

Intelligente Entwurfsmethoden für Magerbrennkammern für Flugzeugtriebwerke (IMPACT-AE)

Carsten Clemen, Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG,
Eschenweg 11, Dahlewitz, 15827 Blankenfelde-Mahlow, Deutschland

Matthieu Rullaud, Snecma Groupe Safran,
Site de Villaroche, 77550 Moissy Cramayel, Frankreich

Antonio Peschiulli, Avio S.p.A,
Via I Maggio 56, 10040 Rivalta di Torino, Italien

Mikael Orain, Onera,
Chemin de la Hunière, 91761 Palaiseau, Frankreich

Marco Zedda, Rolls-Royce plc,
PO Box 31, Derby, DE248BJ, Großbritannien

Zusammenfassung

Die Einführung der Magerverbrennungstechnologie in Brennkammern für Flugzeugtriebwerke bietet den Vorteil von bis zu 80% geringeren NO_x Emissionen. Die Technologie trägt aber nur dann effektiv zur Entlastung der Umwelt bei, wenn sie für eine große Bandbreite neuer Anwendungen und in großer Stückzahl zum Einsatz kommt. Um dies zu ermöglichen, sind jedoch zuverlässige, validierte und schnelle Entwurfsmethoden für Magerbrennkammern notwendig.

Aus diesem Grund wurde im November 2011 das Projekt IMPACT-AE im Rahmen des von der EU geförderten Framework 7 (ACP0-GA-2011-265586) gestartet, mit dem Ziel, neue Entwurfsmethoden im Rahmen eines integrierten Entwurfssystems bereitzustellen, um Magerbrennkammern für Triebwerke mit fortschrittlicher Architektur bzw. thermodynamischen Zyklen unter Berücksichtigung der neuesten Entwurfsregeln für solche Brennkammern zu ermöglichen.

IMPACT-AE unterstützt die europäischen Triebwerkshersteller dabei technologisch mit den internationalen Mitbewerbern mithalten, die zum Teil bereits in der Lage sind Magerverbrennungstechnologie für Flugzeugtriebwerke anzubieten. Das zentrale Element des Projektes ist die Entwicklung und Validierung von Entwurfsmethoden, um NO_x und CO Emissionen systematisch zu reduzieren. Dies wird durch eine Optimierung des Brennkammerentwurfprozesses erreicht. Dies beinhaltet die Kopplung von Vorentwurfsprogrammen, die Verwendung von fortschrittlicher Geometrieparametrisierung und die Automatisierung des Prozesses. Gleichzeitig wird die Vorhersagegenauigkeit der numerischen Modelle durch die Entwicklung und Anwendung von genaueren Wärmeübergangs- und NO_x-Modellen verbessert. Basierend auf einer realistischeren Modellierung der Magerbrennkammer und der Möglichkeit, Skalierungseffekte zu untersuchen wird eine Optimierung von Brennkammern für zukünftige Triebwerksanwendungen möglich. Dadurch soll eine signifikante Verringerung der Entwicklungszeiten für Magerbrennkammern um bis zu 50% erzielt werden.

Die vorliegende Veröffentlichung gibt einen Überblick über die individuellen Arbeiten innerhalb von IMPACT-AE. Diese sind:

- *Die Entwicklung intelligenter Entwurfsmethoden für schadstoffarme Verbrennung*
- *Die Modellierung und die Entwicklung fortschrittlicher Brennkammerwandkühlungskonzepte*
- *Validierung von Entwurfsregeln für Brennstoffdüsen durch detaillierte Flammendiagnostik*
- *Demonstration der neuen Methodik für Magerbrennkammern anhand von Vollringbrennkammertests*

1. EINLEITUNG

Der erwartete jährliche Anstieg des Luftverkehrs um 3% über die nächsten 20 Jahre macht eine Verringerung der Emissionen durch die Luftfahrtbranche dringend erforderlich. Dies wird nicht nur durch verschärfte gesetzliche Bestimmungen hinsichtlich der Beschränkung der Lärm- und Stickoxidemissionen sondern auch durch höhere Anforderungen von Seiten der Kunden an verbrauchsarme Triebwerke forciert. Um solche verbrauchsarmen Triebwerke mit geringen Schall- und Schadstoffemissionen zu entwickeln, muss die Triebwerksarchitektur und der thermodynamische Zyklus so auf die erwartete Flugmission abgestimmt werden, dass eine optimale Balance zwischen CO₂ Emissionen (Brennstoffverbrauch), Schadstoffausstoß (NO_x/CO) und Lärmemissionen erreicht wird.

Triebwerksarchitekturen die dazu geeignet sind, sind der Getriebefan, Direktgetriebene Turbofans mit fortschrittlichen Zyklen und Open Rotor, siehe BILD 1 und 2, wie sie zum Beispiel in den EU Framework 6 Projekten NEWAC [1] und DREAM [2] untersucht wurden. Als Konsequenz solch unterschiedlicher Architekturen müssen die einzelnen Triebwerkskomponenten sehr flexibel entworfen sein, um an die verschiedenen Anforderungen anpassbar zu sein. Für die Brennkammerauslegung bedeutet das, dass die über die letzten zwei Jahrzehnte entwickelten Brennkammertechnologien, getrieben durch die ACARE Ziele die NO_x Emissionen zu minimieren nun an die neuen Triebwerksarchitekturen und ihre unterschiedlichen Zyklen angepasst werden müssen. Jede neue Triebwerksanwendung benötigt ein abgestimmtes Design der Brennkammer, das auf die Anforderungen optimiert werden kann.

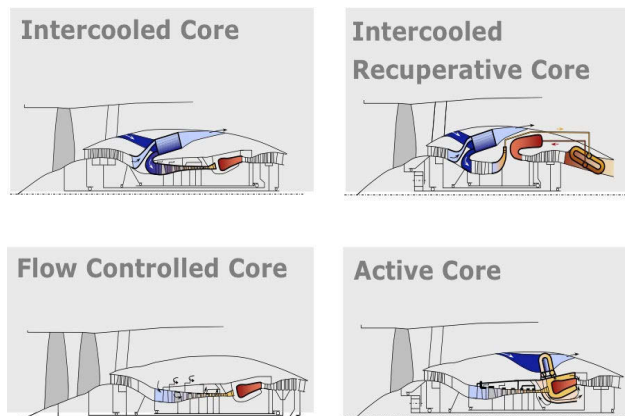


BILD 1: Zukünftige Triebwerksarchitekturen [1]

Aufgrund des limitierten Erfahrungsschatzes mit der neuen Technologie sind effektive und validierte Methoden um Magerbrennkammern für die Anwendung in Triebwerken mit unterschiedlichen Architekturen und Größen zu entwerfen, zu skalieren und zu optimieren, nicht vorhanden.

