

CLEAN - ANPASSUNG DES PRÜFSTANDS UND TEST FÜR EIN DEMONSTRATOR-TRIEBWERK AM ILA STUTT GART

C. Gerlach, D. Filipović, B. Glaeser, R. Homburg, F. Lippl, S. Staudacher
 MTU Aero Engines GmbH / Institut für Luftfahrtantriebe an der Universität Stuttgart
 Dachauer Strasse 665, 80995 München / Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart
 Deutschland

ÜBERSICHT

Im fünften EU-Rahmenprogramm wird die Technologieplattform EEFAE (Efficient and Environmentally Friendly Aero-Engine) von der Europäischen Kommission gefördert. Ein Teil dieser Technologieplattform besteht aus dem CLEAN-Programm (Component VaLidator for Environmentally-friendly Aero-ENgine), das auf langfristige Applikationen in Flugtriebwerken abzielt [1],[2],[3]. Die fünf Hauptpartner im CLEAN-Programm sind Snecma Moteurs, Avio, Volvo Aero Corporation, Eldim und MTU Aero Engines.

Im Manuskript werden die Realisierung der verschiedenen Prüfstandssysteme einschließlich der Kontrollsysteme, die zur Anpassung des Prüfstandes an den CLEAN-Technologiedemonstrator notwendig waren, sowie die Testkampagne selbst behandelt.

Der Test des Technologiedemonstrators wurde am Höhenprüfstand (ATF) der Universität Stuttgart in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Luftfahrtantriebe (ILA) durchgeführt.

Die Hauptkomponenten des Demonstrators, sind ein Kerntriebwerk, eine schnelllaufende Niederdruckturbine (NDT) und ein Wärmetauscher im Abgasstrahl des Triebwerkes. Details des Konzeptes des CLEAN-Demonstrators wurden in anderen Veröffentlichungen bereits ausführlich behandelt [1]. Eine Übersicht des CLEAN Demonstrators ist in Bild 1 dargestellt.

Bei einem vollständigen Triebwerk befinden sich sämtliche Anbaukomponenten, die zum Betreiben des Triebwerkes notwendig sind, direkt am Triebwerk. Bei dem Demonstrator, im folgenden Vehikel genannt, wurde auf den Niederdruckverdichter sowie die Anbauteile verzichtet. Daher musste die Leistung der Niederdruckturbine über Wasserbremsen umgesetzt werden. Sekundärluft- und Ölversorgung, Kraftstoffversorgung etc. erfolgte über im Prüfstandsraum aufgebaute vom Vehikel getrennte Subsysteme. Daraus resultiert ein nicht unerheblicher Aufwand für die Realisierung der Subsysteme, der Regelung von Prüfstands- und Vehikelkomponenten und der Testunterstützung.

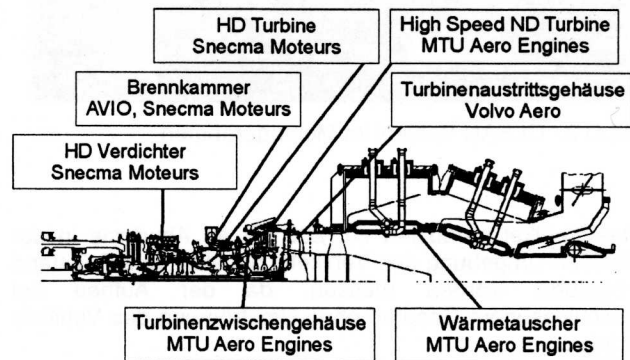


BILD 1. CLEAN Vehikel Schnittzeichnung

1. PRÜFSTANDSKONZEPT UND -ANPASSUNG

Für einen Prüfstandsaufbau, der alle notwendigen Forderungen des komplexen Tests des CLEAN Vehikels erfüllt, war es notwendig, mehrere Iterationen in der Konzeptphase durchzuführen. Die Konzeptphase wurde daher schon Mitte 2002 gestartet.

