

ENTWICKLUNG DER OPTISCH ZUGÄNGLICHEN DRUCKBEAUFSCHLAGTEN OCORE- MAGERBRENNKAMMER IN SELEKTIVER LASERSCHMELZBAUWEISE

O. Diers, T. Richter[‡], T. Conzen, J. Mengerig[‡], C. Hassa, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Antriebstechnik, Linder Höhe, 51147 Köln, Deutschland

Zusammenfassung

Für den Hochdruckbrennkammerprüfstand HBK1 wurde die optisch zugängliche OCORE-Brennkammer komplett im Selektiven Laserschmelzverfahren aus dem Werkstoff Inconel 718 hergestellt. Die aus den drei Komponenten Plenum, Flammrohr und Übergangsbereich bestehende Brennkammer ist luftgekühlt. Dabei sind bei den drei monolithischen Komponenten die aufgrund des Bauprinzips gegebenen Möglichkeiten eines mehrschaligen Aufbaus der Brennkammer in Konstruktion und Fertigung umgesetzt worden. Im Plenum werden Primär-, Sekundär- und verschiedene Kühlluftmassenströme in übereinander liegenden Kanälen geführt. Das Flammrohr ist mit einer Prall-Effusions-Kühlung versehen und von zwei Seiten über die komplette Länge der Brennkammer optisch zugänglich. Zur Kompensation der unterschiedlichen Wärmedehnungen sind im Flammrohr Federn integriert. Darüber hinaus können an den Seiten des Flammrohres wassergekühlte Wandelemente zur Aufnahme von Kamerasonden eingebracht werden. Diese Seitenwände sind so ausgeführt, dass die Sonden aus der Brennkammer zurückgesetzt sind und so die Strömung möglichst wenig beeinflussen. Im Übergangsbereich zur Turbine, bzw. Brennkammeraustritt können alle Seiten der Brennkammer mit Glasscheiben versehen werden, so dass ein maximaler optischer Zugang gegeben ist. Durch den Betrieb der Brennkammer über viele Betriebsstunden ohne technische Störungen konnte der Nachweis erbracht werden, dass es möglich ist komplette Brennkammern mit dem neuen Fertigungsverfahren des Selektiven Laserschmelzens als Monolith herzustellen und problemlos zu betreiben.

1 EINLEITUNG

Die Magerverbrennungstechnik hat das größte Potential zur Reduktion der Stickoxide und Partikelemissionen aus Flugtriebwerken. Im Hinblick auf die Emissionsbelastung der Atmosphäre ist dieser ausschließlich von der Komponente Brennkammer zu leistende Beitrag auch kostengünstig, wenn man ihn mit den Entwicklungskosten vergleicht, die für die CO₂ Reduktion durch Minderung des Treibstoffverbrauchs aufzuwenden sind. Anders als in konventionellen Brennkammern kommt die Strömungsführung bei Magerverbrennung ohne Sekundärluftfeinmischung aus. Die Brennkammerluft strömt stattdessen zum größten Teil durch die verdrallten Brennerdüsen. Dadurch verändert sich die Strömung am Turbineneintritt, was bei der Integration der Brennkammer ins Triebwerk berücksichtigt werden muss. Hierzu sind

zunächst genauere Daten zur Brennkammeraustrittsströmung vonnöten. Die Charakterisierung der Austrittsbedingungen von Magerbrennkammern wurde bislang nur durch CFD-Rechnungen und Abgasanalysen durchgeführt. Eine wesentliche Verbesserung wird von optischen Methoden erwartet, die in Zusammenarbeit mit Rolls-Royce Deutschland im Rahmen des EU-Projektes „Low Emissions Core-Engine Technologies“ (Lemcotec) [1] in Ringbrennkammerversuchen eingesetzt werden sollen. Zunächst müssen diese Messtechniken jedoch an einem geeigneten Versuch erprobt werden, der die Einsatzbedingungen hinsichtlich optischer Zugänglichkeit und Strömungsbedingungen ausreichend genau simuliert. Diese Erprobung wird in der Einzelsektor-Brennkammer OCORE (Optical Combustor Exit) durchgeführt, die speziell für diesen Zweck vom DLR entwickelt und hergestellt

[‡]jetzt RSC Engineering GmbH, Wilhelm-Ruppert Str. 38, 51147 Köln, Deutschland
[‡]DLR-Systemhaus Technik, Linder Höhe, 51147 Köln, Deutschland

wurde. Erstmals ist dabei komplette Brennkammer im Verfahren des selektiven Laserschmelzens (SLM-Selective Laser Melting) hergestellt worden.