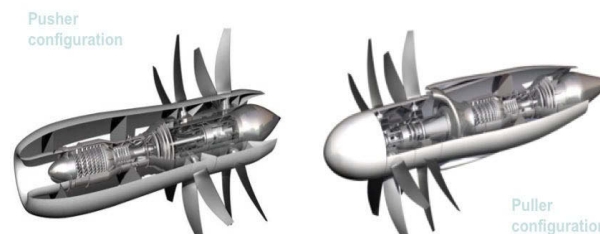


BILD 2: Open Rotor Triebwerksarchitekturen (Rolls-Royce)

Konkret bedeutet das, dass zukünftig eine Entwurfsmethodologie für Brennkammern benötigt wird, die möglichst schnell ein optimales Brennkammerdesign hinsichtlich aller Anforderungen (d.h. NO_x, CO, UHC, Ruß, Wirkungsgrad, Lärm, Operabilität, Gewicht, Kosten) für ein neues Triebwerk liefert. Diese Methode muss validiert sein und soll dabei alle Entwurfskriterien für Magerbrennkammern berücksichtigen, die in abgeschlossenen und laufenden Technologieprogrammen entwickelt wurden, um die von der ACARE gesetzten Emissionsziele zu erreichen.

Aus diesem Grund wurde das neue europäische Projekt IMPACT-AE (Intelligent Design Methodologies for Low Pollutant Combustors for Aero-Engines) von 19 Partnern unter der Leitung von Rolls-Royce Deutschland ins Leben gerufen, in dem alle wichtigen europäischen Triebwerkshersteller, unterstützt von Forschungsinstituten und Universitäten, gemeinsam an neuen Entwurfsmethoden zu arbeiten.

IMPACT-AE hat ein Budget von 7.5 Millionen Euro mit einer Förderung von 5 Millionen Euro durch die EU. Das Projekt wurde im November 2011 gestartet und hat eine Laufzeit von 48 Monaten.

IMPACT-AE wird die bestehenden Erkenntnisse bereits abgeschlossener bzw. laufender Projekte berücksichtigen (BILD 3) mit dem Ziel ihrer Integration in eine Entwurfsmethodik für (Mager-) Brennkammern unter Berücksichtigung aller Disziplinen. Das beinhaltet die Konzeptdefinition, die Brennkammerdimensionierung, den Entwurf der Brennkammerwandkühlung und der Brennstoff-

düsen. Darüber hinaus wird die Implementierung der Methode bereits in der frühen Auslegungsphase dazu führen die Entwicklungszeiten für Brennkammern signifikant verkürzen.

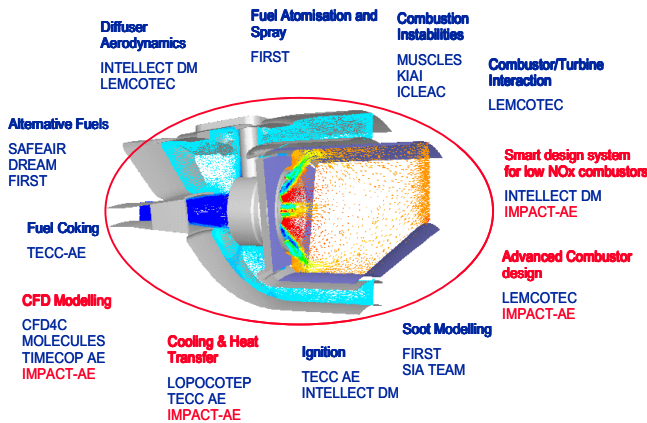


BILD 3: EU geförderte Brennkammerprojekte

2. PROJEKTÜBERBLICK UND ZIELE

Das Hauptziel von IMPACT-AE ist die Entwicklung und Validierung eines intelligenten Entwurfssystems für hoch effiziente (Mager-) Brennkammern. Die dazu verwandte Entwurfsmethodologie basiert auf den Erkenntnissen anderer EU Projekte (BILD 3) und im besonderen auf den für RQL-Brennkammern entwickelten Entwurfssystem aus dem Projekt INTELLECT D.M. [3-9]. Die Hauptmerkmale des neuen Entwurfssystems sind eine realistischere und genauere Repräsentation von modernen (Mager-) Brennkammern, die Flexibilisierung der Entwurfsmethoden um Skalierung auf verschiedene Triebwerksarchitekturen zu ermöglichen (BILD 4) und die Optimierung von Brennkammern auf hohen Wirkungsgrad und geringe NOx Emissionen.

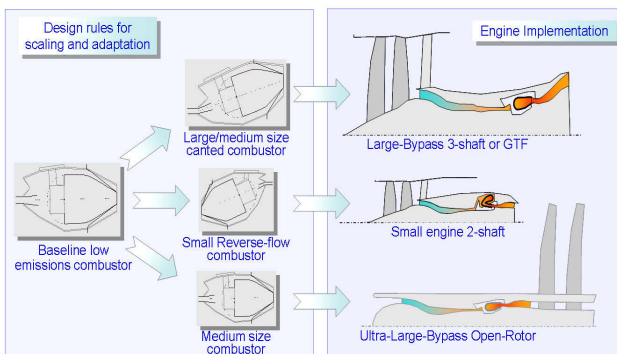


BILD 4: Anwendung des IMPACT-AE Entwurfssystems zur Skalierung und Adaption auf verschiedene Triebwerksarchitekturen

BILD 4 zeigt das die in IMPACT-AE entwickelten Methoden es erlauben werden, die Anforderungen der Magerbrennkammertechnologie bereits in der frühen Entwurfsphase für kleine, mittlere und große Brennkammern mit gerader, angestellter und auch rückwärts gerichteter Strömungsrichtung zu implementieren. Dies ist ein großer Schritt in der Triebwerksentwicklung. Die Technologie soll auch in CLEAN SKY JTI [10] angewendet werden, um sie in Kerntriebwerks- bzw. Triebwerksdemonstratoren (TRL 6 und 7) zu validieren.

Das IMPACT-AE Projekt unterstützt direkt das ACARE Ziel, bis 2020 die NOx Emissionen um 80% zu senken. Darüber hinaus wird der Zusammenhang zwischen NOx und Wirkungsgrad speziell bei Teil- und Unterlast, untersucht, so dass IMPACT-AE nicht nur die NOx Emissionen adressiert, sondern auch CO und UHC. Des weiteren wird IMPACT-AE es den europäischen Triebwerksherstellern ermöglichen mit den internationalen Konkurrenten Schritt zu halten [11], die zum Teil bereits Magerbrennkammertechnologie in Serienprodukten einsetzen.