Wichtige Randbedingungen wurden durch das Vehikel selbst festgeschrieben. Der Gesamtmassenstrom durch das Vehikel beträgt bis zu $\dot{m}_{25} = 45 \text{ kg/s}$ ($p_0 = 100 \text{ to } 330 \text{ kPa}$, $T_0 = 273 \text{ to } 400\text{K}$, $p_9 < 15 \text{ kPa}$). Die notwendige Sekundärluft für das Vehikel, den Wärmetauscher und die Kühlluft für die Instrumentierung ergibt einen zusätzlichen Luftbedarf von bis zu 8 kg/s bei max. $1600 \text{ kPa} / 820 \text{ K}$. Bis zu 5 kg/s bei hohen Temperaturen müssen abgeblasen werden können.

Verschiedene Lager und Lagerdämpfungen im Vehikel müssen extern mit Öl sowohl zur Schmierung als auch zur Kühlung versorgt werden.

Die Niederdruckturbine produziert eine Maximalleistung von 23 MW bei einer Drehzahl von ca. 8300 U/min , die aufgrund des fehlenden Niederdruckverdichters über die Prüfstandseinrichtungen abgeführt werden müssen.

Da die Brennkammer zweistufig ausgeführt ist, müssen zwei unabhängige Kraftstoffversorgungen vorgesehen werden.

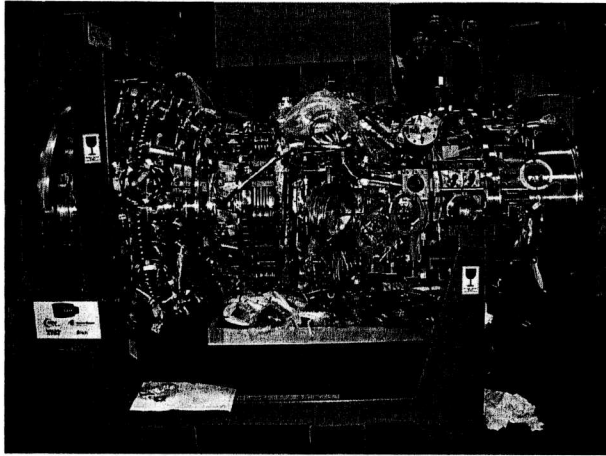


BILD 2. CLEAN Vehikel im Montagerahmen

Das Vehikel produziert ca. 200 kW an Abwärme in der direkten Umgebung des Vehikels, die aktiv vom Prüfstand abgeführt werden müssen, da der Aufbau bei geschlossenem Gaspfad ohne Umströmung des Vehikels erfolgt.

Aufgrund der empfindlichen Einbauten in der Nähe des Vehikels darf eine Temperatur von 50°C in einem Abstand von 1 m vom Vehikel nicht überschritten werden.

Am Höhenprüfstand in Stuttgart existieren zwei Testbereiche, in denen Rigs oder Triebwerke getestet werden können. Auf der Teststrecke 1 werden normalerweise Triebwerke getestet, die Teststrecke ist als Testzelle mit einer Länge von 11 m und einem Durchmesser von 3,6 m ausgeführt. Die Testzelle ist an der Seite über eine hydraulisch betätigte Türöffnung zugänglich, die Teststrecke geht direkt in einen Abgaskühler über. Die Teststrecke 2 befindet sich parallel neben der Teststrecke 1; auf der Teststrecke 2 werden im Normalfall Kaltrigtests durchgeführt (s. Bild 3 und 4).

Beide Teststrecken können über bis zu fünf Verdichter in verschiedenen Konfigurationen versorgt werden. Es sind sowohl Druck-, als auch Saug- und Mischbetrieb möglich.

In der Konzeptphase wurden mehrere Möglichkeiten der Nutzung des Prüfstandes untersucht. Hauptsächlich entscheidend für die Wahl der Teststrecke 1 für die CLEAN-Tests war der lineare Aufbau der Teststrecke, bei dem die Luftführung ohne größere Umlenkungen vom Eintritt bis zum Austritt in den Abgaswärmetauscher erfolgen kann. Bei einem Aufbau in der Teststrecke 2 wären Umlenkungen um 180° notwendig gewesen, die zu erheblichen Druckverlusten sowie erhöhten Kosten geführt hätten. Der größte Nachteil des Aufbaus in der Teststrecke 1, die eingeschränkte Zugänglichkeit zum Testobjekt, musste dafür in Kauf genommen werden.

