaswärme vorgewärmt. Die Brennkammer ist in einer Ringbauweise ausgeführt, um die Regelbarkeit durch mehrere Brenner zu verbessern und eine Grundla-

ge für die spätere Anwendung von Hochtemperaturbrennstoffzellen (ringförmiger Nachoxidator mit integriertem Reformierwärmetauscher) zu realisieren. Die Turbineneintrittstemperatur wurde bei den ersten Demonstratormaschinen in einem Bereich unterhalb 950°C gewählt, da es sich um ungekühlte Bauarten handelte. Das aus der Turbine abströmende Abgas verlässt die Mikrogasturbine durch den Rekuperator, welcher für mobile Anwendungen (Automotive und Luftfahrt) in einer Lanzetrohrbauweise (vergleiche hierzu [7] und [15]) ausgeführt wurde. Diese Bauweise wurde mit hohem Aufwand für das „Wärmetauschertriebwerk der Zukunft“ entwickelt und in umfangreichen Triebwerksversuchen validiert. Sie baut leicht und kompakt und man kann durch eine dreigängige Kreuzstrombauweise hohe Austauschgrade (93%) erzielen.

3.2. Leistung, Wirkungsgrad und Vielstofffähigkeit der Mikrogasturbinen-Baureihen

Die Mikrogasturbinengenerator-Baureihe ist zunächst für einen Bereich von 20 bis 100kW vorgesehen. Die Turbogeneratoren besitzen stets eine ähnliche Maschinenarchitektur, kombiniert mit einem modularen, innovativen, neuartigen Brennkammer- und Leichtbau-Rekuperator-Konzept. Im Rahmen des untersuchten Entwicklungsszenarios wurden verschiedene Technologieevolutionsstufen beleuchtet und neben einer deutlichen Gesamtwirkungsgradsteigerung von 30% auf 42% (gekühlte Turbine und Verdichter mit Zwischenkühlung) eine damit einhergehende Erhöhung der spezifischen Arbeit um das 1,5 bis 2 fache festgestellt. Somit könnte eine Maschine der „Baugröße 70kW“ theoretisch auf Leistungswerte zwischen 105-140kW gebracht werden. Im oberen Wirkungsgradbereich muss allerdings der Bauraum des Zwischenkühlers noch dazu addiert werden. Wie man in den Untersuchungen auch feststellen konnte, ist die Bauvolumenabschätzung relativ unscharf. Man kann aber davon ausgehen, dass eine modifizierte Maschinenbaugröße bis zu einem Gesamtwirkungsgrad von ca. 38% und einer Leistung von ca. 95kW ungefähr die gleichen Hauptabmessungen der hier beschriebenen MTG/MTiG-Basismaschinen hat. Diese Aussage gilt in erster Näherung auch bei der Wahl unterschiedlicher Brennstoffe, da maschinenbedingte Bauvolumenunterschiede im Wesentlichen nur durch die Änderung der Anbaugeräte (Ventile, Steuerorgane, etc.) resultieren. An der Brennkammer werden nur die entsprechenden Brenner bei gleichem Flammrohr eingesetzt. Das Verbrennungssystem ist eine Komponente mit hohem Innovationsgrad, in dem eine kontinuierliche, sehr magere und vorgemischte Verbrennung mit sehr niedrigen Emissionen stattfindet.

Betrachtet man unterschiedliche Turbineneintrittstemperaturen (beispielsweise 900°C und 960°C, wie in ungekühlten Basismaschinen), so sieht man deutliche Einflüsse des Verdichterdruckverhältnisses und des Wärmetauschergrades des Rekuperators auf den thermischen Wirkungsgrad. In Bild 4 sind repräsentative Ergebnisse für eine ungekühlte vollmetallische Mikrogasturbine aufgetragen. Deutlich höhere Temperaturen können nur mit einer gekühlten Turbine (mit Kühlluftanteil) oder mit innovativen Keramikwerkstoffen erreicht werden. Durch die Kühlluft, die ohne Erwärmung durch die Brennkammer die Turbine erreicht, ist bei gleicher Turbineneintrittstemperatur der spezifische Brennstoffverbrauch ca. 5 % größer als ungekühlt keramisch. Bei der ungekühlten Kera-