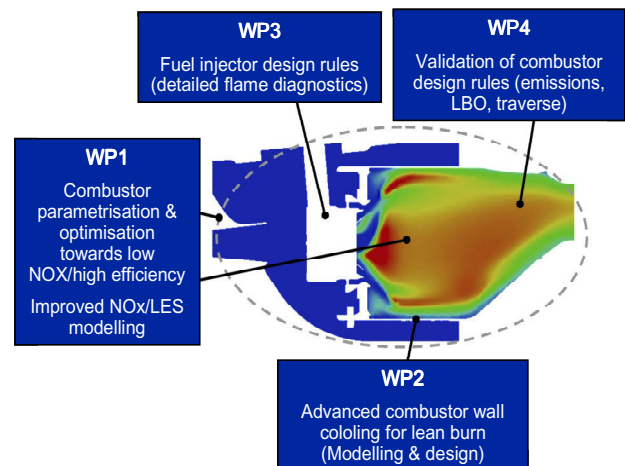


BILD 5: IMPACT-AE Projektstruktur

Die wissenschaftlichen Ziele von IMPACT-AE sind:

- Automatisierung des Brennkammerauslegungsprozesses für schadstoffarme Magertechnologie und Kopplung von Vorentwurf und Entwurf (von 1D zu 3D-CFD)
- verbesserte Parametrisierung des Brennkammersystems um Skalierung zu ermöglichen
- verbesserte Genauigkeit der Simulationssoftware durch verbesserte Wandkühlungs- und NOx-Modelle

- Entwurf und experimentelle Validierung von neuen Brennkammerkühlungsschemata
- Verbesserte Brennkammern hinsichtlich NOx und Wirkungsgrad basiert auf Optimierung und KBE Methoden
- Rapid-Prototyping Prozesse zur schnelleren Validierung von Brennkammermodellen
- Entwurfsregeln für (Mager-) Brennkammern durch detaillierte Messungen innerhalb der Brennkammer und Validierung der Entwurfsmethodik mit Multi-Sektor- und Vollringtests

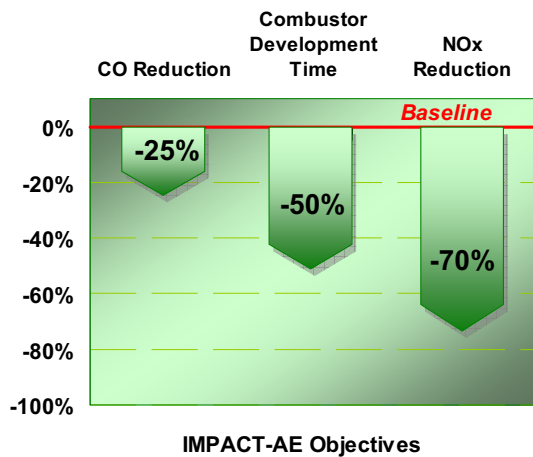


BILD 6: Erwartete Verbesserungen durch IMPACT-AE

Basierend auf diesen Zielen wurde die in BILD 5 gezeigte Projektstruktur mit vier Arbeitspaketen etabliert.

Der erwartete Nutzen aus dem IMPACT-AE Projekt ist:

- 70% Reduzierung von NOx gegenüber dem CAEP/2 Standard, das korrespondiert mit 60% gegenüber dem gültigen CAEP/6 Standard und damit die direkte Adressierung der ACARE 2020 Ziele (BILD 6).
- Signifikante Reduzierung der Brennkammer Entwicklungszeit um 50% und damit der Triebwerksentwicklungszeit um etwa 20% (BILD 6) verglichen mit dem jetzigen Prozess (BILD 7) der auf der iterativen Abfolge von 1D, 2D und 3D Werkzeugen basiert und in dieser Form für eine zeiteffiziente Optimierung des Systems nicht nutzbar ist.
- 25% Verringerung der CO Emissionen verglichen mit der besten verfügbaren Magerbrennkammertechnologie

- Verbesserte Vorhersagegenauigkeit des Entwurfsprozesses
- Möglichkeit der Optimierung auf verschiedenen Ebenen innerhalb des Brennkammerentwurfs durch Automatisierung der Prozesse
- Skalierung von Brennkammern für zukünftige Anwendungen

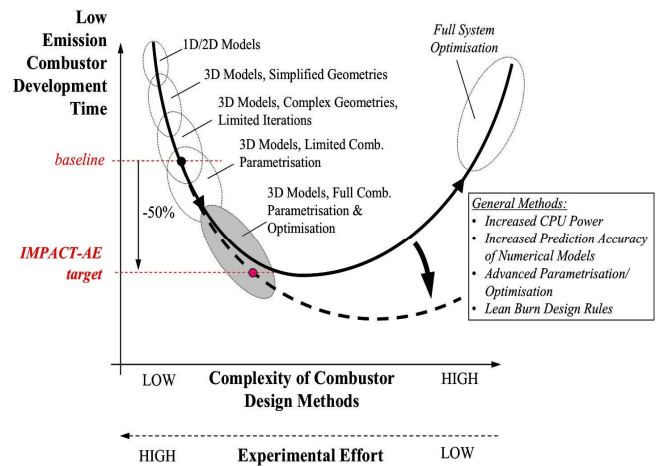


BILD 7: Verbesserung des Entwurfsprozesses durch IMPACT-AE

Im Detail wird das fortschrittliche Brennkammerentwurfsprogramm folgendes leisten:

- Bestimmung und Unterstützung der Auslegung von
 - Brennkammervolumen für Wiederentzünden in der Höhe und Durchstarten
 - Anzahl der Brennstoffdüsen und deren Dimensionierung und Skalierung
 - Wandkühlungsanforderungen, Auslegung der Brennkammerwände
 - Aerodynamik des Diffusors und der Brennkammeraußengeometrie
- Kopplung zu CFD und Optimierungstools
- Unterstützung der Bewertung und Vorhersage der Brennkammeroperabilität
- Bewertung der Anfälligkeit hinsichtlich thermoakustischer Instabilitäten und der erwarteten Frequenzen
- Definition von Brennstoffstufungsszenarien
- Emissionsvorhersage für den ICAO Zyklus und Reiseflugbedingungen
- Unterstützung der Definition der Fertigungsstrategie und der Bestimmung der Modulkosten

- Unterstützung der Lebensdauervorhersage und Bestimmung der Lebenszykluskosten

IMPACT-AE zielt darauf ab TRL 4-5 zu erreichen und wird 2015 abgeschlossen sein. TRL 7 (Triebwerksdemonstrator) kann etwa drei Jahre später erreicht werden, rechtzeitig um die ACARE 2020 Ziele zu erfüllen. Es wird erwartet, dass das erste Triebwerk, das mit der neuen Magerbrennkammer ausgerüstet werden wird, aus dem mittleren bis hohen Schubbereich stammt, da relativ zu Größe und Gewicht zusätzliche Kosten-, Gewichts- und Komplexitätsimplikationen dort einfacher zu handhaben sind, als bei kleinen Triebwerken.

3. ARBEITSINHALTE VON IMPACT-AE

3.1. Arbeitspaket 1: Brennkammerparametrisierung und -optimierung

In der Vergangenheit wurden neue Triebwerksbrennkammern überwiegend durch aufwändige Tests validiert. Das Wissen daraus wurde in einfache Vorauslegungsprogramme implementiert, um den Auslegungsprozess neuer Brennkammern zu verbessern. Mit der stetigen Weiterentwicklung

der numerischen Methoden (CFD) und der Rechnerkapazitäten ergibt sich nun die Möglichkeit, wissensbasierte (KBE – „Knowledge Based Engineering“) Werkzeuge für den Auslegungsprozess nutzbar zu machen. Das Arbeitspaket 1 fokussiert sich daher auf die Entwicklung von wissensbasierten Werkzeugen für die industrielle Nutzung.