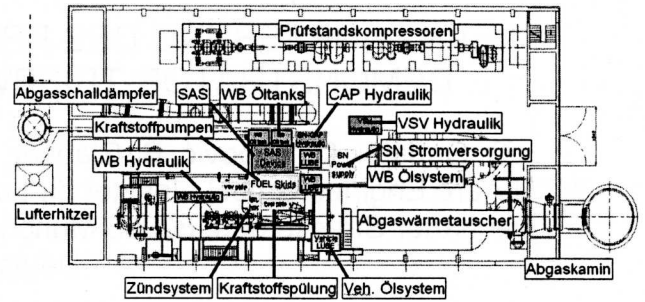


BILD 3. Hallenlayout und Platzierung der Prüfstandssysteme

Bild 4 zeigt die gewählte Konfiguration mit einem Wasserbremsensystem vor dem Vehikel und dem Vehikel samt Abgasgehäuse im Bereich der Öffnung der Testzelle. Für die CLEAN Tests wird die Seitentür nicht geschlossen, um diverse Versorgungs- und Instrumentierungsleitungen anschliessen zu können. Daher muss der Gaspfad gegen die Umgebung vollständig abgeschlossen sein. Für die Zuströmung zum HDV des Vehikels wird die Luft über vier gleichmäßig am Umfang verteilte Rohre an den Wasserbremsen vorbei zu einem Eintrittsgehäuse geführt. Das Eintrittsgehäuse wurde mit Einsätzen zur Gleichrichtung und -verteilung der Strömung versehen. Das Design des Eintrittsgehäuses wurde über numerische Berechnungen sowohl in Hinblick auf die Aerodynamik als auch die Festigkeit validiert.

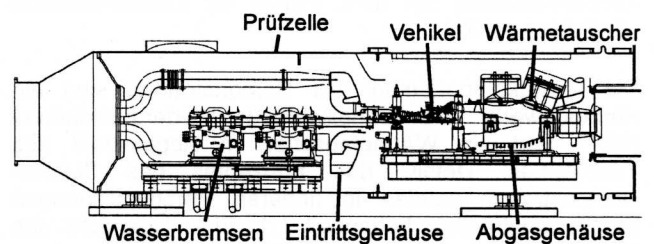


BILD 4. Konfiguration der Testzelle

Für die Sekundärluftversorgung des Vehikels, die nicht aus dem Vehikel selbst erfolgen kann, müssen 14 externe Versorgungskreise aufgebaut werden. Einige der Kreise müssen in Druck und Temperatur oder Massendurchfluss geregelt werden z.B. in Abhängigkeit vom Gesamtmassendurchsatz \dot{m}_{25} , um ein möglichst triebwerksnahes Verhalten zu gewährleisten.

Das Sekundärluftsystem (SAS) wurde wie folgt realisiert. Zwei Verdichter liefern die Luft für das gesamte System auf zwei verschiedenen Druckniveaus. Einer der Verdichter, der am ILA bereits für verschiedene Einsatzzwecke existiert, liefert 3 kg/s bei einem maximalen Druck von 800 kPa, ein zweiter Verdichter, der zusätzlich für das CLEAN-Programm bereitgestellt wurde, liefert einen Masendurchsatz von 5 kg/s bei einem höheren Druckniveau von 2000 kPa.

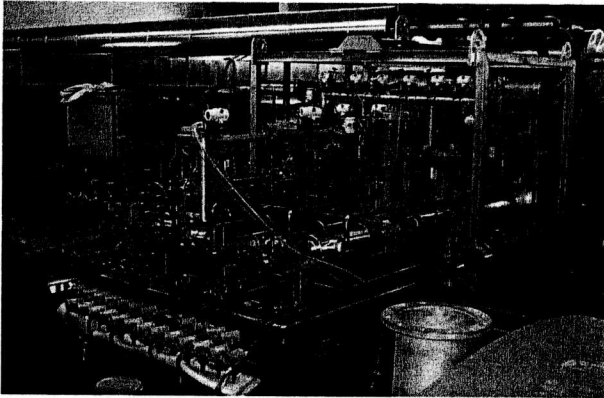


BILD 5. Installation der Ventilplattform des Sekundärluftsystems vor der Testzelle

Um Temperaturen im Bereich von 310 K bis zu 820 K in verschiedenen Kreisen zu ermöglichen, wurde der Hochdruckkreis in zwei separate Stränge aufgeteilt, von denen einer über einen heizölbetriebenen Lufterhitzer auf über 820 K erwärmt wird.