2 FERTIGUNGSMETHODE

Bei der Fertigungsmethode des selektiven Laserschmelzens wird ein Bauteil durch einen gezielten schichtweisen Materialaufbau hergestellt. Dabei befindet sich ein Pulverbett aus Metall auf einer vertikal verstellbaren Traversierplatte. Mittels eines horizontal verfahrbaren Lasers kann das Metallpulver punktuell im Fokus des Lichtstrahls aufgeschmolzen werden. Dabei verbinden sich nebeneinander liegende Pulverpartikel untereinander und mit dem bereits unter der Pulveroberfläche liegenden gefertigten Bauteil. Nach Abschluss aller punktuellen Schmelzvorgänge in der horizontalen Ebene wird die Traversierplatte vertikal abgesenkt und auf der Oberfläche eine neue Pulverschicht aufgebracht. Danach wird in der nächsten Ebene der selektive Schmelzvorgang erneut durchgeführt. Eine schematische Darstellung dieses Vorgangs ist in Abbildung 1 gezeigt.

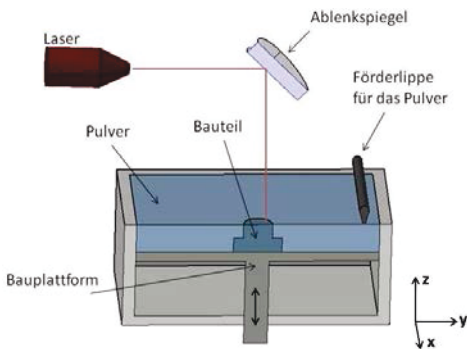


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Bauteilherstellung mit SLM [2]

Die frei verfügbare Bauraumgröße der zur Herstellung der OCORE-Brennkammer genutzten Maschine Concept Laser M2 Cusing beträgt 245mmx245mmx240mm (LxBxH).

Im Vergleich zu einer konventionellen Fertigung ist beim selektiven Laserschmelzen die Konstruktion im speziellen auf den Fertigungsprozess abzustimmen. In der langjährigen Erfahrung des DLR bei der SLM-Fertigung von

Brennern und Brennkammerwandschindeln haben sich dabei die in Tabelle 1 aufgelisteten Fertigungsgrenzen für den Werkstoff Inconel 718 herauskristallisiert.

| | |
|---|----------|
| Min. Wandstärke ohne Stützkonstruktion | 0,2 mm |
| Min. Bohrungsgröße (Achse in Aufbaurichtung) | 0,3 mm |
| Min. Bohrungsgröße (Achse 90° zur Aufbaurichtung) | 0,6-1 mm |
| Max. Bohrungsgröße (Achse 90° zur Aufbaurichtung) | 13 mm |
| Max. horizontaler Überhang ohne Stützkonstruktion | 0,5mm |
| Max. Winkel zur Aufbaurichtung | 55° |

Tabelle 1: SLM-Fertigungsgrenzen für Inconel 718

Grundsätzlich ist zu beachten, dass mit Hilfe von Stützkonstruktionen aufgebaute Geometrien so ausgeführt sein müssen, dass die Stützen gegebenenfalls auch wieder entfernt werden können. Weiterhin muss auch sichergestellt werden, dass das in Hohlräumen verbliebene Pulver nach dem Fertigungsprozess entfernt werden kann. Da bei der Fertigungsmethode auch in der unmittelbaren Umgebung des Laserstrahls durch Wärmeleitung Pulver aufgeschmolzen wird, ist in Abhängigkeit von der Aufbaurichtung insbesondere bei Löchern die Maß- und Geometriehaltigkeit nicht immer gegeben. Um dem entgegenzuwirken, sind bei der Konstruktion von Lochgeometrien an verschiedenen Stellen gezielte Aufmaße vorzusehen. Im Ergebnis sind so Effusionskühlluftlöcher von guter Qualität fertigbar, die im Herstellungsprozess nicht weiter nachbearbeitet werden müssen [3]. Im Vergleich mit abrasiven Fertigungsverfahren können bei Kühlluftkanälen aus der SLM-Fertigung sogar verbesserte Fertigungsgenauigkeiten erzielt werden [2].

3 MESSSTRECKE, BRENNKAMMER UND FLAMMROHR

Als Messstrecke wird die Gesamtheit der drucktragenden oder funktionsbehafteten Bauteile in der unmittelbaren Umgebung der Brennkammer bezeichnet, die in die Prüfstandsinfrastruktur integriert wird. Dabei besteht die in Abbildung 2 dargestellte OCORE Messstrecke aus den Komponenten Plenum und der direkt stromab liegenden Brennkammer. Im Plenum werden zum einen die beiden heißen Luftmassenströme aus den elektrischen Luftherzern zusammengeführt.