3.1.1. Knowledge Based Engineering Tools

Die Entwicklung der KBE Tools für die Anwendung an Triebwerksbrennkammern begann im FW6 Projekt INTELLECT D.M. und internen Industrieprojekten. Diese Werkzeuge beinhalten das Wissen über klassische (RQL) Brennkammern.

In IMPACT-AE wird nun das erworbene Wissen über Magerbrennkammertechnologie und damit verwandte Themen wie zum Beispiel Effusionskühlung, Mischungs- oder Strahlungseinflüsse berücksichtigt, so dass der Umfang der KBE Tools sich entsprechend vergrößern wird.

In der Vergangenheit wurden aufgrund der vorhandenen Rechnerleistung nur 1D und 2D Brennkammermodelle in KBE Tools implementiert.

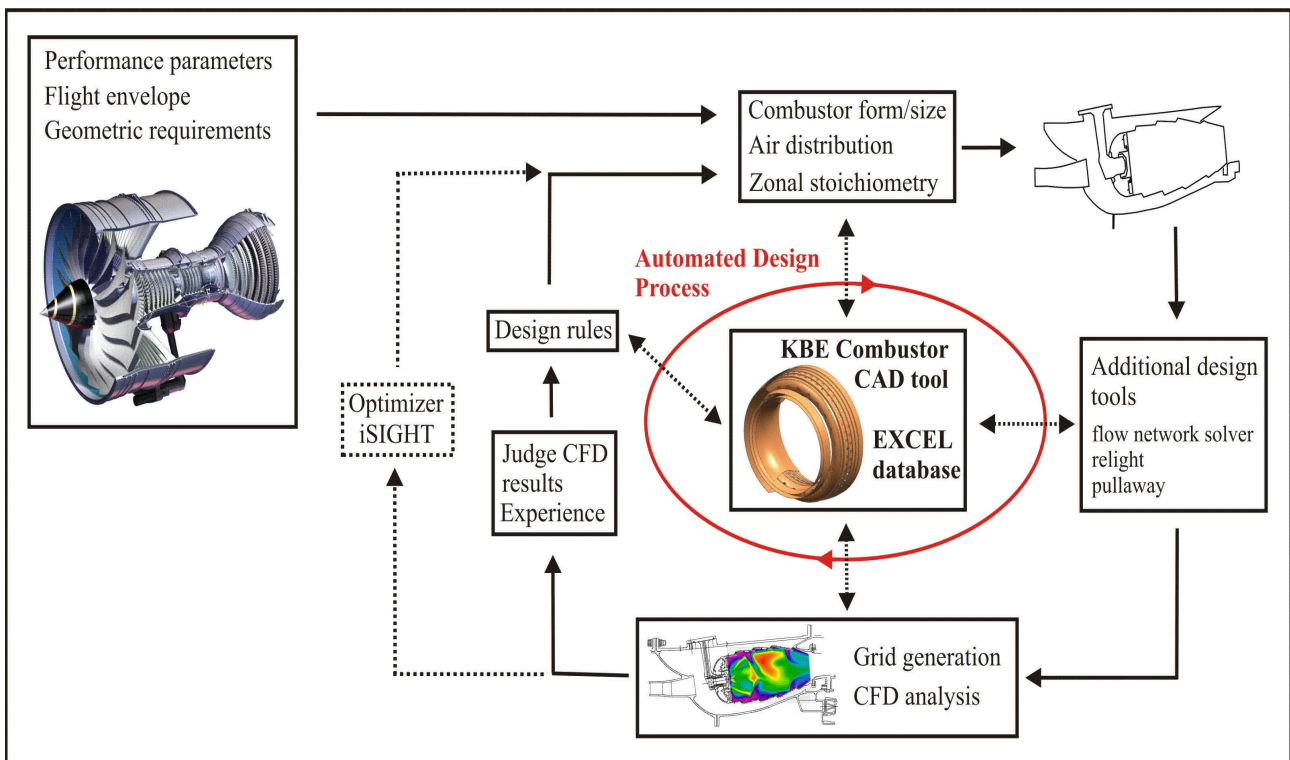


BILD 8: KBE Tool Prozesskette

Heute steht diese in ausreichender Kapazität zur Verfügung, so dass in IMPACT-AE vollständige 3D Brennkammermodelle in die KBE Tools integriert werden.

BILD 8 zeigt beispielhaft den Aufbau des KBE Tools, das von Rolls-Royce Deutschland in IMPACT-AE aufgebaut wird. Es beinhaltet den automatischen KBE Design Prozess – mit Schnittstellen zu externen Programmen – der ein parametrisches 3D CAD Modell liefert. Dieses Modell wird automatisch vernetzt (BILD 9) und mit 3D CFD analysiert und bewertet. Ergebnis ist eine Brennkammergeometrie. Der gesamte Prozess kann auch als integrierte Optimierung mit Isight [12] ausgeführt werden.

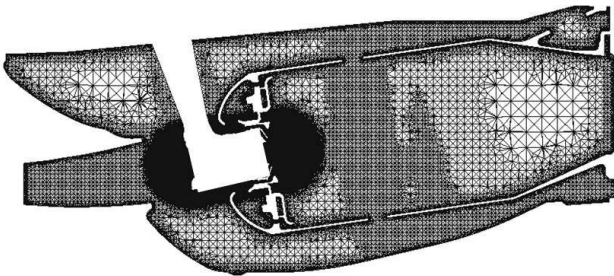


BILD 9: Typische unstrukturierte Vernetzung einer Brennkammer

Für die Vernetzung der parametrisch definierten Brennkammergeometrie mit Diffusor, Brennstoffdüse und NGV werden die neusten Entwicklungen auf diesem Gebiet berücksichtigt und der zeitaufwändige Vernetzungsprozess mit kommerziellen Tools wird durch einen robusten automatisierten Prozess ersetzt. Hier kommt zum Beispiel das Vernetzungstool BOXER [13] des IMPACT-AE Partners Cambridge Flow Solutions zum Einsatz.

Darüber hinaus werden die KBE Tools auch die CFD Berechnungen ausführen, steuern und analysieren. Das beinhaltet auch die Erstellung und Anwendung von Randbedingungen.

Durch die Automatisierung von Vernetzung und Berechnung kann eine signifikante Zeitersparnis im Brennkammerentwurfsprozess erreicht werden und gleichzeitig eine der großen Fehlerquellen abgestellt werden.

Damit werden außerdem die Voraussetzungen für die Integration des Prozesses in eine Optimierungsschleife geschaffen.

Die neuen KBE Tools ermöglichen damit einen um bis zu 50% schnelleren, effizienteren und robusteren Brennkammerentwurf basierend auf parametrischen Modellen und CFD Netzen, die eine Skalierung von Brennkammergeometrien sowie eine Optimierung hinsichtlich der Emissionen ermöglichen.

3.1.2. Fortschrittliche CFD Methoden

Heute werden in der Industrie standardmäßig so genannte RANS CFD Löser eingesetzt, die die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes Gleichungen numerisch lösen. Diese CFD Löser werden daher auch in die KBE Tools implementiert.