Auf einer Ventilplattform vor dem Vehikel werden alle Versorgungsleitungen zusammengeführt und über Mischventile auf die einzelnen Abnehmer geleitet (s. Bild 5). Um eine gleichmäßige und unabhängige Versorgung der einzelnen Kreise zu gewährleisten, wird die überschüssige Luft geregelt über einen Abgaskamin abgeblasen.

Für die fünf Lager und die dazugehörigen Dämpfungen des Vehikels musste ein Ölsystem bereitgestellt werden. Das System wurde im Keller des Gebäudes platziert, um den Ablauf des Öls unter Schwerkraft zu gewährleisten. Zwei Hauptpumpen erzeugen den Ölmassenstrom für alle Kreise, die Drehzahl der Pumpen wird in Abhängigkeit der Drehzahl des Kerntriebwerkes geregelt, um triebwerksnahe Bedingungen zu simulieren.

Um im Falle eines Ausfalls des Ölsystems eine Notölversorgung des Vehikels für weitere 90 s sicherstellen zu können, wurde ein unabhängiger dritter Pumpenkreis aufgebaut, der aus dem Rücklauf tank direkt die beiden Hauptleitungen versorgen kann. Damit kann ausreichend Öl für eine sichere Abschaltung des Vehikels bereitgestellt werden.

Um die Leistung der NDT aufnehmen zu können, wurde eine Tandemkonfiguration von zwei bei MTU bestehenden Wasserbremsen gewählt. Jede der Wasserbremsen (Froude Consine HS690 und HS790) wurde mit einem eigenen Öl- und Hydrauliksystem ausgestattet. Für den Fall eines Schadens an der Versorgung wurde ein zusätzliches passives Notölssystem aufgesetzt, mit dem ein Weiterbetrieb der Wasserbremsen bis zur vollständigen Herunterfahrt des Vehikels möglich ist.

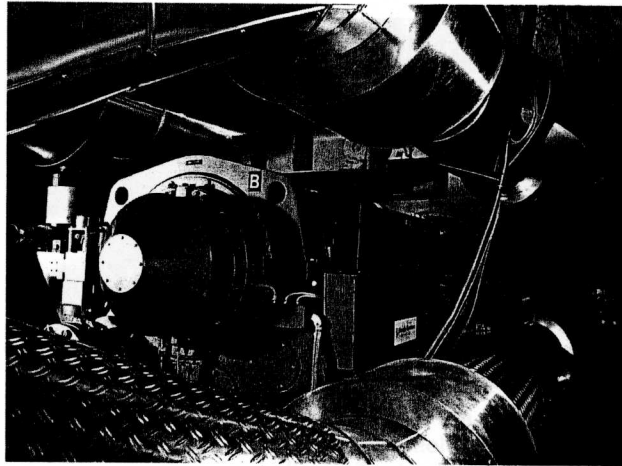


BILD 6. Wasserbremsenanordnung in der Testzelle

Beide Wasserbremsen werden über ein Kontrollsystem geregelt, um eine gleichmäßige Lastverteilung zu erzielen.

Die Kühlwasserversorgung der Wasserbremsen wurde über die am ILA existierende Kühlwasseranlage sichergestellt, beide Wasserbremsen benötigen zusammen einen Volumenstrom von ca. 16 m³/min bei maximaler Leistung.

Die externe Kühlung des Vehikels wurde mit einer Doppellüftereinheit realisiert, die einen Volumenstrom von bis zu 60000 m³/h bereitstellen kann. Die Luft wurde über ein Rohrsystem aus der Umgebung außerhalb der Testhalle angesaugt und über eine Öffnung der Testzelle oberhalb der vorderen Wasserbremse eingeblasen. Der Kühlluftstrom wird über Leitbleche am Eintrittsgehäuse in den Bereich um das Vehikel geführt.