mikturbine verschieben sich die dargestellten Felder, also hin zu einem besseren Wirkungsgrad. In Bild 4 wird auch der große Einfluss der Turbineneintrittstemperatur auf die spezifische Arbeit deutlich. Bei vorgegebener Leistung werden mit zunehmender Prozesstemperatur der Luftdurchsatz und damit das Bauvolumen des MTG/MTiG-Systems kleiner. Die zulässige Materialtemperatur, die geforderte Lebensdauer und die Turbinenbauart begrenzen allerdings die maximale Prozesstemperatur. Mit gekühlten metallischen Turbinen wäre theoretisch eine maximale Prozesstemperatur von 1600 K realisierbar. Da bei der MTG-Basismaschine zunächst ungekühlte Turbinenlaufräder zum Einsatz kommen, muss diese Temperatur bei Einsatz von Superlegierungen unterhalb von 1250 K liegen. Das Turbinenleitrad inkl. der Seitenwandbereiche kann hingegen thermisch höher belastet werden, da dieses gekühlt werden kann. Diese Bauweise kann auch in Kombination mit einem keramischen Turbinenlaufrad eingesetzt werden, welches einen theoretischen Turbineneintrittstemperaturbereich von ca. 1400 K bis 1800 K erlaubt.

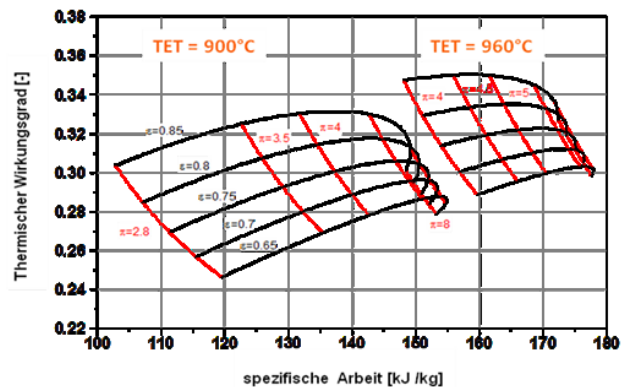


BILD 4. Thermischer Wirkungsgrad als Funktion der spez. Arbeit, des Wärmetauschergrades, des Verdichterdruckverhältnisses und der Turbineneintrittstemperatur nach [9]

In der hier beschriebenen Konzeptentwicklung wurden die MTG-Versuche zunächst mit konventionellen ungekühlten metallischen Turbinenmaterialien und somit mit Prozesstemperaturen bis ca. 1200 K durchgeführt. In Bild 4 ist neben der Turbineneintrittstemperatur auch das Verdichterdruckverhältnis π und der Wärmetauscherwirkungsgrad ϵ variiert worden. Bezüglich des Druckverhältnisses ist zu erkennen, dass es sowohl ein Verbrauchsoptimum als auch ein Optimum der spezifischen Arbeit in Abhängigkeit vom Austauschgrad und der Turbineneintrittstemperatur gibt. Der Verdichter wird im Wesentlichen nach folgenden Kriterien ausgelegt: hoher Gesamtwirkungsgrad, geringe Bauabmessungen, Unempfindlichkeit gegen Stauberosion, geringe Produktionskosten und einfache Montage. Bei einem Mikrogasturbinengeneratorssystem für eine serielle Kleinflugzeug-Anwendung bietet sich der Einsatz eines einstufigen Radialverdichters an. Die zweistufige Bauweise eignet sich für höhere Wirkungsgrade und für Leistungsbereiche über 200kW. Neben der Hochtemperaturturbine und den Luftlagern stellt insbesondere der Wärmetauscher die Schlüsselkompetenz im Entwicklungsprozess dar. Hierbei spielt nicht nur die Bauart, sondern auch das Fertigungsverfahren eine große Rolle. Die optimalen Konstellationen der Kosten, der Lebensdauer, der Herstellverfahren, des Gewichtes und des Volumens