Zum anderen werden dort durch Montagezugänge die Brennstoffleitungen in die Messstrecke eingeführt. Neben den Brennstoffleitungen werden im Plenum

außerdem noch eine Vielzahl von Druck- und Temperaturenhernern in die Messstrecke geführt. Zusätzlich können an dieser Stelle auch durch extern platzierte Generatoren Partikel in die Messstrecke eingebracht werden. Diese werden benötigt um optische Geschwindigkeitsmessungen in der Brennkammer durchführen zu können. Der maximale Auslegungsdruck des Plenums und des Brennkammerdruckgehäuses liegt bei 25 bar. Da die Festigkeit des Druckgehäuses mit zunehmender Temperatur abnimmt, ist das Plenum mit einer Innenisolierung ausgekleidet. Dadurch sinkt zum einen die Temperatur der drucktragen Struktur, welche dadurch kleiner dimensioniert werden konnte, zum anderen wird eine Abkühlung der erhitzten Luft durch Wärmeverluste stark reduziert.

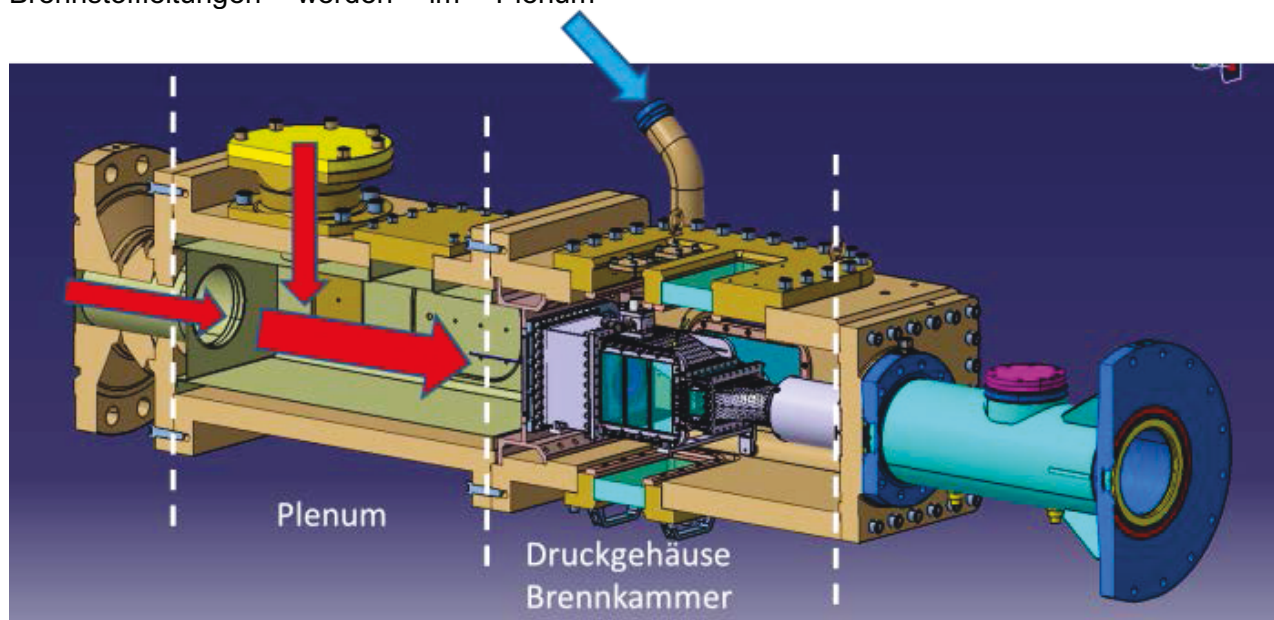


Abbildung 2: OCORE-Messstrecke mit Plenum und Druckgehäuse Brennkammer; rote Pfeile: vorgewärmte Luft, blauer Pfeil: kalte Kühlluft

Die maximale Temperatur der zugeführten Luft liegt bei 900 K. Am stromabseitigen Ende des Plenums im Übergang zur Brennkammer befindet sich ein Lochblech mit der Funktion eines Turbulenzgenerators zur Erreichung einer homogenen Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung am Brennkammereintritt. Gleichzeitig dient das Lochblech der gezielten, definierten Luftstromaufteilung. Direkt stromab des Lochblechs liegt ein Strömungsteiler, in dem die vorgewärmte Luft in den beiden orthogonal zur Strömungsrichtung liegenden

Ebenen in verschiedenen übereinander angeordneten Kanälen geführt wird. Durch den Einsatz des SLM-Verfahrens ist es technisch einfach, einen solchen Schalenaufbau von Kanälen herzustellen.