Zwei Kraftstoffversorgungseinheiten wurden von Snecma Moteurs bereitgestellt und vor der Testzelle aufgestellt. Jeweils eine Einheit versorgt eine Stufe der Brennkammer. Direkt vor dem Vehikel wurde eine Ventilplattform angebracht, mit der die Kraftstoffleitungen und insbesondere die Düsen mit Stickstoff gespült werden konnten, um eine Verkokung der Düsen durch Restkraftstoff im System nach einer Abschaltung zu verhindern.

Einige kleinere Systeme, wie zum Beispiel die Zündbox oder Hydraulikaggregate für die Versorgung der Leitschauflerverstellung (VSV) oder des Pumpverhinderungssystems (CAP) mussten bei der Konfiguration des Prüfstandes berücksichtigt werden.

Die Installation der Prüfstandssysteme wurde Ende Mai 2004 gestartet. Das Vehikel wurde im August 2004 eingebaut. Parallel dazu wurden alle Subsysteme einschließlich der Messanlagen getestet. Die Installation konnte rechtzeitig zum Test Mitte September 2004 erfolgreich abgeschlossen werden (s. Bild 7).

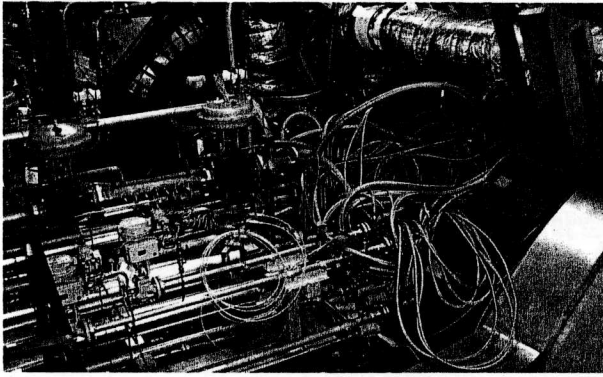


BILD 7. Blick auf die Testzellenöffnung nach abgeschlossener Installation des CLEAN Vehikels in der Testzelle

2. ARCHITEKTUR DES KONTROLLSYSTEMS

Das gesamte Kontrollsystem (CS) wurde als integrierte dezentralisierte Regelstruktur realisiert, wie sie in Bild 8 dargestellt ist.

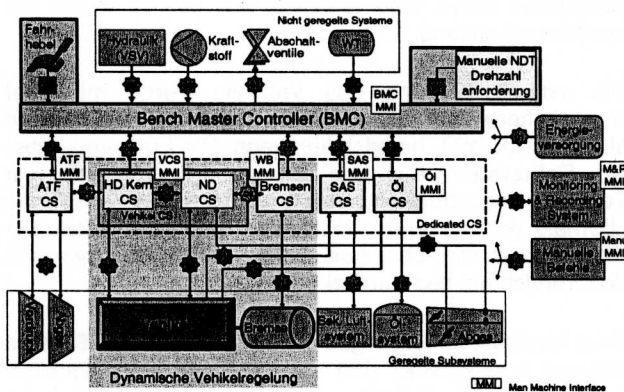


BILD 8. Allgemeine Architektur des Kontrollsystems

Im CLEAN Kontrollsystem existieren zwei unterschiedliche Hierarchieebenen: Eigenständige Regelungssysteme und der Bench Master Controller (BMC).

Eigenständige Regelungssysteme sind für Regelung und Sicherheit des ihnen zugeordneten Subsystems zuständig, und stellen auf diese Weise eine lokale und dezentralisierte „Intelligenz“ zur Verfügung. Diese Regler haben ihre eigenen Sensoren und Aktuatoren, um ihre Aufgaben erfüllen zu können. Die CS müssen ihren eigenen Zustand und ihre Funktionsfähigkeit überwachen und diese Daten dem BMC zur Verfügung stellen. Sie sind außerdem fähig, auf BMC Befehle entsprechend zu reagieren.

Es gibt keine direkte Kommunikation zwischen Subsystemen, jeglicher Datenaustausch erfolgt über den BMC. Dem logischen Aufbau folgend gehört der Wasserbremsenregler zum Vehikelkontrollsystem (VCS), da er die NDT-Drehzahl regelt und ist direkt mit dem VCS

verbunden. Jedes Kontrollsystem hat seine eigene Bedienoberfläche (MMI), um die Überwachung des Systems zu ermöglichen und Einstellparameter für das jeweilige System anpassen zu können.