werden die weiteren Entwicklungsentscheidungen bestimmen. Da für ein Mikrogasturbinen-generatorsystem das Bauvolumen und das Gesamtgewicht eine große Rolle spielen, wurden in Berechnungen die spezifischen Kraftstoffverbräuche stets mit Bauaufwandwerten verglichen. Bei den zuvor genannten Wärmeaustauschgraden wird eine nennenswerte Verbrauchsverbesserung nur noch mit einem hohen Zuwachs an Wärmetauschervolumen erreicht. Aus diesem Grund macht eine weitere Steigerung der Austauschgrade praktisch keinen Sinn. Die entwickelte Brenntechnologie in der Ringbrennkammer ermöglicht geringste Schadstoffemissionen bei reduzierten Schallemissionen [9]. Die neu entwickelten Konzepte des „gestuften Designs“ erlauben eine hervorragende Flammenstabilisierung und eine kompakte Integration der Brennkammer in das System. Durch das favorisierte Pilot-Main-Design wird eine extrem kurze Bauform der Brennkammer bei gleichzeitig hohem Ausbrandgrad erreicht. Bei der Weiterentwicklung der Vormischbrenner standen zunächst die Emissionen im Vordergrund. Bei automotiven Systemen konnte mit der beschriebenen Bauart ohne eine Abgasnachbehandlung eine Partiiell-Zero-Emission-Einstufung erreicht werden.

Der Brennstofftank hat in Abhängigkeit des eingesetzten Brennstoffes den stärksten Einfluss auf das flugzeugrelevante Bauvolumen und ist wie der Mikrogasturbinengenerator, der Brennstoff und die Pufferbatterien Bestandteil des „hybriden Energiespeichers“. Um die Brennstoffvariabilität zu bestätigen, wurden verschiedene Untersuchungen mit unterschiedlichen Brennstoffen (Erdgas, Propan, Butan, Diesel, Alkohol und im Komponentenversuch sogar Wasserstoff) erfolgreich durchgeführt. Eine Mikrogasturbine zeichnet sich neben der beschriebenen Vielstofffähigkeit bei niedrigen Rohemissionen durch eine gute Kaltstartfähigkeit, Vibrationsarmut und das hohe Entwicklungspotential aus. Das MTG/MTiG-System benötigt kein Ölsystem, da dieses mit einem axialen (Spiralrillen-) und radialen (Folien-) Luftlager versehen werden kann (vgl. Forschungsaktivitäten in [12]).

Das Sekundärluftsystem gewährleistet hierbei die Kühl- und Spaltbildungsaufgabe. Nur während der Anlaufphase des Rotorsystems herrschen kurzzeitig tribologische Mischreibungsbedingungen. Die Luftlagerung gewährleistet eine lange Lebensdauer und legt gleichzeitig die Grundlage für ein projektiertes MTG-SOFC System (Kombination mit einer Hochtemperaturbrennstoffzelle; SOFC = Solid Oxid Fuel Cell), welches das Potential für höchste Gesamtwirkungsgrade (bis 80%) bietet und somit ein weiteres denkbare Zukunftspotential der Technologieerweiterung darstellt [10]. Weiterhin bietet das MTiG-System eine innovative Teiltechnologie für das vorgeschlagene Konzept „Flugmotor 2030 (TurboWankel-Hybrid-Luftfahrtantrieb vgl. [11])“. Hierbei wird die MTiG-Technologie als elektrischer Zentralturbo vorgesehen.

3.3. Grundlage für ein zukünftiges MTG-SOFC-Hochwirkungsgradsystem

Im Rahmen der eigenen Forschungsstrategie „neue Antriebe“ wurden wesentliche Grundlagen für die luftgelagerten Turbogeneratoren- und die Rekuperatorentechnologie gelegt. Ebenso wurde eine Grundlage für zukünftige hybride Energiewandler im Hochwirkungsgradbereich bei gleichzeitiger Brennstoffflexibilität geschaffen. Ein großes

Zukunftspotential liegt nach Auffassungen des BTU-Lehrstuhls Verbrennungskraftmaschinen und Flugantriebe in der Kombination der Mikrogasturbinen-Technologie mit einem Festoxidelektrolyt – Brennstoffzellen - System (SOFC). Hierbei wird das sogenannte SOFC-Modul (bestehend aus SOFC, Nachverbrennung, Reaktor, Reformer und Wärmetauscher) anstelle der Brennkammer in den MGT/MTiG-Prozess integriert. D.h. es wird zwischen dem Rekuperatoraustritt und der Turbine angeordnet und mit den für den Betrieb notwendigen Komponenten verschaltet. Es ergibt sich das in Bild 5 dargestellte vereinfachte Wärmeschaltbild. In einer laufenden Studie werden für die reale Ausführung die Komponenten 3,11,7,8,9 und 10 in einer integralen SOFC-Modulbauweise konzipiert (hierbei ist 10 durch eine aerodynamisch wirksame integrale Fördereinrichtung ersetzt). Die Luft (gelb) wird vom Verdichter (1) angesaugt und unter Berücksichtigung der Rekuperatordruckverluste auf Betriebsdruck komprimiert. Eine kleine Luftbypassmenge durchströmt die aerodynamischen Axial- und Radiallager, führt die geringe Reibwärme ab und kühlt die Rückseite der Radialturbine, bevor sie zwischen Leit- und Laufrad austritt (im Schaltbild ist dies durch eine Verbindungsleitung mit Ventil abgebildet). Die Hauptmenge fließt durch den Rekuperator (2) in einen weiteren