Gerade auf dem Gebiet der Brennkammerberechnung stoßen diese Art von Lösern jedoch an ihre Grenzen. Die Vorhersage von Phänomenen wie Verbrennungsinstabilitäten oder Wiederentzündungen unter Höhenbedingungen sind mit ihnen nicht möglich.

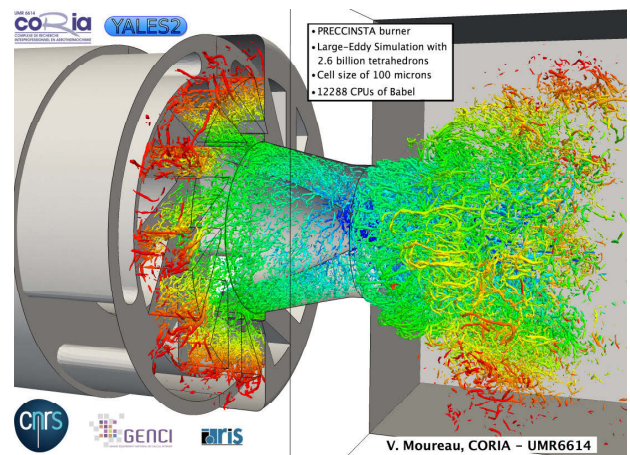


BILD 10: PRECCINSTA Brenner (INSA-CORIA: YALES2)

Für diese Berechnungen sind komplexere Methoden nötig, wie zum Beispiel die Large Eddy Simulation (LES), die durch Auflösen der großen Turbulenzstrukturen und Abbildung der kleinen Strukturen über ein Feinstrukturmodell [14] sowohl für die Vorhersage komplexer instationärer Strömungen als auch einfacher Strömungen, die mit RANS berechnet werden können, geeignet sind. BILD 10 zeigt beispielhaft ein LES Ergebnis des PRECCINSTA Brenners des IMPACT-AE Partners INSA-CORIA mit dem YALES2 Löser [15] und BILD 11 die Sandia D Flamme.

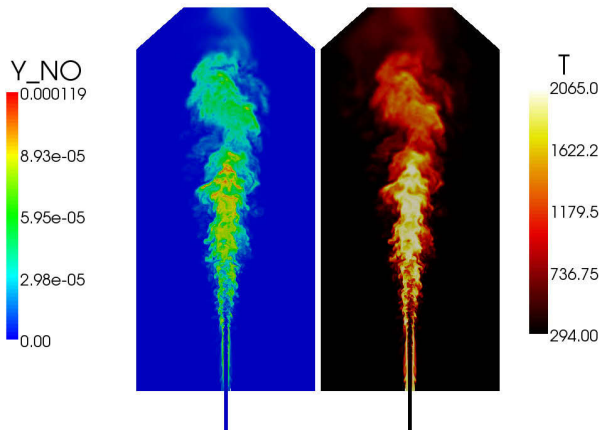


BILD 11: SANDIA D Flamme (INSA-CORIA: YALES2)

IMPACT-AE greift dabei auf Ergebnisse früherer EU-Projekte zurück, die sich mit der Entwicklung von LES beschäftigt haben, wie zum Beispiel: ICLEAC – Verbrennungsinstabilität, MOLECULES - Gasreaktion, LES TIMECOP – Verbrennung von Gasen und Flüssigkeiten, Verbrennungsstabilität, Wiederentzündungen bei Höhenbedingungen.

Neu in IMPACT-AE ist jedoch die detaillierte Untersuchung der NO_x Vorhersage durch LES und deren verbesserte Implementierung in vorhandene Löser wie zum Beispiel YALES2 und PRECISE-UNS [16]. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für die zukünftige Nutzung von LES in der Industrie.

3.2. Arbeitspaket 2: Fortschrittliche Brennkammerwandkühlung

In diesem Arbeitspaket werden die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit von numerischen Modellen zur Vorhersage der Effizienz und Wirkungsweise von Wandkühlungskonzepten für Magerbrennkammern verbessert. Dies ist notwendig, um die Menge der Luft die für die Kühlung verwendet wird, zu minimieren, um mehr Luft für die primäre Verbrennung und die gezielte Steuerung (Optimierung) von Flammentemperatur und NO_x Entstehung zu optimieren.

Dazu werden mehrer Ansätze verfolgt:

- Die Entwicklung von numerischen Methoden für die Modellierung von Wandkühlung unter besonderer Berücksichtigung von effusionsgekühlten Brennkammern (BILD 12) und dem Einfluss von instationären Druckschwankungen auf die Wärmelast an

der Wand. Dazu wird von den Partnern DLR und MTU ein neues Modell für den instationären Energietransport an den Wänden, sowohl für die Anwendung in RANS als auch URANS und LES, entwickelt.

- Turbomeca wird ein Thermalmodell für effusionsgekühlte Brennkammern entwickeln und mit einem Vollringbrennkammertest bei der Onera validieren (BILD 13).

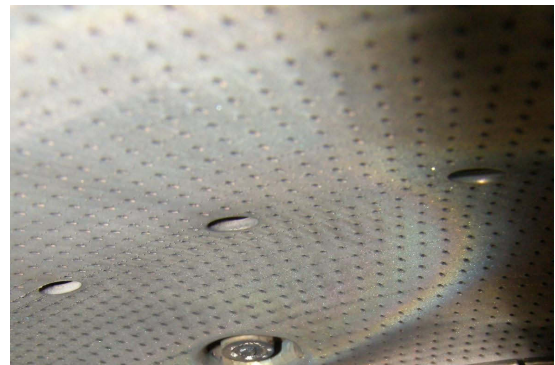


BILD 12: Effusionsgekühlte Brennkammerwand

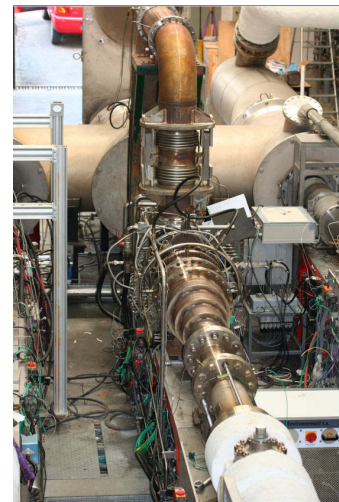


BILD 13: Onera Vollring-Testrig

- Ein weiterer Ansatz sieht eine Weiterentwicklung eines schnellen Netzwerktools (BILD 14) für die Auslegung von Kühlungskonzepten vor und damit eine direkte Kopplung mit Arbeitspaket 1. Die durch dieses Tool generierten Geometrien sollen mit Hilfe von Rapid-Prototyping gefertigt werden und in einem von Avio entwickelten Brennkammersektorrig

(VALIDATOR), das den schnellen Austausch und Test von Brennkammerwandelementen mit unterschiedlichen Kühlungsschemata ermöglicht, getestet werden. Dabei wird auf Erfahrungen früherer EU Forschungsvorhaben zurückgegriffen (NEWAC, TECC, KIAI).