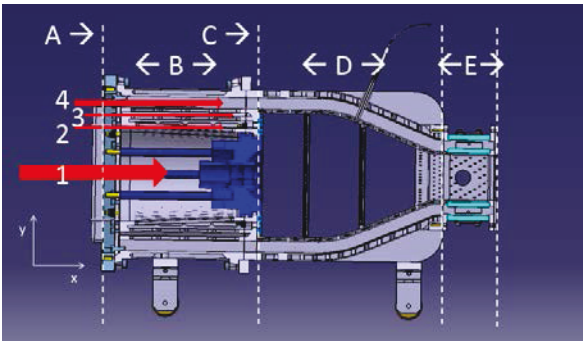


Abbildung 3: OCORE-Brennkammer mit vorgeschalteten Strömungsteilern: A) Lochblech, B) Strömungsteiler, C) Kopfplatte, D) Brennkammer, E) Übergangsbereich zur Turbine; Luftaufteilung Heißluft (rote Pfeile): 1) Brennerluft, 2) Kopfplattenkühlluft, 3) Starterfilm Flammrohrkühlung, 4) Sekundärluft

Wie in Abbildung 3 aufgezeigt ist, wird stromab des Lochblechs A) im zentralen Bereich des Strömungsteilers der Brenner von dem Luftmassenstrom 1) angeströmt. In der vertikalen (y-) Ebene darüber, bzw. darunter strömt ein heißer Luftmassenstrom 2), der zur Kühlung der Kopfplatte C) eingesetzt wird. Die nächsten Kanäle in vertikaler Richtung führen den Luftstrom 3) in den Bereich zwischen die Kopfplatte und die obere bzw. untere Flammrohrwand. Dieser Luftmassenstrom wird dazu genutzt, einen Kühlluftstarterfilm für die Innenseite des Flammrohres zu generieren. Der äußere Kanal führt den Sekundärluftmassenstrom 4), welcher zur Kühlung der oberen und unteren Flammrohrwand eingesetzt wird. Ebenso wie der Strömungsteiler ist die Brennkammer D) mit ihren geometrischen Außenmaßen von 174x206x213 mm in SLM-Bauweise gefertigt. Da die Herstellung von Flammrohr und äußerer Wand des Sekundärluftkanals in einem Arbeitsschritt erfolgt, wurde konstruktiv eine Möglichkeit zum Abfangen der unterschiedlichen Längenausdehnungen vorgesehen. Aufgrund der wesentlich höheren Temperaturen des Flammrohres im Vergleich zur äußeren Wand erfährt dieser Teil der Brennkammer im Betrieb eine größere Wärmedehnung. Zur Kompensation sind am Flammrohr sowohl an der seitlichen Befestigung als auch in axialer Richtung Federelemente integriert. In Abbildung 4 ist eine solche Kompensationsfeder der

Seitenwand zu erkennen. Das Flammrohr selber ist doppelwandig ausgeführt und verfügt über eine Prall-Effusionskühlung. In dieser Doppelwand des Flammrohres befinden sich Stützstrukturen, welche einerseits den Herstellungsprozess erleichtern, andererseits aber auch einer Verformung des Flammrohres im Betrieb entgegenwirken. Auch auf der Außenseite der Brennkammer sind zur Verbesserung der Formstabilität Wabenstrukturen aufgebracht. Die Zündung der Brennkammer erfolgt mithilfe einer Zündmimik, die sich auf der Oberseite der Brennkammer befindet. Diese besteht aus einer Zündkerze und einer Wasserstoffversorgung. Mit der Zündkerze wird eine Wasserstoffdiffusionsflamme in der Nähe der Flammrohrwand gezündet. Wenn die in die Brennkammer reichende Wasserstoffflamme stabil brennt, wird der Brenner mit Kerosin beaufschlagt. Durch die von der Wasserstoffflamme produzierten Radikale wird dann das Kerosin-Luftgemisch in der Brennkammer gezündet.

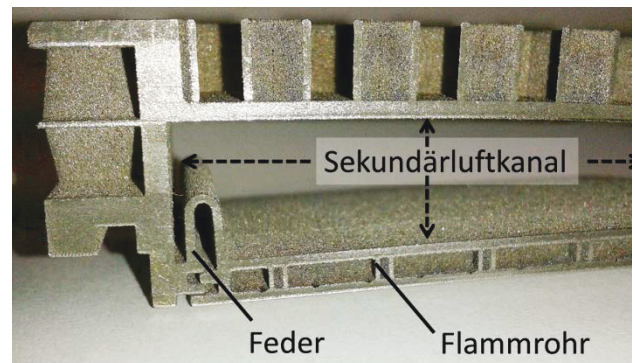


Abbildung 4: Modell des Brennkammersekundärluftkanals mit Flammrohr und Kompensationsfeder