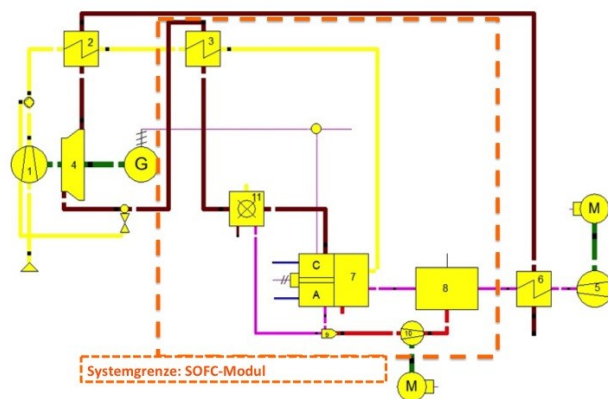


BILD 5. Wärmeschaltbild des SOFC/MGT-Hybridprozesses (und Systemgrenze des ringförmigen SOFC-Moduls) nach [10]

Dieser ist erforderlich, da in den meisten Betriebspunkten die Abgaswärme der Turbine (4) zur Vorwärmung auf die Betriebstemperatur des SOFC-Stacks nicht ausreicht. Als Wärmequelle dient hierzu das Abgas der Nachverbrennung. Hat die Luft die erforderliche Temperatur erreicht, wird sie der Kathode der Brennstoffzelle (7) zugeführt. Anodenseitig wird der Brennstoff (pink, Kohlenwasserstoff) (5) auf Betriebsdruck komprimiert und durch einen Abgaswärmetauscher (6) vorgewärmt. Die Brennstoffzelle (7) ist nicht in der Lage, Kohlenwasserstoffe wie Methan direkt umzusetzen. Eine vorgeschaltete Reformierung (8) ist notwendig. Hier wird das Brenngas reformiert. In der oxidkeramischen Brennstoffzelle (SOFC) reagiert der Sauerstoff an der Anode mit dem Kohlenmonoxid und dem Wasserstoff des Brenngases zu Wasser und Kohlendioxid. Er wird auf der Kathodenseite über die erwärmte Luft dem SOFC-Stack zugeführt. Dort wird jedes Sauerstoffmolekül unter Zuhilfenahme von vier Elektronen in zwei Sauerstoffionen aufgeteilt. Diese diffundieren durch den Elektrolyten zur Anode, um dort mit den „Brenngas“-

lonen zu oxidieren. Zwischen Anode und Kathode entsteht hierdurch eine Elektronen- und Ionenpotentialdifferenz. Der entstehende Gleichstrom steht dem Elektrosystem zur Verfügung. Im SOFC-Stack findet keine vollständige Umsetzung statt. Um den Restanteil der brennbaren Bestandteile im Anodenabgas energetisch zu nutzen, wird dieser einer Nachoxidation (im Fall der hochintegralen Bauweise ist dies ein Katalysator) zugeführt (11). Der Restsauerstoff im Kathodenabgas dient dabei als Oxidationspartner. Die dabei entstehenden heißen Gase fließen über den zweiten im SOFC-Modul integrierten Wärmetauscher (3) der Luftvorwärmstrecke zu und geben dabei Wärmeenergie an die komprimierte Luft ab. Im Anschluss daran erfolgt die Expansion in der Turbine (4), welche über die gemeinsame Welle (grün) den Generator und den Verdichter antreibt. Das Turbinenabgas gibt Wärmeenergie im Rekuperator (2) an die verdichtete Luft ab. Die restliche Wärmeenergie wird zur Vorwärmung des Brennstoffes (6) verwendet. In den konstruierten MGT-SOFC-Maschinen stellen der Wärmetauscher (3), der Nachbrenner (katalytische Nachoxidation), der Reformier und die Ansaugvorrichtung ein integrales Bauteil im Bereich des SOFC-Stack-Moduls dar. Die Untersuchungsergebnisse zeigen bereits einen hohen elektrischen Gesamtwirkungsgrad des Energiewandlers von 68% bei einer Kombination der vorhandenen Basistechnologien. Bild 6 zeigt das hohe Wirkungsgradpotential bei Erhöhung der SOFC Betriebstemperatur und der Turbineneintrittstemperatur.

