

# LUFTGELAGERTE E-TURBOSYSTEME FÜR DEN LUFTFAHRTBEREICH – EINE WICHTIGE KOMPONENTE FÜR INNOVATIVE HYBRIDANTRIEBE DER ZUKUNFT

H. P. Berg, S. Hertrampf, A. Himmelberg

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg  
Lehrstuhl Verbrennungskraftmaschinen u. Flugantriebe  
DEUTSCHLAND

## Zusammenfassung

Luftgelagerte Mikro-Turbosysteme mit integrierten oder anhängenden Elektromaschinen (Generatoren oder Elektromotoren) stellen eine Schlüsseltechnologie für die Entwicklung innovativer Hybridantriebssysteme im Luftfahrtsektor dar. Diese Systeme bieten bedeutende Vorteile wie eine extrem hohe Lebensdauer und eine partikelfreie Luftführung im Kompressor, die für Anwendungen in Verbindung mit Brennstoffzellensystemen, Turbocompound-Antriebssystemen mit Kabinenluftentnahme, Mikrogasturbinen-Generatoren (MGT) sowie Auxiliary Power Units (APU) von zentraler Bedeutung sind. Der vorliegende Artikel beleuchtet die Einsatzmöglichkeiten und die Vorteile luftgelagerter Turbosysteme, die auf langjähriger Forschung und Entwicklung basieren, und stellt exemplarisch realisierte sowie konzipierte Systeme vor. Im Fokus stehen hierbei hybride Turbo Fuel Cell (TFC)-Systeme der Bauart Mikrogasturbine-Festoxidbrennstoffzelle (MGT-SOFC), Systeme mit hochperformanten PEM-Brennstoffzellen, Turbocompound-basierte Mikrogasturbinen-Verbrennungskraftmaschinen-Systeme im Bereich bis 1,36 MW-Wellenleistung sowie APU-Systeme auf Basis rekuperierter Mikrogasturbinen. Besonders hervorzuheben ist das 2017 von Berg et al. vorgestellte MGT-SOFC-Hybridsystem, das durch die Integration eines Festoxidbrennstoffzellen-Subsystems (SOFC) mit Hochtemperatur-Wärmetauschern eine hohe Effizienz und eine Brennstoffflexibilität bietet, die für zukünftige luftfahrttechnische Anwendungen von Bedeutung sein werden. Trotz der aktuellen Herausforderungen in Bezug auf das Systemgewicht, zeigt die Arbeit eine Perspektive für den weiteren Ausbau der Leistungsdichte und der elektrischen Wirkungsgrade auf über 70%. Darüber hinaus wird das Potenzial von Luftgelagerten E-Turbosystemen im Zusammenhang mit PEM-Brennstoffzellen gezeigt und die Vorteile gegenüber traditionellen SOFC-Turbo Fuel Cell-Systemen herausgearbeitet. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Rolle dieser Technologien im Bereich der hybriden Verbrennungskraftmaschinen, die als Hauptantriebssysteme für Flugzeuge geeignet erscheinen. Das innovative Konzept eines elektrischen, parallel-hybriden Turbo-Compound-Systems, das eine neuartige luftgelagerte Turbomaschine mit integrierter Elektromaschine zur Aufladung einer Kreiskolben-Verbrennungsmaschine nutzt, wird im Leistungsbereich von 0,8 bis 1,36 MW vorgestellt. Die Arbeit verdeutlicht die hohe Relevanz der luftgelagerten Turbotecnologien und deren Synergien mit reinen Mikrogasturbinenlösungen sowie deren Potenzial für zukünftige APU/ GenSet und Triebwerks-Anwendungen im Luftfahrtsektor.

## 1. EXTENDED ABSTRACT (EINLEITUNG)

Aerodynamische Feder- und Folienlager wurden entwickelt, um hochtourige Radialturbosysteme in den Baugrößen T30 bis T300 zuverlässig zu lagern. Die Bezeichnung T XXX bezieht sich auf die Leistung (XXX) eines radialen Mikrogasturbinen(MGT)-prozesses mit einem Druckverhältnis von 4,5 und dient als Maß für die Baugröße.

Für die Auslegung, Berechnung und Anwendung solcher Hochdrehzahl-Lager wurden Berechnungstools, Prüf-, Herstellungs- und Montageverfahren in Zusammenarbeit mit Partner entwickelt – insbesondere von Leaf-type Folienlagern, Bump-type Folienlagern sowie weiterer Lager für die radial und axiale Anwendung [4],[6],[9],[15],[23].

In Forschungs- und Entwicklungsprojekten und BTU-CS-Ausgründungen seit 2010 entstanden Turbosysteme im

Bereich T30 bis T100, die bis zu einem TRL von 9 reifen und in Anwendungen wie Mikrogasturbinen, E-Turbo, Brennstoffzellen-TurboSystemen und turbo-Compound-Antrieben mit E-Kopplung eingesetzt werden können und in realisierten Prototypen und Produkten eingesetzt werden. BILD 1 zeigt verschiedenen Anwendungen aus dem eigenen Technologiebaukasten [1],[7],[9],[11],[12],[18],[21].

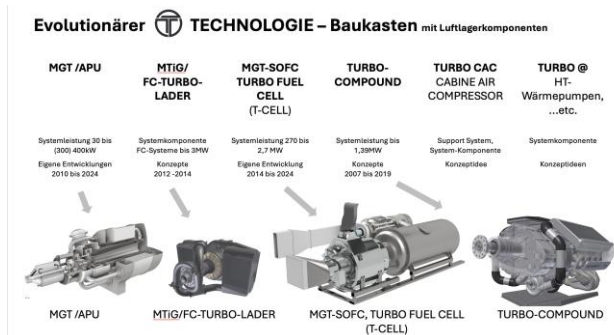


BILD 1. Systeme aus dem Technologiebaukasten

## 2. FOLIENLAGER UND FOLIENLAGERSYSTEME

### 2.1. Bauarten

Neben der Anwendung in Antriebssystemen wurden Forschungs- & Entwicklungsarbeiten incl. Herstellungs- und Montageverfahren an radialen Bump-type Folienlager, axialen Bump-type Folienlager und radialen Leaf-type Folienlager durchgeführt. (siehe BILD 2) Folienlager Auslegung und Validierung [23],[24],[25].