Die seitlichen Zugänge der Brennkammer können je nach einzusetzender Messtechnik mit unterschiedlichen Komponenten bestückt werden. Für den normalen Betriebsfall wird die Brennkammer mit einem optischen Zugang über die komplette axiale Länge ausgerüstet. Dabei werden in Strömungsrichtung drei Quarzglasscheiben eingebaut, welche durch dünne Stege voneinander getrennt sind. In den Stegen, die wiederum in SLM-Bauweise gefertigt wurden, sind Kühlluftkanäle integriert. Auf der Heißgasseite der Stege befinden sich in Strömungsrichtung angebrachte Kühlluftbohrungen. Über diese Bohrungen

wird auf der Innenseite der Scheiben ein Kühlluftfilm aufgebracht. Die an der Kopfplatte angrenzende Seitenscheibe wird mit vorgewärmter Luft gekühlt. Dieser Luftmassenstrom wird dabei auch durch die Baffle und durch seitlich im Strömungsteiler befindliche Kanäle geleitet. Die beiden an jeder Seite stromab befindlichen Scheiben werden mit einem Teil der kalten Kühlluft versorgt. Dabei gelangt die kalte Kühlluft durch Versorgungsleitungen in das Druckgehäuse der Brennkammer (siehe Abbildung 2). Neben der Möglichkeit, die Glasscheiben durch Metall-Dummies zu ersetzen, können auf beiden Seiten auch spezielle Sondenzugänge angebracht werden. Zur messtechnischen Erfassung der Verbrennungsvorgänge wird eine Kamerasonde durch diese Zugänge in die Brennkammer eingebracht. Im Hinblick auf den angestrebten Anwendungsfall in der Ringbrennkammer simuliert diese Position die Durchführung der Zündkerze. In vertikaler Richtung kann die Sonde durch eine Durchführung im Deckel des Druckgehäuses aus der Messstrecke geführt werden. Auch die Seitenwand ist im SLM Verfahren gefertigt. Im Gegensatz zum Rest des Flammrohres ist die sondenaufnehmende Seitenwand im flammenabgewandten Bereich mit einer Wasserkühlung ausgestattet.

Da im Vergleich mit Luftkühlungskonzepten bei einer Wasserkühlung die Oberflächentemperaturen der Flammrohrinnenseite wesentlich geringer sind, ist die Wand auf der Heißgasseite mit einer keramischen Schutzschicht aus ZrO_2 überzogen. Durch die resultierenden erhöhten Wandtemperaturen auf der Heißgasseite wird sowohl der konvektive als auch der Strahlungswärmeübergang des Rauchgases auf die Wand reduziert.

Sowohl zur Beobachtung, als auch zur Einbringung von Laserlichtschnitten für die berührungslose Untersuchung der Brennkammerströmung, ist der Übergangsbereich zur Turbine mit Quarzglasscheiben bestückt. Es besteht dabei die Möglichkeit, den Übergangsbereich von allen vier Seiten mit Fenstern zu versehen. Auf der Ober- und Unterseite des Übergangsbereichs sind jeweils zwei Scheiben angebracht, die auf dieser Strecke den Sekundärluftkanal bilden.

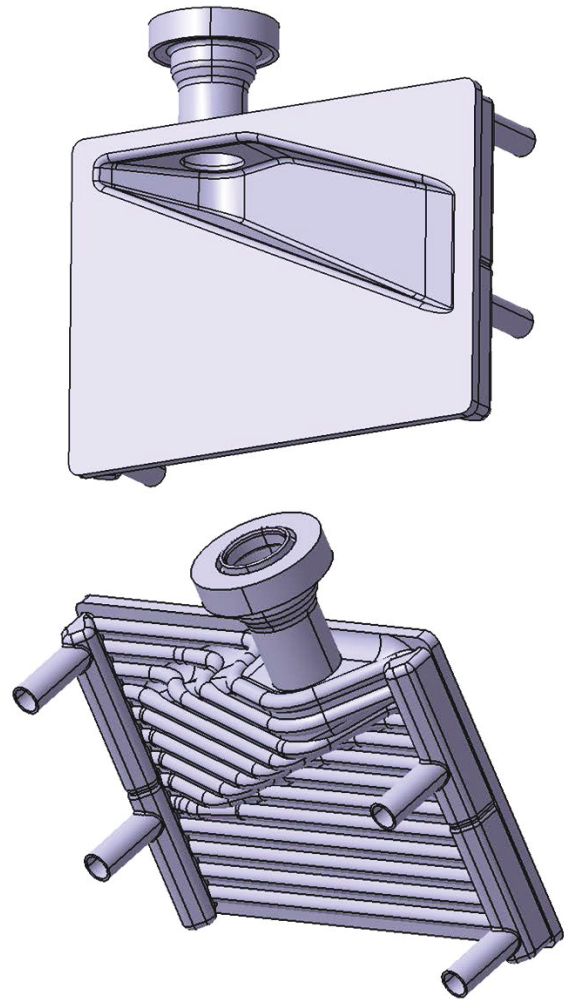


Abbildung 5: Wassergekühlte Seitenwand mit zurückgesetztem Zugang für Kamerasonde, oben Flammrohrseite, unten Rückseite mit Anschlüssen für Wasserkühlung