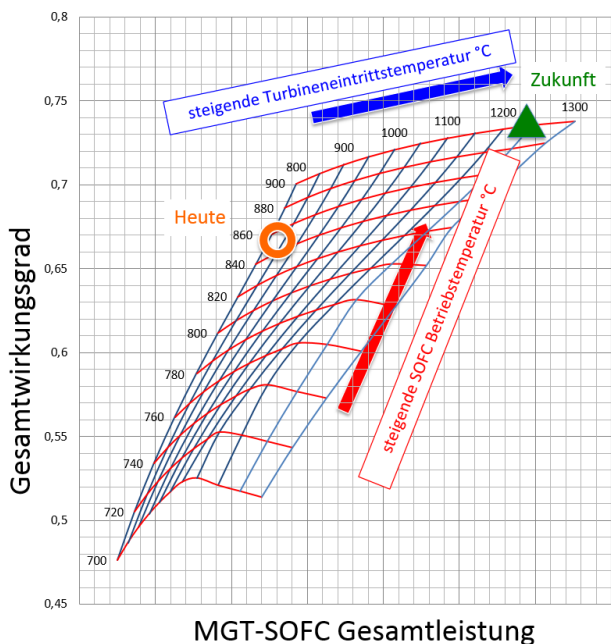


BILD 6. Beispielhafte Skizze des Gesamtwirkungsgrades eines MTG-SOFC Prozesses basierend auf der MTG/MTiG-Basistechnologie im Turbineneintrittsbereich von 800°C bis 1300°C und im SOFC-Betriebstemperaturbereich von 700°C bis 900°C

Das beschriebene Hochwirkungsgradsystem besitzt im Vergleich zu den reinen MTG/ MTiG-Systemen ein höheres spezifisches Energiewandergewicht. Durch den höheren Wirkungsgrad (68% bis 74%) macht sich dieser Gewichtsachteil des "hybriden Energiespeichers (Wandler, Brennstoff, etc.) bei langen Flugzeiten immer weniger bemerkbar, da das relative Abfluggewicht immer stärker

sinkt (siehe Bild 1). D.h. diese Bauart könnte für lange Flugmissionen oder Luftschiffanwendungen interessant sein. Der für Flugzeuge positive ballastabnehmende Effekt ist für Luftschiffe von Nachteil. Bei diesen Anwendungen muss deshalb vielfach eine komplizierte Ballastrückgewinnung erfolgen. Beim Flugmotor geschieht dies durch das Auskondensieren des im Abgas enthaltenen Wassers. Bei Gasturbinenriebwerken sind bei der Verwendung von „Kohlenwasserstoff“-Treibstoffen Ballastrückgewinnungsmethoden durch CO₂-Bindung in der Diskussion. Bei MGT-SOFC Systemen sind der leistungsbezogene Luftdurchsatz (ca. 1kg/s Luft pro 1000kW) und die Abgastemperatur sehr gering, so dass eine Ballastrückgewinnung sehr einfach möglich ist. Außerdem ist die relative Ballastabnahme durch den extrem hohen Wirkungsgrad (niedriger Brennstoffverbrauch) deutlich geringer als bei Flugmotoren. Die neusten Untersuchungsergebnisse konnten zeigen, dass bei einer Erhöhung der Rezirkulationsverhältnisse am SOFC-Stack die Wirkungsgrade weiter gesteigert werden können. Bei Modelluntersuchungen mit dem Brenngas Methan lag der rechnerische Gesamtwirkungsgrad bei knapp 80%.

3.4. MTG-Basistechnologie als Grundlage für ein zukünftiges Parallel- und Mischhybridsystem

An dieser Stelle sei erwähnt, dass dieser Beitrag in einem synergetischen Zusammenhang zum DGLR-Konferenzbeitrag: "Turbowinkel-Triebwerksfamilien: neuartige Antriebskonzepte für die allgemeine Luftfahrt der Zukunft" steht. Hier wird ein Parallel-Hybridantrieb (bis 1500kW / HSD-Konzept) beschrieben, welcher als elektrischen Zentralturbolader eine MTiG verwendet. Mit dieser Bauart ist es möglich, die Abgasenergieverluste zu senken. So werden ca. 20% der Leistung über den Turbomaschinenanteil und der Rest vom Grundtriebwerk (hier eine Wankelmaschine) bereitgestellt siehe Bild 7.