Der BMC bietet die Möglichkeit zur Gesamttestüberwachung über die Zustandssignale der einzelnen CS, über die Ausgabe von Aktionen, um die Sicherheit von Mensch und Maschine zu gewährleisten und die Überwachung der Versorgungsströme für die einzelnen Untersysteme.

Zusätzlich übernimmt er auch die Verwaltung des Fahrhebels, die Steuerung der Testphasen und liefert Redundanz für kritische VCS Funktionen. Alle CLEAN CS sind als single-lane Regler ausgeführt.

2.1. Eigenständige Regler der Subsysteme

Das Regelungssystem für den Höhenprüfstand (ATF CS) gehört zum ILA. Es regelt den Vordruck und die Temperatur am Einlass des Kerntriebwerks und den Absaugdruck am Vehikelaustritt.

Das VCS beinhaltet den Kerntriebwerksregler von Snecma Moteurs und den Niederdruckturbinenteil für die NDT von MTU Aero Engines. Das System basiert auf einer dSpace Plattform mit einem Regelungszyklus von 20 ms.

Der Kerntriebwerksregler ist für den Kraftstofffluss für die zweistufige low-NOx Brennkammer und die Positionierung der HDV-Leitschaufeln zuständig. Zusätzlich reagiert der Regler auf die Signale der zweiten schnellen Prozessoreinheit für die aktive Pumpverhinderung.

Der NDT-Teil liefert die Drehzahlanforderung für die NDT, entweder im automatischen Modus, in dem der Regler der Kerntriebwerksdrehzahl folgt, oder im manuellen Modus, in dem unabhängig vom Kerntriebwerk Anforderungen für mechanische oder aerodynamische Drehzahl der NDT vorgegeben werden können. Zusätzlich beinhaltet der NDT-Teil Algorithmen für die Erkennung von Überdrehzahlen und Wellenbruch.

Der Wasserbremsenregler gehört zu den Vehikelreglern, da er die Drehzahl der NDT über die die Wasserbremsen regelt. Der Regler ist Bestandteil der Wasserbremsenanlage und wird vom Lieferanten der Wasserbremsen Froude Consine geliefert.

Die Wasserbremsen in der Tandemkonfiguration können bis zu 25 MW an Leistung (max. Drehmoment 43 kNm, max. Drehzahl 10000 U/min). Die absorbierte Leistung der Wasserbremsen hängt im wesentlichen von der Masse des in der Wasserbremse zirkulierenden Wassers ab. Jeweils zwei Ventile regeln den Wasserfluss durch eine Wasserbremse: Das Einlassventil bestimmt den optimalen Betriebspunkt der Bremse, wohingegen das Auslassventil in einem schnellen geschlossenen Regelkreis Drehzahl und Leistung regelt.

Das Sekundärluft CS regelt die verschiedenen Kühl- und Sperrluftkreise des Vehikel. Es gibt zwei druckgeregelte und einen massenstromgeregelten Kreis, die über die 800 kPa Versorgung betrieben werden und drei druck-

und temperaturgeregelte sowie einen massenstrom- und temperaturgeregelten Kreis, die über die 2000 kPa Versorgung betrieben werden. Einen Überblick über die verschiedenen Kreise gibt Bild 9. Die Regelkreise greifen auf Vehikelsignale zu, um triebwerksnahe Bedingungen simulieren zu können.

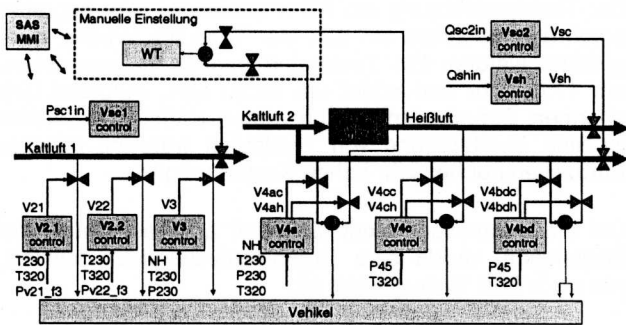


BILD 9. Kontrollsystemarchitektur des Sekundärluftsystems

Zusätzlich gibt es Ventile, die über das SAS MMi manuell beziehungsweise automatisch für Recoverymaßnahmen geschlossen oder geöffnet werden können.