Zur Validierung der Tools wurden Prüfstände für Anfah- und Hochgeschwindigkeitsversuche aufgebaut, um beispielsweise Dynamikoeffizienten, Reibmomente, die Impedanz radialer Leaf- und Bump-type Folienlager sowie die Tragfähigkeit axialer Bump-type Folienlager zu messen. Diese Validierungen erfolgten stets im Kontext mit entwickelten Maschinensysteme unter realen Einsatzbedingungen. Zu praktischen Einsätze von Bump-type Lager kam es bereits in den Jahre 2010 bis 2014 im Rahmen des MGT 100 – Projektes in Prototypen und Feldversuche [12],[25]. Im Rahmen einer Ausgründung kam es ab 2012 bereits zur Entwicklung von Leaf-type Radiallager, welche in der MGT-Klasse 35 bis 70kW eingesetzt wurden [11]. 2017 bis 2019 wurden die Auslegungsverfahren im Rahmen eines FVV-Forschungsprojektes wissenschaftlich behandelt und weiterentwickelt (vgl. Betriebssichere aerodynamische Folienlager für die Lagerung schnell laufender Rotoren, Folienlager II FVV-Vorhaben Nr. 1267 [25]. Die Berechnungstools erhielten im Rahmen der wissenschaftlichen Arbeiten Validierungen und Nachweis der Zuverlässigkeit. Die Stabilitätsgrenzdrehzahl (Campbell-Diagramm) des Bump-type Folienlagers deckt sich gut mit der experimentell identifizierten Drehzahl, bei der vermehrt subsynchrone Schwingungen auftreten. Das Leaf-type Folienlager zeigt im betrachteten Drehzahlbereich bis  $n = 100.000$  U/min keinerlei Neigung zu subsynchronen Schwingungen. Parametervariationen am Bump- und Leaf-type Lager wurden so gewählt, dass

Abhebedrehzahl minimiert und die Stabilitätsgrenze maximiert wird. FE-Analysen zeigten, dass lokale druckbedingte Folienverformungen den Druckaufbau nur gering beeinflussen; maßgeblich bestimmt wird dieser durch den globalen Spalthöhenverlauf, der im Leaf-type Lager durch Bauweise und Foliendicke und im Bump-type Lager durch die starke Profilierung der Foliensegmente festgelegt wird.

Generierte Modelle berücksichtigen außerdem Folien-Nachgiebigkeiten (einschließlich der Top-Folie) sowie reibungsbedingte Dämpfungseffekte.

Im praktischen Bereich der Maschinenanwendung etablierte sich die Luftlagertechnologie immer mehr und bietet heute eine robuste Technologie für schnelllaufende Rotoren mit hoher Lebensdauer.

BUMP-TYP-RADIAL LAGER AXIAL LAGER MIT BUMP-FEDERFOLIEN

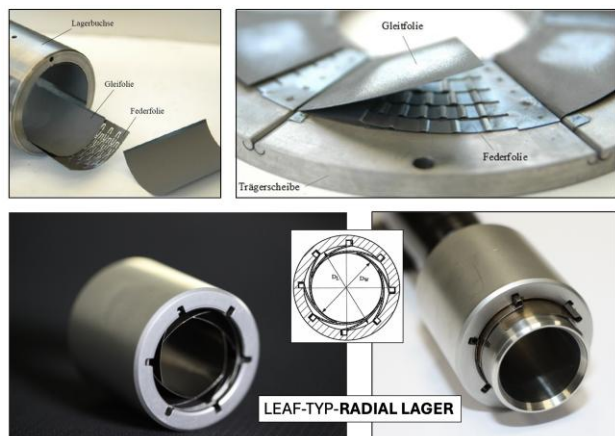


BILD 2. RADIALLAGER UND AXIELLAGER [25]

Luftgelagerte Mikro-Turbosysteme mit integrierten oder anhängenden Elektromaschinen (Generatoren oder Elektromotoren) stellen eine Schlüsseltechnologie für die Entwicklung innovativer Hybridantriebssysteme im Luftfahrtsektor dar [4],[20]. Sie bieten Vorteile wie eine extrem lange Lebensdauer und eine partikelfreie Luftführung im Kompressor – wesentliche Merkmale für Anwendungen mit Brennstoffzellensystemen, turbocompound-Antrieben mit Kabinenluftentnahme, Mikrogasturbinen-Generatoren (MGT) und Auxiliary Power Units (APU).

### 2.2. Folienlager Auslegung und Validierung

Die folgenden Ausführungen in Anwendungen beleuchten die Einsatzmöglichkeiten und Vorteile luftgelagerter Turbosysteme, die auf langjähriger Forschung und Entwicklung basieren, und stellen exemplarisch realisierte sowie konzipierte Systeme vor.