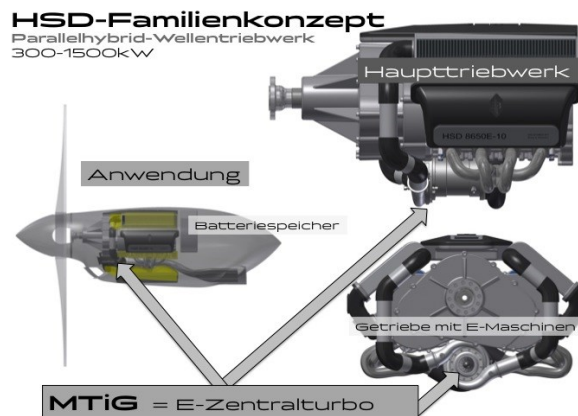


BILD 7. HSD-Konzeptstudie

Da der MGT/ MTiG-Powerhead eine luftgelagerte Turbomaschine ist, kann bei entsprechender Dimensionierung die ölfreie Luft auch zur Versorgung und Klimatisierung der Druckkabine genutzt werden. In Verbindung mit einer MTG/MTiG oder einer hybriden Abwandlung, kann ein effektives Luftkonditionierungs- und Energiemanagement für Mischhybridsysteme realisiert werden. Dieses, aus

Parallelhybrid und Seriellhybrid bestehende, System könnte eine Grundlage für die Teileelektrifizierung zukünftiger Flugzeuge darstellen.

4. TECHNOLOGIEVALIDIERUNG UND MTIG-KONZEPT

Am Lehrstuhl Verbrennungskraftmaschinen und Flugantriebe wurde von 2010 bis 2014 eine rekuperierte luftgelagerte Mikrogasturbine mit direktangetriebenem Generator im Bereich 100kW realisiert.

Während diesem Zeitraum durchlief das Forschungs- und Entwicklungsteam einen wichtigen Lernprozess. Insbesondere konnten in Schlüsseltechnologien (wie z.B. die Luftlager-, Wärmetauscher-, Turbo-, Brennkammer-, Steuerungs und Regelungstechnik) Kompetenzen aufgebaut werden.

Für die Erprobung stehen am Lehrstuhl die unterschiedlichsten Testeinrichtungen zur Verfügung. Neben einer Vielzahl von Triebwerkskomponentenprüfständen (wie z.B. Turbomaschinen-, Luftlager-, Brennkammer-, Wärmetauscher-, Bauteilerprobungs-, Modellprüfstände...etc.) kommen Gesamtsystem- und Abnahmeprüfstände zum Einsatz. Bei der Gesamtsystemerprobung (siehe Beispiel einer Demonstratormaschine in Bild 8) wurden neben der Funktionalität und des Gesamtwirkungsgrades insbesondere abgas- und zertifikationsrelevante Untersuchungen durchgeführt. Hier können dann über die zur Verfügung stehenden Simulationswerkzeuge Flugzyklen für die unterschiedlichsten Anwendungen untersucht werden.

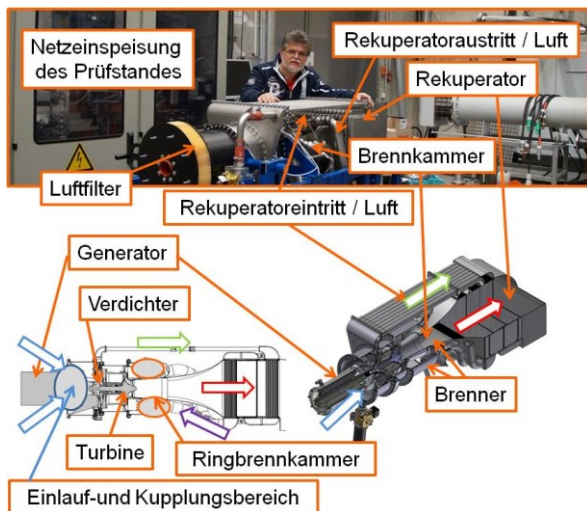


BILD 8. MTG-Forschungsdemonstrator Basistechnologie (dargestellte Baugröße 75kW)

Aus dem aufgebauten Demonstrator (ursprünglich für eine serielle Bus- und Sportwagenanwendung realisiert) wurde auch die Idee einer sehr kompakten Maschinenarchitektur geboren (MTiG-Triebwerksfamilie).