Ebenso wie in der stromauf liegenden Brennkammer werden dabei die inneren Scheiben flammrohrseitig mit der vorgewärmten Kühlluft aus dem Sekundärluftkanal gekühlt. Die seitlich angebrachten Scheiben werden mit kalter Kühlluft beaufschlagt. Dabei dienen diese optischen Zugänge einerseits zur Einbringung von Laserlichtschnitten, andererseits kann von Kameras die Signalstrahlung der optischen Messmethoden erfasst werden. Neben dem Einsatz von Seitenscheiben ist im Übergangsbereich auch die Möglichkeit der Verwendung von Metalldummies vorgesehen. Durch diese Dummies können traversierbare Messsonden in den zu

untersuchenden Messbereich eingebracht werden. Mittels der eingesetzten Messtechniken soll so die Strömung in Hinblick auf Temperaturen, Geschwindigkeiten, Abgaszusammensetzung und Rußkonzentrationen untersucht werden. Ein weiteres Ziel der Erprobung ist es auch, unter realistischen Einsatzbedingungen einen Abgleich zwischen optischen und konventionellen Messverfahren zu erreichen.

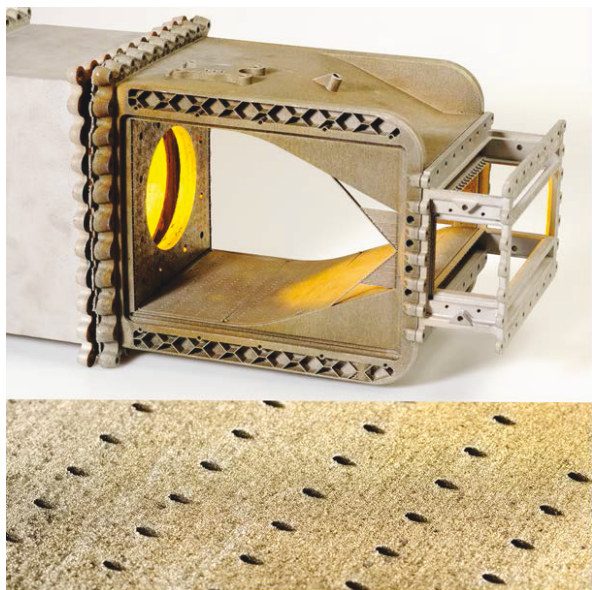


Abbildung 6: Seitenansicht OCORE-Brennkammer (oben Mitte) mit Strömungsteiler (oben links), optischen Übergangsbereich (oben rechts) und Effusionsluftbelochung des Flammrohres (unten)

Stromab des Übergangsbereichs befindet sich ein Abgassammler (Abbildung 7), der die Aufgabe hat, das Rauchgas in die stromab der Messstrecke liegenden Abgasrohre zu führen. Da die Brennkammer eine rechteckige und die Abgasrohre eine runde Bauform aufweisen, fungiert der Abgassammler gleichzeitig als Geometrieadapter. Aufgrund seiner geometrischen Komplexität ist dieses Bauteil ebenfalls in SLM-Bauweise aus Inconel 718 gefertigt. Gekühlt wird der Abgassammler durch die kalte Kühlluft. Diese gelangt durch eine Vielzahl von Effusionsbohrungen auf die Innenseite des Sammlers. Dabei ist der Austrittswinkel aller Effusionslöcher in Bezug zur rauchgasseitigen Oberflächennormale stets identisch.

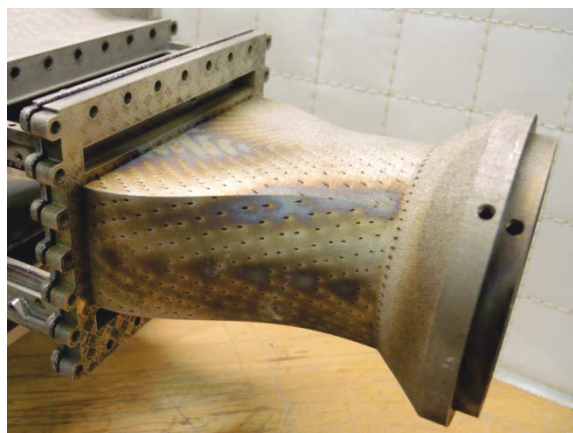


Abbildung 7: Effusionsgekühlter Abgassammler mit Geometrieübergang von rechteckig auf rund