## 3. ANWENDUNGEN

### 3.1. Mikrogasturbine und Basistechnologien

Ab dem Jahre 2010 wurde das Projekt „Entwicklung einer wirkungsgrad-optimierten Mikrogasturbine für eine KWK-Lösung zur Nutzung regenerativer Energien“ bearbeitet [1],[2],[3],[12]. Dieses schaffte einen Basistechnologie an

welcher sich weiterführende Forschung und Entwicklungsarbeiten orientierten und Ausgründungen initiiert wurden. So wurde eine kompakte vielstofffähige Mikrogasturbinen (MGT)-Technologie geschaffen, welche über einen internen Wärmetausch einen hohen Wirkungsgrad erlaubt und durch eine weitere Prozesshybridisierungen weitere Anwendungen bis in den Luftfahrtbereich ermöglicht. Die ersten Prototypenmaschinen (BILD 3) basierten bereits auf einer Luftlager-Bump-type-Technologie (Axial- und Radiallager) in Verbindung mit einem direkt von der Turbomaschine angetriebenen Generator und einem Rekuperator, welcher die Abgaswärme wieder in den Prozess zurückführt. Sie liefern die notwendige Grundlage für einen hoch effektiven, reinen Mikrogasturbinenprozess (MGT-Prozess) [1],[3],[11],[12],[20].

**Forschung und Entwicklungen in den Jahren 2010 bis 2014**

hier erste luftgelagerte wartungsarme Mikro Gasturbine,  $P_{net}=100kW$



ERSTER LUFTGELAGERTER GENERATOR – TURBO SATZ

BILD 3. Erster Luftgelagerter Turbo-Gen Satz in einer Prototypenmaschine

**Forschung und Entwicklungen in den Jahren 2010 bis 2014**

hier erste luftgelagerte wartungsarme Mikro Gasturbine,  $P_{net}=100kW$



ERGEBNIS: Brennstoffflexible luftgelagerte Mikrogasturbine, Produktname: QIP Quality in Power, 20 Prototypen

BILD 4. Links das MGT100 Produkt, realisiert mit dem Partner Bilfinger und rechts die Messwarte für alle Labor und Feldmaschinen.

In den Jahren 2010 bis 2014 wurden mehrere Prototypen gebaut und unter harten Feldbedingungen getestet. BILD 4 zeigt links das Produkt (QIP- Quality in Power) und rechts die Messwarte für die Überwachung aller Feld und Labormaschinen [11].

Hierbei stellten sich die Luftlager als eine sehr robuste Technologie heraus. In diesem Zeitraum fanden auch Konzeptstudien zu den Anwendungen im Bereich der Mobilität statt. So wurden beispielsweise auch Einzelstück mit leichteren und kompakteren Rekuperatoren gebaut mit einem zielorientierten Blick auf den Automobil- und Luftfahrtsektor. Eine interessant Rekuperatortechnologie (Ovalrohrbündelwärmetauscher mit dreifachem

Kreuzstrom, BILD 5) wurde erfolgreich erprobt und ab Ende 2014 das Konzept der luftgelagerten Mikrogasturbinen mit integrierter E-Maschine verfolgt [20].

**3.2. Technologiebaukasten. Produkte und Konzepte**

Der Technologiebaukasten wurde bis heute mit den unterschiedlichsten Komponenten für eine hybride Maschinenanwendung stetig weiter ausgebaut und die Basis-Technologie bis zur Produktreife (TRL 9) weiterentwickelt (BILD 6). Neben dem Produkt „luftgelagerte Mikrogasturbine mit Generator“ wurden weitere für die Luftfahrt interessante Antriebssystemteile mit F&E-Partnern entwickelt – so z. B. die Wankelmotoren-Familien (siehe Bild 7, TRL 7–9), welche die Basis für das Turbo-Compound-Hybrid-Antriebssystem bilden.

**Forschung und Entwicklungen in den Jahren 2010 bis 2014**

hier: luftgelagerte MGT mit Ovalrohrbündel – Rekuperator (Einzelstück)



TURBINEN ELEKTRISCHER ANTRIEB

BILD 5. MGT-Einzelstück als Technologiedemonstrator für die Bauart einer hochkompakten MTiG-Technologie.

Ähnlich wurde mit der Technologiebaukastenkomponente Brennstoffzelle verfahren, mit einer Konzentration auf SOFC-Stacks, die wegen der geplanten hybriden MGT-Integration unter Druck bis 5 bar im Forschungsvorhaben „MAXEFF“ getestet werden mussten (TRL 7). Hier waren insbesondere die sehr hohen Umwandlungswirkungsgrade (chemische Energie in Strom) von über 70 % el das treibende Ziel.

**Luftgelagerte MGT – Systeme „Made in Cottbus“ (TRL 9)**

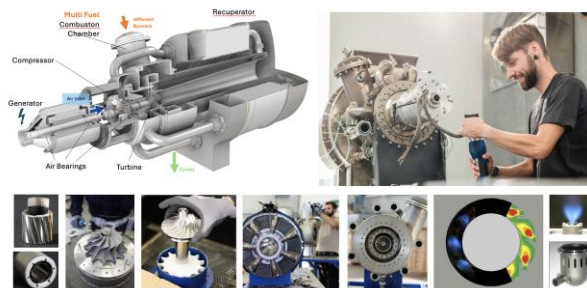


BILD 6. Luftgelagerte MGT-Produkte der Ausgründung EuroK GmbH, Bild oben: Aufbau einer MGT im Klassenbereich 30-70kW mit Einzelrohrbrennkammer und höchsteffektiven Rekuperator (TRL 9)

Für die reine Mikrogasturbine wurden weiterhin Konzeptuntersuchungen zur Generatorintegration zwischen Verdichter und Turbine und zu neuartigen gekühlten Radialturbinen unternommen (BILD 8) [20]. Im Rahmen von Forschungsvorhaben wurden additiv hergestellte Radialturbinen (TRL 4) untersucht, um durch die Erhöhung der Turbineneintrittstemperatur und des Druckes eine Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades (40 % el) zu erhalten, was für ein reines MGT-System ein sehr guter Wert ist.