Bild 10 zeigt beispielhaft den Aufbau. Abgeleitet aus dem Demonstrator wird der Rekuperator in 2 Baugruppen geteilt und sozusagen „nach vorn geklappt“. Hierdurch liegt der Rekuperatoreintritt der Verdichterluft nahe am Radialverdichterausgang. Das zweigeteilte Spiralgehäuse des Verdichters leitet die komprimierte Luft den 2 Rekupe-

ratoren zu. Am Austritt der 2 Rekuperatoren fließt die erhitzte Luft direkt (auf kurzem Weg) der ringförmigen Brennkammer zu. Aus der ringförmigen Brennkammer strömt das Heißgas über das Turbinenleitrad der Radialturbine zu und expandiert. Das aus der Turbine abströmende Abgas wird im hinteren Umlenkbereich aufgeteilt und den zwei Rekuperatoren zugeführt. Hier gibt das Abgas durch den 3-fachen Kreuzstrom Wärmeenergie an die Verdichterluft ab. Das Abgas verlässt beidseitig die Maschine.

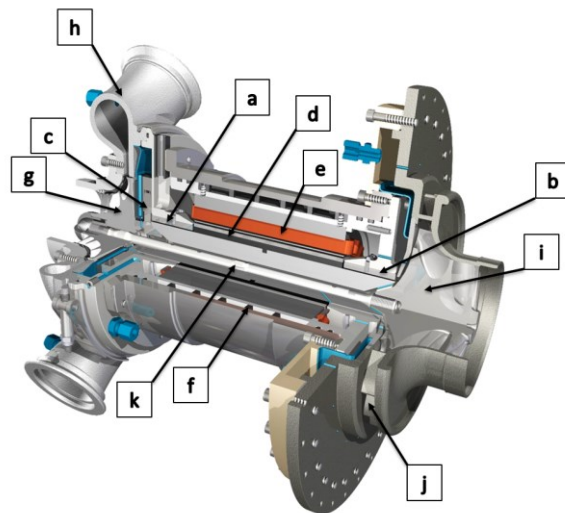


BILD 9. 75kW MTiG-Powerhead: Zwei Radialluftlager a,b; Axialluftlager c; Hochenergiemagnete d; Statorwicklung e; Wasserkühlmantel f; Radialverdichter g; Spiralgehäuse h; Radialturbine i; Turbinenleitrad j; Zuganker k

Eine weitere Innovation gegenüber der Demonstratormaschine ist die Integration des Generators zwischen Verdichter und Turbine. Dies ist in Bild 9 am Beispiel eines MTiG-Powerheads dargestellt. Neben der guten Packungsdichte des Rekuperators und der Brennkammer erhöht diese Bauweise weiter die Kompaktheit und senkt das Gewicht. Allerdings muss die Generatorwelle sehr steif ausgeführt werden. Wegen der radialen Luftlager darf die erste biegekritische Eigenfrequenz nicht durchlaufen werden. Die komplexe konstruktive Abstimmung gelang erst in der zweiten MTiG-Design-Generation und bedarf noch einer Validierung.

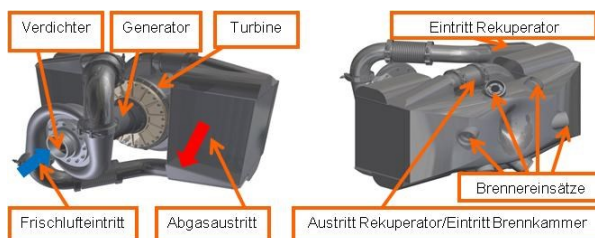


BILD 10. MTiG-Triebwerksfamilie (dargestellte Baugröße 75kW / Konzept)

5. SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

Die vorgestellte MTG/MTiG-Technologie (in der Basis und der Hybridausführung) befindet sich z.Z. in der Entwicklungsphase. Mit der MTiG-Technologie kann in ca. 3 bis 4 Jahren die Industrialisierungsphase der beschriebenen Technologievarianten starten und eine Einführung in den Markt stattfinden. Der Plan sieht vor, dass auf der Basisarchitektur beruhende Technologien iterativ weiterentwickelt werden. Er orientiert sich an einem Szenario von 25 Jahren, beginnend mit der Basistechnologie (32% Gesamtwirkungsgrad / ungekühlte Turbine) bis zur Hochwirkungsgradtechnologie (74% Gesamtwirkungsgrad / SOFC-Technologie mit gekühlter Turbine).