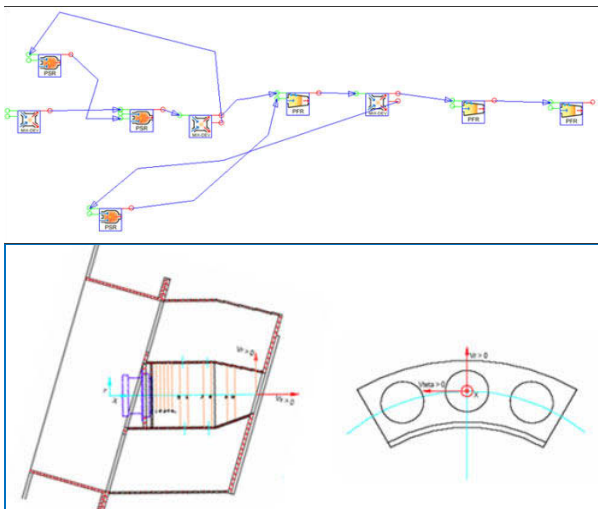


BILD 14: Avio Netzwerktool und VALIDATOR Sektorrig

3.3. Arbeitspaket 3: Entwurfsregeln für Brennstoffdüsen

In Arbeitspaket 3 werden optische Messungen der Brennerflamme durchgeführt um detaillierte Erkenntnisse über deren Topologie und Verhalten zu gewinnen. Das betrifft im Einzelnen: Temperaturverteilung, Brennstoffkonzentration, Tröpfchenverteilung und -größe, Entstehung von CO und NOx, Geschwindigkeitsverteilung. Die numerische Vorhersage der Verbrennungsmechanismen ist schwierig und es fehlt an geeigneten Diagnosemöglichkeiten, um die Mechanismen im Detail zu verstehen und daraus numerische Methoden abzuleiten zu können.

Daher müssen neue, robuste Diagnosetechniken für den Einsatz bei hohen Drücken und Temperaturen entwickelt werden, die zeitaufgelöste Messungen von Skalar- und mehrdimensionalen Strömungsfeldern in 2-Phasen-Strömungen ermöglichen.

Optische Methoden, speziell laser-basierte, sind geeignet dieses Ziel zu erreichen und kleinskalige, instationäre Phänomene aufzulösen.

Das Arbeitspaket 3 von IMPACT-AE fokussiert sich daher darauf, optische Messverfahren zu verbessern und sie an fortschrittlichen Magerbrennern bei hohem Druck und Temperatur einzusetzen und detaillierte experimentelle Daten für die Entwicklung von Entwurfsregeln für effiziente Magerbrenner zu gewinnen.

Dabei werden zwei Ansätze verfolgt:

- Der erste Ansatz beschäftigt sich mit der Neuentwicklung von Messmethoden. So wird von Onera eine optische Diagnostik entwickelt, um genauere Messdaten über die Bildung von CO im Bereich der Interaktion von Pilot- und Hauptflamme zu erhalten und das Verständnis der Einflussfaktoren auf die Verbrennungseffizienz zu gewinnen. Von Rolls-Royce plc wird ein schneller (> 10 Hz) Emissionsensor entwickelt, um die Brennkammeremissionen zu messen und Daten zur CFD Validierung zu gewinnen.

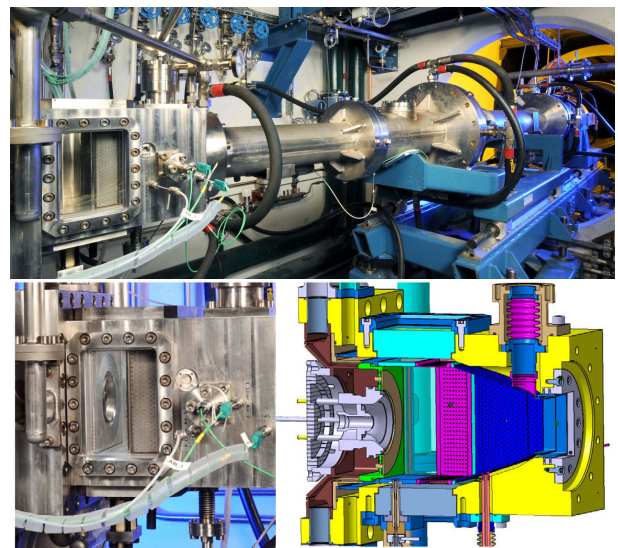


BILD 15: DLR BOSS (Big Optical Single Sector) Rig [17]

- In einem zweiten Ansatz werden verfügbare optische Methoden wie zum Beispiel PIV und (P)LIF aus vorangegangenen EU Projekten wie MOLECULES, LOPOCOTEP, INTELLECT D.M., SIA-Team und TLC zur

Diagnose von Magerbrennern bei hohem Druck und hoher Temperatur eingesetzt. Dies geschieht durch das DLR im BOSS (Big Optical Single Sector) Rig (BILD 15) an Rolls-Royce Magerbrennern [17] und bei der Onera (BILD 16) an Multipunkt-Injektions-Brennern der Snecma. Beide Untersuchungen dienen dazu, die Verbrennung an Magerbrennern besser zu verstehen, Entwurfsregeln abzuleiten und die Entwurfsmethoden aus Arbeitspaket 1 zu validieren.

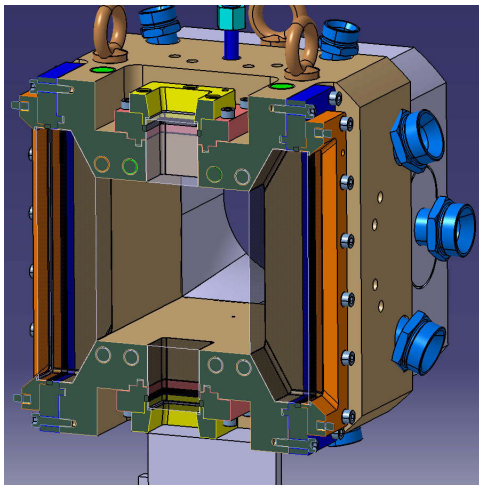


BILD 16: Optischer Prüfstand der Onera

3.4. Arbeitspaket 4: Validierung der Brennkammerentwurfsregeln

Die Entwicklung von Magerbrennkammern erfordert einen schrittweisen Ansatz zur Validierung neuer Konzepte und Technologien beginnend mit Tests auf niedrigem TRL (Technology Readiness Level), um vielversprechende Lösungen zu identifizieren. Darauf folgend wird mit komplexeren Tests auf höherem TRL die Eignung der Konzepte hinsichtlich ihrer Emissionen und Betriebsstabilität detailliert untersucht und bewertet. Dies ermöglicht TRLs von 4 bis 5 zu erreichen.

In Arbeitspaket 4 werden die in IMPACT-AE entwickelten bzw. aus anderen EU Projekten weiterentwickelten Magerbrennkammerentwürfe hinsichtlich ihrer Emissionen und Leistungsfähigkeit überprüft. Dabei liegt der Fokus nicht nur auf den Brennkammeremissionen, sondern auch auf dem Betriebsverhalten und der Stabilität des Systems.