**Forschung und Entwicklungen in den Jahren 2010 bis 2014**  
Erfahrungen mit seriell- und parallelhybriden Antriebssystemen - Generierung luftfahrttechnischer Anreize



BILD 7. Wankel-GenSet 1 Scheiber und 2 Scheiber (links oben), 2-Scheiben Propellerantrieb mit Getriebe (rechts oben), Wankel-Prototypen (links unten), TURBO- 2 Scheiben-Wankelsystem (mitte unten), 4-Scheiber, Basis für den Turbo-Compound (rechts unten)

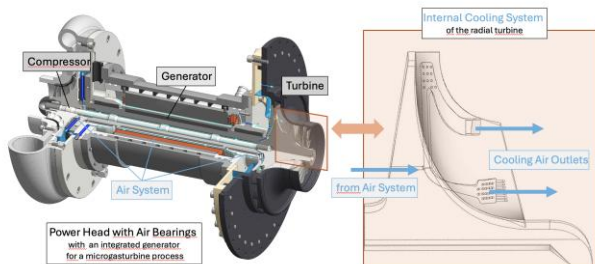


BILD 8. Luftgelagerter Turbo-Gen-Satz der MTiG (links), Darstellung des Luftsystems zur Kühlung, rechts gekühlte Radialturbine (rechts)

### 3.3. Aviation GenSet- und APU-Systeme

Hilfsenergiesysteme spielen in der Luftfahrt eine große Rolle, da für den sicheren Betrieb und die Konditionierung stets elektrische Hilfsenergie und/oder Druckluft bereitgestellt werden muss. So können luftgelagerte MTG- oder MTiG-Systeme als APU, als reine GenSet-Aggregate, als Range-Extender kleiner E-Flugzeuge oder beispielsweise als Kaltluftmaschinenprozess teil bei der Kabinenluftkonditionierung (vorteilhaft wegen der gewährleisteten reinen Luft durch die Luftlagerung) zum Einsatz kommen.

Ein interessantes Einsatzgebiet ist unter anderem der Einsatz als GenSet-System. MTG/MTiG-Konzepte zeigen,

dass der GenSet-Einsatz bis zu Dienstgipfelhöhen von 15,5 km gut möglich ist, wenn ein stromerzeugendes MTG- oder MTiG-System als Bi-Turbosystem mit einem zweiten luftgelagerten Turbosatz kombiniert wird (siehe Bild). Der Einsatzbereich liegt neben den Hybrid-elektrischen Luftfahrtanwendungen insbesondere im Bereich der hochfliegenden Kampf- und Überwachungsdrohnen. GenSet-Systeme sind aktuell im Bereich bis ca. 70 kWel realisierbar und können sehr gut mit dem HSD- und CRF/HSD-Turbo-Compound-Konzept (Kapitel 3.6) kombiniert werden. Eine motorische Kombination zur Realisierung eines Hyperbarverfahren ist nach eigenen Konzeptuntersuchungen sehr gut möglich (BILD 9). Neben Stoß- und Schwingungbelastungen wurden luftgelagerten Generator-Turbosysteme auch auf Nose Up-/Down und Einbaulage getestet. Hierbei konnte insbesondere die geführte Axiallagerung positiv verifiziert werden (BILD 10).

**High Altitude Aviation Gen Set - Konzept**

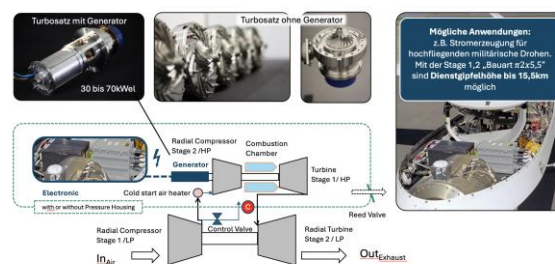


BILD 9. High Altitude GenSet -Konzept, auch als Hyperbar-Verfahren mit einem Verbrennungsmotor einsetzbar

**Gen Set – Einbaulage Test bestanden**

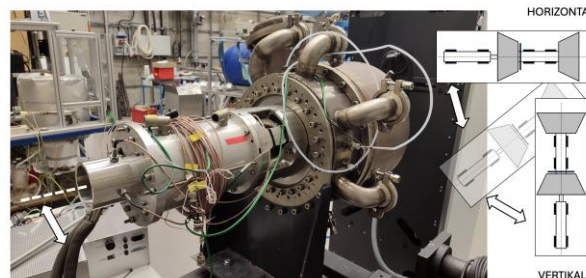


BILD 10. Einbaulagen- und Nose Up-/Down -Test

### 3.4. Luftgelagerte Turbosysteme für Brennstoffzellenanwendungen

Brennstoffzellen bieten erhebliche Vorteile bei elektrischer Effizienz und Emissionen für hybrid-elektrische Flugzeuge. Mit der vorgestellten luftgelagerten Turbotecnologie lassen sich Brennstoffzellen effizient aufladen: Die Leitungsdichte und der Wirkungsgrad steigen, und die Systeme werden höhentauglicher. Die Turbinenexpansion liefert zusätzliche Arbeit, erhöht die Gesamtleistung und verbessert die Systemeffizienz.

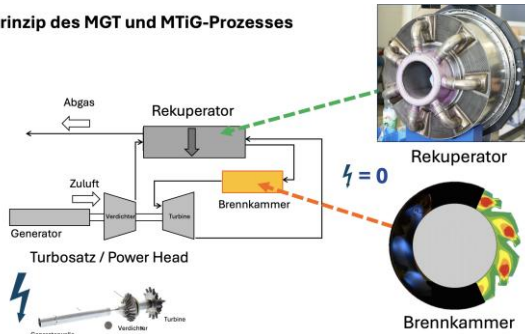
Bei Turbo-PEMFC-Systemen fungiert die Turbomaschine als E-Lader, der die Brennstoffzellenleistung direkt unterstützt. Bei MGT-SOFC-Systemen übernimmt das Hochtemperatur-Brennstoffzellenmodul gewissermaßen die Funktion der Brennkammer und ist in den Gasturbinenprozess integriert.

Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzellen sind heute der am häufigsten genutzte Brennstoffzelltyp mit einem vergleichsweise hohen TRL-Wert für Mobilitätsanwendungen. In den letzten Jahren wurden mehrere Verbesserungen in der Integration von MEAs und Bipolarplatten erzielt, wobei der Fokus auf erhöhter Stromdichte und reduzierter Katalysatorlast sowie damit verbundenen Kosten liegt. Hohe elektrische Wirkungsgrade werden auf Basis von Wasserstoff als Brennstoff erreicht, und Leistungsdichten von 3–4 kW el/kg auf Stack-Ebene sind möglich

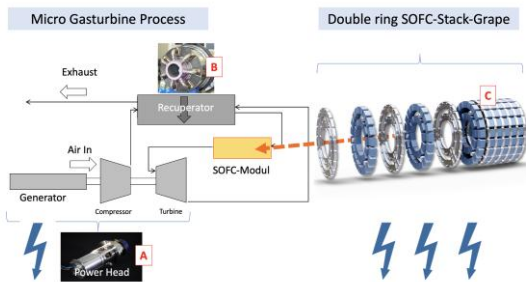
### 3.5. Die Turbo Fuel Cell (MGT-SOFC)

Mit dem Begriff „TURBO Fuel Cell“ wurde 2017 von Berg et al. ein sehr kompaktes und hocheffizientes MGT-SOFC-Hybrid-System beschrieben und in weiteren Forschungsprojekten validiert. Das System ist ein rekuperierter Mikro-Turbinenprozess (MGT, vgl. BILD 12) mit einem eingebetteten Festoxidbrennstoffzellensubsystem (SOFC, BILD 13) mit Hochtemperatur (HEX) und Redox-Wärmetauscher. Beim Fuelprocessing-Modul (im Falle der Wasserstoffanwendung nicht nötig) besteht der Redox-Wärmetauscher aus einem Nachoxidationsmodul mit integrierter Wärmetauscheranbindung zum Reformieren bei Kohlenwasserstoffbrennstoffen oder Cracken bei Ammoniak als Brennstoff.

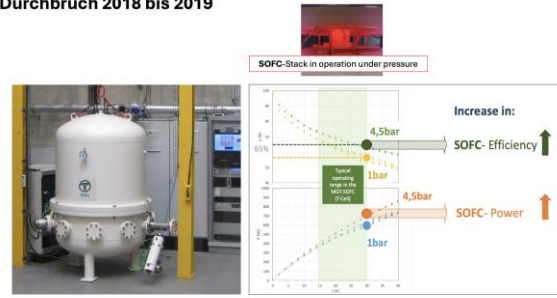
#### Prinzip des MGT und MTIG-Prozesses



#### Prinzip des MGT-SOFC Prozesses, Turbo Fuel Cell (T-CELL)

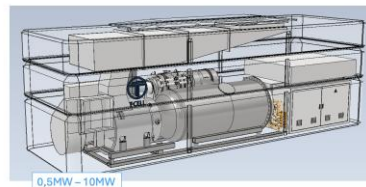
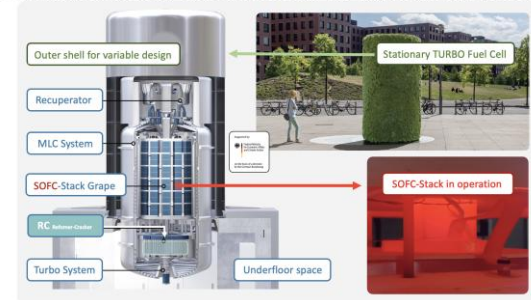


#### Durchbruch 2018 bis 2019



Im Oxidationsmodul wird das Anodenabgas exotherm mit dem Sauerstoff des Kathodenabgases der SOFC umgewandelt. Die Wärme aus der Brennstoffzelle und aus dieser Nachreaktion wird vom endothermen Reforming- oder Crackprozess genutzt. Aufgrund der hohen Temperatur existieren ideale Bedingungen für den Einsatz von Kohlenwasserstoffen (Kerosin) oder anderen Wasserstoffträgern (wie z. B. Methan oder Ammoniak). Turbo Fuel Cell-Systeme nutzen den Vorteil der hohen Wärmeintegration. Elektrische Wirkungsgrade von über 70% (theoretisch bis 80%, bezogen auf den unteren Heizwert des Brennstoffes) und die höhere Leistungsdichte zeigen deutlich die Vorteile einer Druckladung gegenüber SOFC-Systemen ohne MGT-Integration. Die Bilder 11, 12, 13, 14 und 15 geben einen Einblick in diese Technologie.

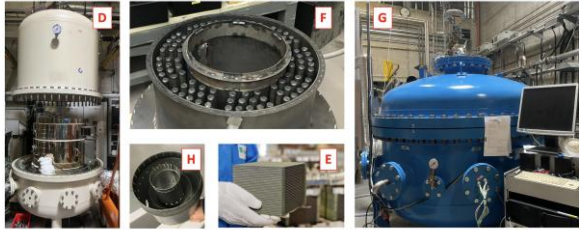
#### Forschungsvorhaben Turbo Fuel Cell (T-CELL), als Masterprozess



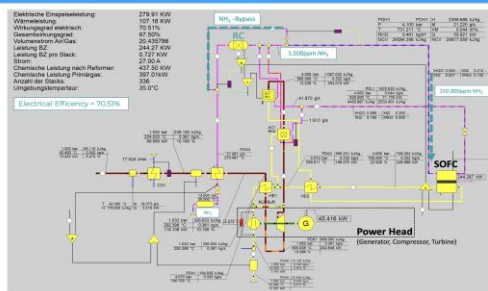
Dank des hochkompakten Designs kann das TFC-System heute bereits größenmäßig mit konventionellen Dieselaggregaten konkurrieren. Es lässt sich zeigen, dass mit weiterer Anpassung und Gewichtsreduktion der SOFC-Zellen die TURBO Fuel Cell-Technologie eine hohe Bedeutung als zukünftige Alternative im Mobilitätsbereich

erhalten wird. Tubulare und monolithische Zellkonzepte, eingebettet in die TFC-Architektur (unter Verwendung der beschriebenen luftgelagerten Turbosysteme), könnten eine zukünftige Technologieerweiterung in den Luftfahrtsektor erlauben.