Aktuell laufen unterschiedliche F&E-Aktivitäten auf den Gebieten MTiG-Powerhead, Leistungselektronik, Regelung und Optimierung des luftfahrttauglichen Rekuperators und der Brennkammer.

Um eine Technologie zur Bewältigung hoher Turbineneintrittstemperaturen (gemäß dem Strategieplan) zu besitzen, werden z.Z. im eigenen Forschungsnetzwerk Verfahren zur generativen Herstellung von innengekühlten Mikroturbinenrädern (SLM = Selective Laser Melting) entwickelt. Ein innengekühltes Turbinenrad wurde bereits erfolgreich hergestellt, allerdings im praktischen MTG-Betrieb noch nicht getestet. Bezüglich der SOFC-Technologie werden bei einem Forschungsnetzwerkpartner Stacks mit einer bezogenen Leistung von ca. „1,5kW/Liter Bauvolumen“ seriennah hergestellt. Der Plan sieht einen Einsatz in einem weiteren Demonstrator vor, da auch diese Technologie für die Luftfahrt langfristig von Bedeutung sein könnte.

Die vorgestellte MTG/MTiG Technologie liefert neben dem Wankelmotor-Range-Extender-Konzept einen kurz- bis mittelfristigen Ansatz, um die Reichweitenproblematik von Elektroflugzeugen zu lösen. Aus den vorgestellten Ergebnissen geht hervor, dass das MTG/MTiG-System bereits nach dem jetzigen Entwicklungsstand Vorteile aufweist, die im Auswahlprozess von Energiewandlern für Hybridflugzeuge berücksichtigt werden sollten.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] <http://www.acare4europe.com/>, Status 10.08.2015
- [2] Aeronautics and Air Transport Beyond Vision 2020 (Towards 2050) A Background Document from ACARE. The Advisory Council for Aeronautics Research in Europe) European Commission. 2009.
- [3] Lieuwen, T. C.; Yang, V.: Gas turbine emissions, Cambridge University Press, 2013
- [4] Pudenz, K.: Continental Leistungselektronik wird kompakter und leistungsfähiger, Springer für Professionals, Nachrichten aus der Branche - Automobil- und Motorentechnik vom 27.04.2015
- [5] N.N.: Sachstand vom Kongress des Forum Elektromobilität Berlin 2010
- [6] Berg, H. P.: Entwicklung eines neuartigen, vielstofffähigen Range-Extenders für zukünftige Elektroflugzeuge, ATZ/TÜV Süd Konferenz, Engine.Tech 2009, Wolfsburg, Germany, June 2009

- [7] Berg, H. P.; Steinberg, P.: Vielstofffähiger Turbo-Range-Extender (TRE) / Ein technologischer Anstoß für die Elektromobilität der Zukunft, Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs VII, Haus der Technik, Berlin 2010
- [8] Berg, H. P.; Antoshkiv, O.; Steinberg, P.; Sigmund, E.: 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,
- [9] Berg, H. P.; Reichel, Y.; Neumann, M.; Antoshkiv, O.: 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
- [10] Berg, H. P.; Krienke, Chr.: Mikrogasturbinen-SOFC Prozesse mit hohem Wirkungsgradpotential, Magdeburger Maschinenbautage 2015
- [11] Berg, H. P.; Malenky, U.; Himmelberg, A.; Mykhalyuk, M.: TurboWankel-Triebwerks-Familien / Neuartige Antriebskonzepte für die allgemeine Luftfahrt der Zukunft, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Rostock, 2015
- [12] Prechavut, N.; Berg, H. P.: An experimental study on structural characteristics of cantilever-type foil bearings, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Rostock, 2015
- [13] Berg, P.: Elektrische Kleinflugzeuge, Fliegermagazin S. 10 - 15, Nr. 9, 2015
- [14] Elektrisch über die Alpen und Ärmelkanal, Luft- und Raumfahrt, S. 6, Ausgabe 5, DGLR 2015
- [15] Ahlinder, S.; Biesold, V.; Berg, H. P.: EU Growth Project GRD1-1999-10602 „AEROHEX“, Deliverable 17a, Report on the hot side flow investigation on the exhaust case of a recuperated industrial gas turbine. 2004