4 PRÜFSTAND UND INFRASTRUKTUR

Das OCORE-Testrig wird im Hochdruckbrennkammerprüfstand 1 (HBK1) des Instituts für Antriebstechnik des DLR in Köln eingesetzt. Dabei ist der Prüfstand mit seiner Infrastruktur darauf ausgelegt Fluggasturbinenbrenner in Originalgröße unter realistischen Betriebsbedingungen einsetzen zu können. Von einer standortzentralen Medienversorgung kann der Prüfstand über Rohrleitungen mit vorverdichteter entfeuchteter Luft mit Drücken von bis zu 58 bar und maximal 35 kg/s versorgt werden. Mittels zwei bzw. drei elektrischen Luftherzern, die jeweils mit einer maximalen Leistung von 540 kW betrieben werden können, ist es möglich die Luft auf realistische Brennkammereintrittstemperaturen T_3 von bis zu 900 K zu erhitzen. Die Heißluftströme von zwei der drei separat zu steuernden Luftherzern werden direkt stromab der Erhitzer zusammengeführt und über eine isolierte Rohrleitung zur Messstrecke geleitet. Der dritte Luftherzer kann zur Erzeugung von regelbarer heißer Kühlluft genutzt werden, oder aber auch über isolierte Rohre in die Hauptluftversorgung eingekoppelt werden, was bei der OCORE Messstrecke der Fall ist.

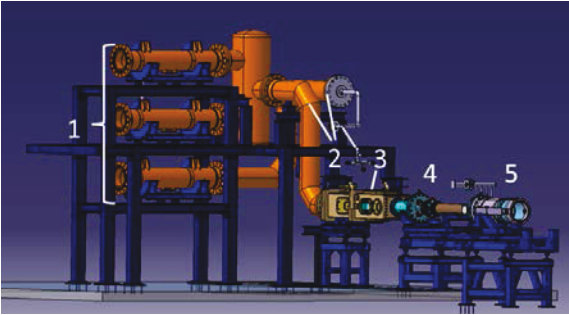


Abbildung 8: Teile der Prüfstandsinfrastruktur HBK1: 1) Elektrische Luftheritzer, 2) Isolierte Heißluftleitungen, 3) Messstrecke, 4) Abgasrohre mit Wassereinspritzung, 5) Dynamische Drossel

Neben vorgewärmter Luft kann auch kalte Luft zur Kühlung bereitgestellt werden. Zur Brennstoffversorgung stehen bis zu drei Kraftstofflinien mit einem maximalen Massenstrom von je 40 g/s und einem maximalen Druck von 150 bar zur Verfügung. Dabei können sowohl Kerosin Jet-A1 (Standardkraftstoff), als auch alternative Kraftstoffe eingesetzt werden. Kerosin wird über eine zentrale Ringleitung von der Medienversorgung zur Verfügung gestellt, alternative Kraftstoffe können über eine 4500 l fassende mobile Tankstation in das Brennstoffsystem eingespeist werden. Für einen der Kraftstoffstränge besteht darüber hinaus die Möglichkeit einer Kraftstoffvorheizung. Mittels der elektrisch betriebenen Kerosinvorwärmung mit einer Leistung von bis zu 15 kW kann ein Brennstoffmassenstrom von bis zu 40 g/s auf eine maximale Temperatur von 200 °C vorgeheizt werden.

Stromab der Messstrecke befinden sich wassergekühlte Abgasrohre, eine Wassereinspritzung sowie eine ebenfalls wassergekühlte dynamische Drossel. Die dynamische Drossel besteht aus einem konisch zulaufenden Rohr, in dem ein Kolben hydraulisch in axialer Richtung verfahren werden kann. Über die Änderung der Austrittsfläche des Rauchgases ist es möglich, bei zuvor eingestellten Luftmassenströmen den gewünschten Brennkammerdruck über einen weiten Betriebsbereich zu regeln. In dem sich direkt stromab der Messstrecke befindlichen Abgasrohr kann ein wassergekühlter Abgasrechen in die Strömung eingebracht werden. Der Abgasrechen wird mit einer

thermostatierten Wassertemperatur von 165°C betrieben. Hierdurch ist zum einen gewährleistet, dass durch den hohen Wärmeentzug des Rauchgases ein möglicher weiterer Reaktionsfortschritt der Verbrennungsprodukte verhindert wird und zum anderen auch keine Kondensation stattfinden kann. Über beheizte Leitungen kann das Rauchgas verschiedenen Analysegeräten zugeführt werden. Zur Ermittlung der Zusammensetzung der gasförmigen Verbrennungsprodukte stehen Abgasanalysegeräte für Kohlendioxid (CO₂), Kohlenmonoxid (CO), Sauerstoff (O₂), unverbrannte Kohlenwasserstoffe (UHC) sowie Stickoxide (NO_x, NO, NO₂) zur Verfügung. Für die Analyse der im Abgas enthaltenen Rußpartikel steht zum einen ein Smokemeter zur Bestimmung der Rußzahl bereit. Darüber hinaus kann mit einem Scanning Mobility Particle Analyser (SMPS) die Analyse der Rußpartikelanzahl und Größenverteilung durchgeführt werden.