**TURBO Fuel Cell Komponentenprüfstände @ BERG -Lab**



**Typical TURBO Fuel Cell cycle architecture**



**TURBO Fuel Cell Wirkungsgrad über der Last**

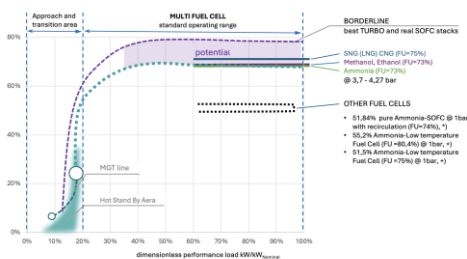


BILD 11. Mehr Informationen über das TURBO Fuel Cell System (MGT-SOFC), für stationäre Energiewandlung

Der heutige Stand der Technik bei SOFC-Systemen: Sie wurden überwiegend für stationäre Anwendungen entwickelt, basieren auf einer planaren Zellgeometrie und legen nur einen geringen Schwerpunkt auf gravimatische Leistungsdichte. Gravimatische Leistungsdichten nicht

aufgeladener planarer SOFC-Stapel liegen typischerweise im Bereich von 0,05–0,5 kWel/kg.

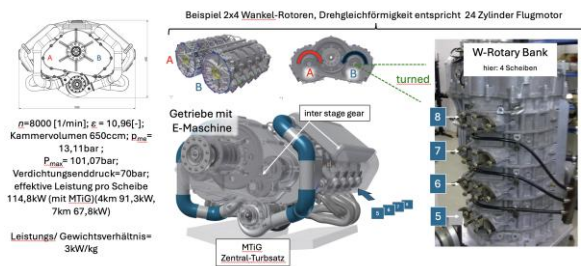
Die Vorteile der SOFC liegen hauptsächlich in einem zuverlässigen Kühlsystem bei höchsten erreichbaren Wirkungsgraden in Kombination mit der beschriebenen MGT-Technologie sowie einer hohen Brennstoffflexibilität. Kohlenwasserstoffbasierte Brennstoffe können ebenso effizient genutzt werden wie Wasserstoff (und sogar Ammoniak). Elektrische Wirkungsgrade von 70–75% sind mit der TFC-Architektur (hybride Konfiguration MGT mit einer SOFC) möglich. Durch das Airbus Central Research and Technology können SOFC-Zelltechnologien von 3-5kWel/kg mit einer tubularen Anodenunterstützten Bauweise aufgezeigt werden [11]. Tubulare und monolithische Zellkonzepte sind vielversprechend - sie erlauben theoretisch 10 kWel/kg auf Zellenebene basierend auf dem Stand der Technik der aktuellen SOFC-Materialien.

**3.6. Turbo-Compound Aero Engines**

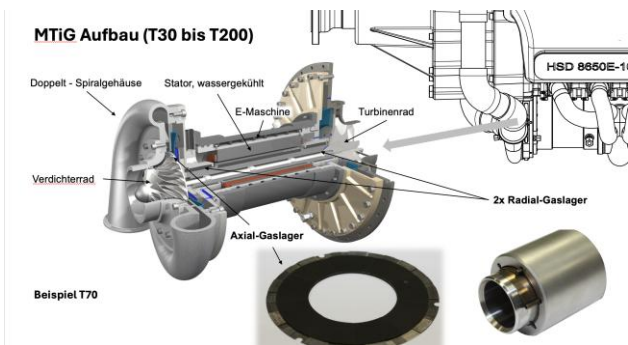
**3.6.1. Hybridelektrischer Basisantrieb (HSD)**

Das Basiskonzept für die gewählte Verbrennungskraftmaschine beruht auf einer Grundarchitektur der KKM500-Familie der Cottbuser Firma WankelSupertec GmbH ([www.wankelsupertec.de](http://www.wankelsupertec.de), [10]). Diese hat das Kreiskolbentriebwerk in den letzten Jahren erfolgreich weiterentwickelt. Die elektrische luftgelagerte Turbomaschine, die zur Aufladung des Motors eingesetzt wird, basiert auf einer Technologie der Cottbuser Firma Euro-K ([www.euro-k.de](http://www.euro-k.de) [11]) und auf eigenen grundlegenden Arbeiten [12].

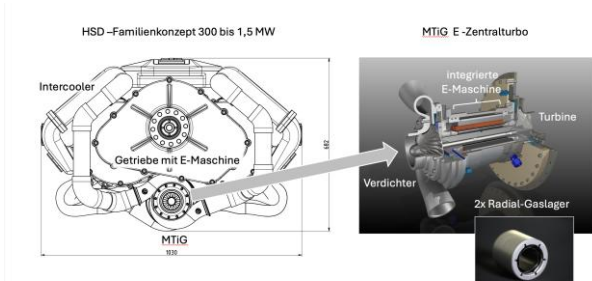
**Anwendungsbeispiel: Gasgelagerter MTIG- Zentral-TurboGen**  
im Wankel-TurboCompound HSD 8650E-10, Systemleistung ca.1MW



Die Wankeltriebwerkstechnologie mit luftgelagerter E-Turbomaschine (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) liefert neben einer einfachen Bauraumanpassung, einer hohen Leistungsdichte, der Vibrationsarmut und der Modulbauweise eine Möglichkeit für die Entwicklung neuartiger Antriebskonzepte auch für die allgemeine Luftfahrt der Zukunft. Für das System selbst wurde in der Vergangenheit das Potential für die luftfahrttechnisch geforderten TBO-Zeiten durch den Einsatz in Nischenmärkten nachgewiesen.