Dazu werden Tests auf TRL 4-5 durchgeführt. Die Daten werden außerdem zur Validierung der in Arbeitspaket 1 entwickelten Auslegungsregeln und KBE Systeme genutzt.

Im Detail werden von den in IMPACT-AE beteiligten Partnern Rolls-Royce Deutschland, Snecma, Turbomeca und Avio Multisektor- bzw. Vollringbrennkammer Tests auf verschiedenen Prüfständen durchgeführt:

- Emissionstest im Multisektor mit einer gestuften Brennstoffdüse zur Bestimmung und Validierung von verbesserten Brennstoffstufungsregimen in einem im TLC Projekt entwickelten Prüfstand der Onera (BILD 17).

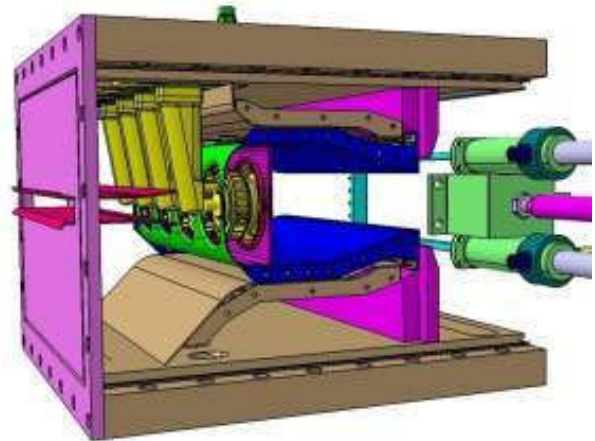


BILD 17: Snecma Multipunkt-Injektor im Onera Testrig

- Vollringbrennkammertest zur Bestimmung von Emissionen, Traverse und Verlöschungsverhalten einer Magerbrennkammer mit einer LPP-Brennstoffdüse von Turbomeca und zur Optimierung von Brennstoffsplit und Validierung der Emissionsvorhersage und Wandkühlungsinteraktion (aus Arbeitspaket 2).
- Multisektortests zur Validierung der in Arbeitspaket 1 entwickelten Rapid-Prototyping Methode und der in Arbeitspaket

2 entwickelten Wandkühlungskonzepte an einem Prüfstand der Universität Florenz (BILD 18).

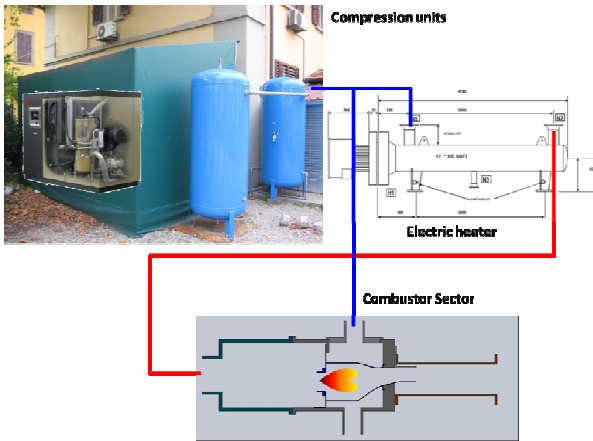


BILD 18: Prüfstand der Universität Florenz

- Detaillierte Untersuchung eines innovativen TVC (Trapped Vortex Combustor)-Magerbrenners aus dem TECC Projekt mit PIV und OH PLIF Methoden mit dem Ziel der Brenneroptimierung und der Validierung von LES Berechnungen.
- Vollringbrennkammertest einer Magerbrennkammer im HBK2 des DLR Köln (BILD 19) zur Validierung eines Brennkammerentwurfs basierend auf den KBE Methoden entwickelt in Arbeitspaket 1.

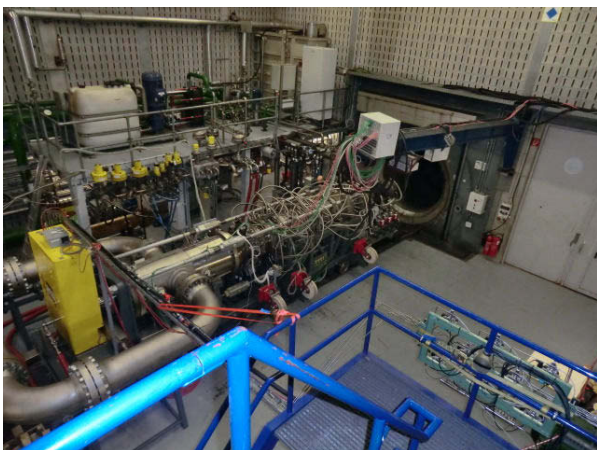


BILD 19: Rolls-Royce Vollring-Testrig im Prüfstand HBK2 des DLR Köln

Ergänzt wird das Arbeitspaket durch Experimente an einem System zur Kühlung von

Verdichterzapfluft mit Nebenstromkanalluft (CCA: Cooled Cooling Air), die zur Kühlung von Brennkammerinnengehäuse und Turbine genutzt wird. Dazu wird an der Loughborough University ein isothermer Test eines neuen CCA-Systems in einem Vollringbrennkammertest durchgeführt (BILD 20).

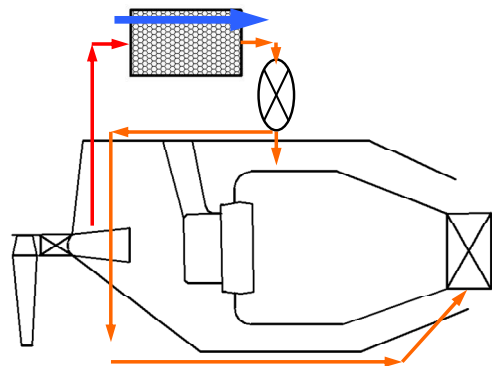
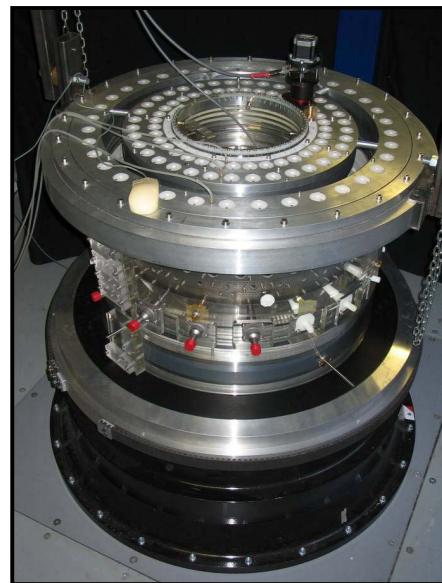


BILD 20: Testrig der Loughborough University und CCA Funktionsschema

Die im Rahmen des Arbeitspaketes 4 gewonnenen Daten werden für die Validierung der in Arbeitspaket 1 und 2 entwickelten Methoden sowie der in IMPACT-AE definierten Ziele verwendet.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Veröffentlichung ist Teil des IMPACT-AE Projektes, das im Rahmen des

Europäischen Framework 7 Programmes kofinanziert ist und sich mit innovativen Entwurfsmethoden für die Entwicklung von Magerbrennkammern für Flugzeugtriebwerke befasst. Mit IMPACT-AE werden validierte Entwurfsmethoden und optimierte Lösungen für zukünftige Brennkammerentwürfe bereitgestellt. An dem Projekt sind Industriepartner, Universitäten und Forschungseinrichtungen aus 4 europäischen Ländern beteiligt, der Projektstart war im November 2011, die Laufzeit beträgt 4 Jahre.