5 INBETRIEBNAHME UND BETRIEBSERFAHRUNGEN

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme der Messstrecke wurden mit der OCORE-Brennkammer für optische und nichtoptische Untersuchungen Betriebspunkte mit Heißluftmassenströmen \dot{m} bis zu 1,6 kg/s, Brennkammereintrittsdrücken p_3 von bis zu 12 bar und Vorwärmtemperaturen T_3 von bis zu 720 K angefahren. In dem Messbereich am dem Brennkammeraustritt wurden dabei, abhängig vom eingestellten Luft-Brennstoffverhältnis und der Brennstoffverteilung von Pilot und Hauptbrenner lokale Rauchgastemperaturen T_4 von über 2000 K gemessen. Bei mehr als 50 Betriebsstunden unter hohen Lastbedingungen mit thermischen Leistungen von bis zu 1,2 MW konnten dabei keine strukturellen Veränderungen der Brennkammer festgestellt werden. Damit hat sich die Kompensatorfederung des Flammrohres im Betrieb bewährt. Der lange vollkommen störungsfreie Betrieb der OCORE-Brennkammer wurde dabei sowohl mit Kerosin Jet A1, als auch mit alternativen Kraftstoffen durchgeführt. Alle möglichen Konfigurationen, Flammrohrseitenwand aus Quarzglas, Metaldummies oder

wassergekühlter zurückgesetzter Kamerazugang kamen dabei erfolgreich zum Einsatz. Der Betrieb der Brennkammer in einem gestuften Messpunkt ist in Abbildung 9 zu erkennen.

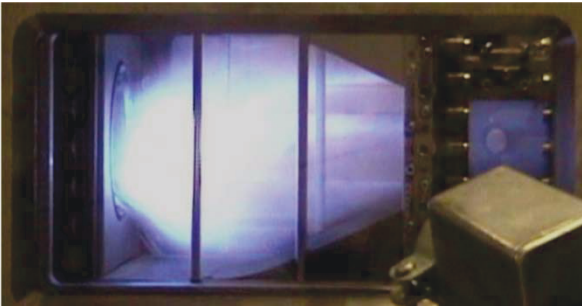


Abbildung 9: OCORE-Brennkammer in Betrieb, Blick durch seitlichen optischen Zugang

6 AUSBLICK

Neben dem Einsatz der SLM-Technologie zur Herstellung von Brennern, Flammroherelementen und Brennkammern, wird vom DLR mit Hilfe dieses Fertigungsverfahrens bei der OCORE-Brennkammer zurzeit die Entwicklung von Schnellverbindungselementen für den Hochtemperaturbereich durchgeführt.

7 DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde finanziell unterstützt von der Europäischen Union durch das Projekt: "LEMCOTEC – Low Emissions Core-Engine Technologies", ein Verbundprojekt, das durch die Europäische Kommission im siebten Rahmenforschungsprogramm (2007-2013) mitfinanziert wird unter dem Grant Agreement n° 283216. Auch wurde diese Arbeit nur durch die Unterstützung und den technischen Support der Mitarbeiter des Systemhauses Technik und des Instituts für Antriebstechnik des DLR Köln möglich. Allen bei der Entwicklung, Herstellung, Betrieb und Wartung beteiligten Personen möchten die Autoren hierfür ihren Dank aussprechen.

8 LITERATUR

[1] R. von der Bank et al. (2014): LEMCOTEC – Improving The Core-Engine Thermal Efficiency, Paper GT2014-25040, Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, June 16 – 20, 2014, Düsseldorf, Germany

[2] Söhngen, Anna-Samira (2013): Potenziale durch den Einsatz von Rapid Prototyping in der Brennkammerentwicklung. In: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2013, Stuttgart. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V., Bonn, 2014. 62. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2013 / DGLR-Nachwuchstagung, 10.-12. September 2013, Stuttgart

[3] Behrendt, Thomas und Richter, Tim und Söhngen, Anna-Samira (2014): Characterization of Advanced Combustor Cooling Concepts for Metallic and Oxide Ceramic Matrix Composites in a Reacting Flow. Paper GT2014-26909, Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, 16. - 20. Juni 2014, Düsseldorf, Deutschland.