Der grundlegende technologische Stand in der Entwicklung des Motorenkonzepts insbesondere für die Diesel- und Kerosinanwendung kann verschiedenen Veröffentlichungen ([13], [14]) entnommen werden. Die hohe Zuverlässigkeit des Motorenkonzeptes in der Dieselanwendung konnte dabei durch einen NATO-Zyklustest und einen FAR-Zyklustest schon in frühen Untersuchungen belegt werden. Ebenso konnte der Nachweis einer Kerosintauglichkeit ähnlicher Motorenfamilien mit Rotationskolben bereits nachgewiesen werden [19].



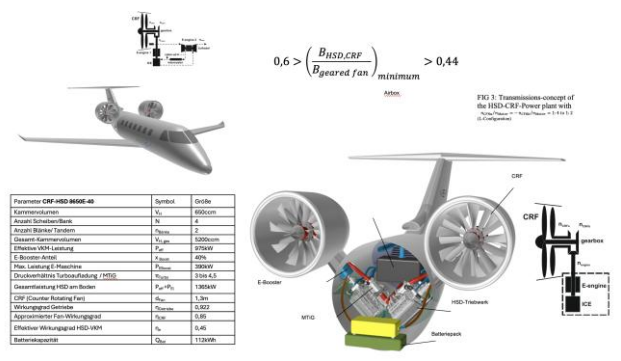
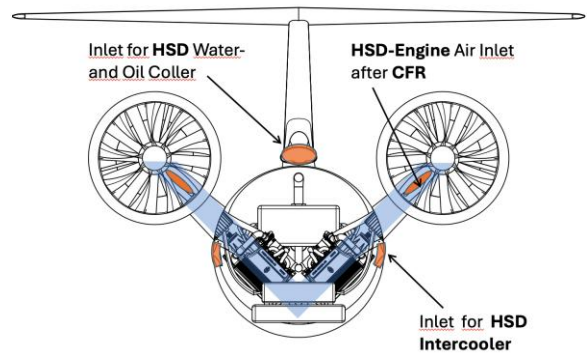
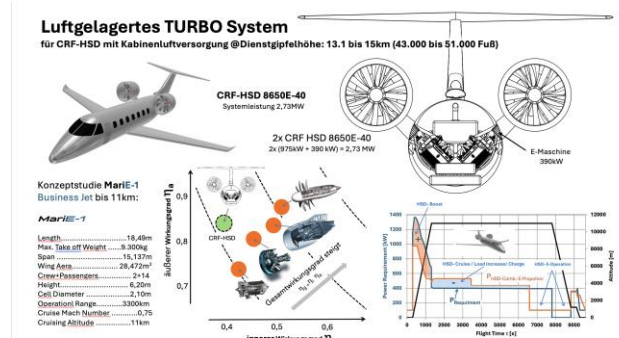
Das Brennverfahren wurde in der Vergangenheit ausführlich untersucht, weiterentwickelt und ist heute im serienmäßigen Einsatz zu finden [16]. Das für die Luftfahrttechnik so wichtige Leistungsgewicht erreicht beim Wankeltriebwerk bis zu 3kW/kg. Dieses lässt sich im Bereich zwischen den Gasturbinen (bis 5kW/kg) und der im Betrieb befindlichen Flugmotoren (1kW/kg) ansiedeln.

Durch die Hochaufladung mit dem beschriebenen MTiG-System (Mikroturbine mit integriertem Generator), welches im Prinzip ein Abgasturbolader mit hohem Druckverhältnis, integriertem Generator und einer Luftlagerung ist, kann ölfreie Kabinenluft gewährleistet werden. Dieses System wurde ursprünglich als Powerhead für eine automotiv, serielle Hybridanwendung vorgesehen und wurde mit einem externen Generator industrialisiert.

3.6.2. CRF- HSD- Antrieb

Vorgestellt werden auf dem HSD-Konzept (HSD=Hybrid Super-Drive, vgl. [9]) beruhende luftfahrttechnische Anwendungen für unterschiedliche parallelhybride Flugantriebe. Die Basistechnologie stützt sich auf der zuvor beschriebenen, vielstofffähige Wankeltriebwerksfamilie. Das HSD-Konzept liegt beim CRF-HSD ein Kammervolumen von 650ccm zu Grunde. Der Leistungsbereich (0,8 bis 1,36MW) wird mit einem innovativen elektrischen parallel-hybriden Turbo-Compound-Konzept abgedeckt. Hierbei kommt zur Aufladung der Kreiskolben-Verbrennungsmaschine eine

luftgelagerte MTiG-Turbomaschine mit integrierter E-Maschine zum Einsatz. Als Vortriebstechnologie trägt das Counter-Rotating-Fan (CRF)-Konzept, welches am Beispiel eines Flugzeugtechnologieträgers (Light-Jet) dargestellt wird, zur weiteren Steigerung der Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems bei.



3.6.3. Andere Anwendungen

Neben den hier beschriebenen Anwendungen gewinnen gasgelagerte Turbosysteme zukünftig auch bei geschlossenen Anlagen (Gaskältemaschine, Gaswärmepumpe, Hochtemperatur-Wärmepumpe), bei Joule-Prozess-Luftkältemaschinen und der Kabinenluftversorgung in den „More Electrical Engine“-Hybrid- bzw. elektrischen Luftfahrtanwendungen eine wichtige Rolle. Sie ermöglichen es, Luft höchster Qualität dem Kabinenluftmanagementsystem bereitzustellen und so die Gesundheit der Passagiere noch besser zu schützen.