Hauptziel des Projektes ist es, neue Entwurfsmethoden im Rahmen eines integrierten Entwurfssystems zu erarbeiten, um Magerbrennkammern für Triebwerke mit fortschrittlicher Architektur bzw. thermodynamischen Zyklen unter Berücksichtigung der neuesten Entwurfsregeln für solche Brennkammern zu ermöglichen.

Das zentrale Element des Projektes ist die Entwicklung und Validierung von Entwurfsmethoden um NO_x und CO Emissionen systematisch zu reduzieren. Dies wird durch eine Optimierung des Brennkammerentwurfsprozesses erreicht und beinhaltet die Kopplung von Vorentwurfsprogrammen, die Verwendung von fortschrittlicher Geometrieparametrisierung und die Automatisierung des Prozesses. Gleichzeitig wird die Vorhersagegenauigkeit der numerischen Modelle durch die Entwicklung und Anwendung von genaueren Wärmeübergangs- und NO_x-Modellen verbessert. Basierend auf einer realistischeren Modellierung der Magerbrennkammer und der Möglichkeit, Skalierungseffekte zu untersuchen wird eine Optimierung von Brennkammern für zukünftige Triebwerksanwendungen möglich. Dadurch soll eine Verringerung der Entwicklungszeiten für Magerbrennkammern um bis zu 50% erzielt werden.

Die Veröffentlichung gibt einen Überblick über die Projektstruktur und die Projektziele.

5. DANKSAGUNG

Die Arbeit wird durch das 7. Rahmenprogramm der Europäischen Union (FP7/2007-2013) unter dem Grant Agreement ACP0-GA-2011-265586 gefördert.

Die Autoren danken der EU Kommission für die Unterstützung des Projektes sowie dem Projektkonsortium für die Erlaubnis zur Veröffentlichung.

6. ABKÜRZUNGEN

1D, 2D, 3D	Ein, zwei, drei dimensional
ACARE	Advisory Council for Aeronautics Research in Europe
BOSS	Big Optical Single Sector
CAD	Computer Aided Design
CAEP	Committee on Aviation Environmental Protection
CCA	Cooled Cooling Air
CFD	Computational Fluid Dynamics
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
EU	Europäische Union
FW	Framework
ICAO	International Civil Aviation Organization
JTI	Joint Technology Initiative
KBE	Knowledge Based Engineering
LES	Large Eddy Simulation
LPP	Lean Premixed Prevaporized
NO _x	Stickoxide (NO und NO ₂)
PIV	Particle Imaging Velocimetry
(P)LIF	(Planar) Laser Induced Fluorescence
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
RQL	Rich-Burn-Rich-Quench
TRL	Technology Readiness Level
UHC	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe
URANS	Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes
US(A)	United States (of America)
WP	Workpackage, Arbeitspaket

7. REFERENZEN

- [1] G. Wilfert, J. Sieber, A. Rolt, N. Baker, A. Touyeras, S. Colantuoni, "New Environmental Friendly Aero Engine Core Concepts", ISABE-2007-1120.
- [2] <http://www.dream-project.eu>
- [3] N. Pegemanyfar, M. Pfitzner, "Erstellung eines parametrischen Brennkammermodells für die automatisierte Auslegung von Flugzeugtriebwerksbrennkammern", Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2005, Friedrichshafen, 26.-29 September 2005.

- [4] A.D. Walker, J.F. Carrotte, J.J. McGuirk, "Enhanced external aerodynamic performance of a generic combustor using an integrated OGV/Pre-diffuser design technique", ASME Turbo Expo 2005, Power for Land, Sea and Air, 8.-11. Mai 2006, Barcelona, Spanien.
- [5] N. Pegemanyfar, M. Pfitzner, R. von der Bank, R. Eggels, M. Zedda, "Development of an automated preliminary combustion chamber design tool", ASME Turbo Expo 2005, Power for Land, Sea and Air, 8.-11. Mai 2006, Barcelona, Spanien.
- [6] T. Otten, M. Plohr, R. von der Bank, "Gegenüberstellung des Emissionsverbesserungspotentials von Brennkammertechnologien und anderen Weiterentwicklungen am Lufttransportsystem", Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2006, Braunschweig, 6.-9 November 2006.
- [7] A.D. Walker, J.F. Carrotte, J.J. McGuirk, "Compressor-Diffuser-Combustor aerodynamic interactions in lean module combustors", ASME Turbo Expo 2007, Power for Land, Sea and Air, 14.-17. Mai 2007, Montreal, Kanada.
- [8] N. Pegemanyfar, M. Pfitzner, "State-of-the-art combustor design utilizing the preliminary combustor design system Precodes", ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air, 9.-13. Juni 2008, Berlin, GT2008-50577.
- [9] A. Andreini, M. Cerutti, B. Facchini, L. Mangani, "Modelling of turbulent combustion and radiative heat transfer in a object-oriented CFD code for gas turbine", ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air, 9.-13. Juni 2008, Berlin, GT2008-51117.
- [10] <http://www.cleansky.eu>
- [11] G. Norris, "Exploiting eCore – Tests for next-gen regional and narrow-body engines move to next phase on eCore 1", Aviation week and space technology, 12. November 2009.
- [12] <http://www.3ds.com/products/simulia/portfolio/i-sight-simulia-execution-engine/overview/>
- [13] W. N. Dawes, S. A. Harvey, S. Fellows, N. Eccles, D. Jaeggi, W. P. Kellar, "A practical demonstration of scalable, parallel mesh generation", 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 5.-8. Januar 2009, Orlando, Florida, AIAA-2009-0981.
- [14] Fröhlich, J., Large Eddy Simulation turbulenter Strömungen, Vieweg + Teubner Verlag, 2006.
- [15] V. Moureau, P. Domingo, L. Verwisch, "From Large-Eddy Simulation to Direct Numerical Simulation of a lean premixed swirl flame: Filtered laminar flame-PDF modeling", Combustion and Flame Volume 158, Issue 7, Juli 2011, Seiten 1340-1357.
- [16] K. Nold, P. Gerlinger, R. Eggels, M. Aigner, "Transported PDF modeling of turbulent non-premixed jet flames including soot formation", AIAA Joint Propulsion Conference 2010.
- [17] U. Meier, J. Heinze, L. Lange, C. Hassa, T. Doerr, L. Rackwitz, "Characterisation of the Combustion Performance of Low Emission Fuel Injectors with Laser Measurements", Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2011, Bremen, 27.-29 September 2011.