Schrifttum (zum Extended Abstract)

- [1] C. K. Heinz Peter Berg, "Mikrogasturbinen-SOFC-Prozesse mit hohem Wirkungsgradpotential," in *Magdeburger Maschinenbautage*, Magdeburg, 2015.
- [2] Berg, H.P.: Entwicklung einer wirkungsgradoptimierten Mikrogasturbine für eine KWK. BTU Cottbus-Senftenberg, Lehrstuhl VFA, 2014.
- [3] H. P. Berg., O. Antoshkiv: Development of a Micro Gas Turbine, BTU Cottbus-Senftenberg, Lehrstuhl VFA, 2013.
- [4] Berg, H. P.: Kompakte, hocheffektive Mikrogasturbine mit integriertem Generator (MTiG) – Eine Komponente für die seriellen, hybriden Antriebssysteme der Elektroflugzeuge von morgen. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Rostock, 2015.
- [5] Berg H.P., Himmelberg A., Lehmann M., Dückerhoff R., Neumann M., The Turbo-Fuel-Cell 1.0 – family concept, Compact Micro Gas Turbine (MGT) – Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) energy converters in the 100-500 kW electrical power range for the future; 8th TSME-International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME 2017); IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 297 (2018) 012004
- [6] Berg H.P., Dückerhoff R., Lehmann M., Prechavut N., MICRO TURBO-FUEL-CELL-TECHNOLOGY - Hybrid compact turbo machinery technology and thermodynamic aspects regarding design parameters of a high efficient MGT-SOFC-system; Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics ETC12, April 3-7, 2017; Stockholm, Sweden; Paper ID: ETC2017-266
- [7] BTU Cottbus-Senftenberg, *TurboFuelCellFuE* <https://www.b-tu.de/t-cell/> retrieved 2023 /08 /28
- [8] Dückerhoff R., Berg H.P., Kleissl M., Walther A., Himmelberg A., *Flexibilization of an MGT-SOFC hybrid system for electricity and hydrogen production for the realization of a sustainable hydrogen economy* (TSME-ICOME 2022)
- [9] H. P. Berg, U. Malenky, A. Himmelberg, M. Mykhalyuk: Turbowankel-Triebwerksfamilien: Neuartige Antriebskonzepte für die allgemeine Luftfahrt der Zukunft, DGLR-Tagung, Rostock 2015
- [10] Internetpräsentation der Wankelsupertec GmbH, Cottbus [www.wankelsupertec.de](http://www.wankelsupertec.de), abger. am 18.08.16
- [11] Internetpräsentation der EURO-K GmbH Cottbus, [www.euro-k.de](http://www.euro-k.de), abger. am 18.08.16
- [12] H.P. Berg: Entwicklung einer wirkungsgradoptimierten Mikrogasturbine für eine KWK - Schlussbericht zum Zuwendungsnachweis F&E-große Richtlinie OP18 Auftragsnummer: 80140661, Cottbus 2014
- [13] 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
- [14] H. Izweik: Interner Bericht zur numerischen Berechnung der Gasströmung in einem rotierenden Modell mit AVL Fire am LS VFA/BTU Cottbus-Senftenberg
- [15] T. Poojitganont, H. P. Berg, H. T. Izweik, A. Himmelberg, BTU Cottbus-Senftenberg, Germany - Multi-fuel Wankel Engine for Small Aircrafts and UAVs Applications: Strategies of the Engine Development, ISABE-2007-1128
- [16] H.P. Berg, O. Antoshkiv, et. al.: Brennverfahrensentwicklung für eine neuartige Kreiskolbenmotorenfamilie, ATZ/MTZ-Konferenz Virtual Powertrain Creation 2008
- [17] <https://research.airbus.com/en/products-systems/hylena>, abgerufen am 16.Sep.2025
- [18] H. P. Berg: Entwicklung eines neuartigen, vielstofffähigen Range-Extenders für zukünftige Elektrofahrzeuge, ATZ/TÜV Süd Konferenz, Engine.Tech 2009, Wolfsburg, Germany, June 2009
- [19] Klotz, Eiermann, Kolosow: Abschlussbericht zum Projekt „Untersuchung der Tauglichkeit des WANKEL-Kerosin-Kreiskolbenmotors für den Einsatz in der allgemeinen Luftfahrt“ der Wankel-Rotary GmbH 1999
- [20] H. P. Berg, U. Malenky, O. Antoshkiv, R. Mattke: Kompakte hocheffektive Mikrogasturbine mit integriertem Generator (MTiG), DLRK 2015, DocumentID 370070
- [21] H. P. Berg, U. Malenky: Designstudie zum HSD-Flugmotorenkonzept, Vorarbeiten zum Flugmotor 2030, LS VFA/ BTU Cottbus-Senftenberg August 2015
- [22] DLR: Projektbeschreibung Gegenläufige ummantelte Fans (CRTF), Institut für Antriebstechnik, Abteilung Fan und Verdichter, DLR Köln 2013, [www.dlr.de/at/desktopdefault.aspx/tabid-9123/15735\\_read-38877/](http://www.dlr.de/at/desktopdefault.aspx/tabid-9123/15735_read-38877/)
- [23] N. Prechavut; H. P. Berg: AN EXPERIMENTAL STUDY ON STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF CANTILEVER-TYPE FOIL BEARINGS, Brandenburg University of Technology, 03046 Cottbus, Germany, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2015 DocumentID: 370040
- [24] H. Schmiedeke, M. Sinapius, N. Prechavut: Experimental Investigation of the Leaf Type Bearing Structure with Undersprings Under Dynamic Excitation, Machines 2021, 9, 15
- [25] Abschlussbericht Folienlager II: Betriebssichere aerodynamische Folienlager für die Lagerung schnell laufender Rotoren, FVV Vorhaben Nr. 1267, IAF, TU Braunschweig, VFA BTU Cottbus-Senftenberg, 2019