Das SAS CS wird über eine Siemens Simatic S7 Steuerung und einen PC für die Einstellung und Überwachung von SAS Parametern realisiert.

Das Ölregelungssystem regelt den Volumenstrom der fünf Lager, den Öldruck für die Dämpfungen und den mit Wasser gegengekühlten Ölkühler (WCO). Für ein triebwerksnahes Verhalten wird der Ölfluss über die Kerntriebwerksdrehzahl geregelt. Das Ölregelungssystem übernimmt auch Sicherheitsfunktionen im Falle eines Fehlers im Ölsystem. Das System ist ähnlich wie das SAS CS mit einer Siemens Simatic S7 aufgebaut.

2.2. Bench Master Controller

Der BMC bietet Unterstützung für die Durchführung der CLEAN Tests. Die Funktionalität des BMC umfasst:

- Abfrage des Fahrhebels
- Steuerung der Testphasen
- Überwachung der Untersysteme über serielle/optische Verbindungen und Watch Dog Timer (WDT)
- Auslösen von Recoverymaßnahmen
- Redundanz für NDT Überdrehzahl- und Wellenbrucherkennung
- Detektion von NDT Wellentorsionsschwingungen
- Aufzeichnung von Daten (Trenddaten, manuell/automatisch ausgelöste Ereignisse)
- Bereitstellung von Zeitstempeln

Bild 10 gibt eine Übersicht über die Steuerung der Testphasen. Für die Übergänge, die mit „A“ (automatisch) markiert sind, entscheidet der BMC, ob der Übergang in eine kritischere Phase erlaubt ist, oder nicht. Dafür müssen bestimmte Bedingungen erfüllt sein und der Bediener muss den Übergang bestätigen. Andere Übergänge können jederzeit erfolgen in Abhängigkeit von

Sicherheitsmaßnahmen und Fahrhebelstellungen. Nachdem einige der Sicherheitsmaßnahmen innerhalb der Untersysteme phasenabhängig sind, muss der BMC diese Information an die Untersysteme verteilen.

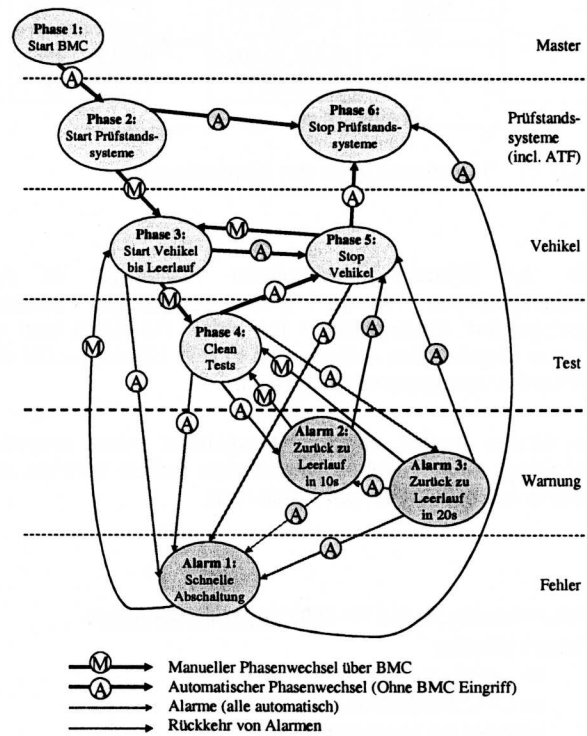


BILD 10. Definition der Testphasen

2.3. Integration der Regler

Da die Kontrollsysteme volle Autorität über die jeweiligen Untersysteme haben, ist die Kommunikation der Regler und die Integration wesentlich bestimmt durch die Sicherheitsanforderungen. Die Sicherheitsanforderungen des Vehikels resultieren aus einer Failure Modes and Effects Analyse (FMEA) der Vehikelbestandteile (Kerntriebwerk, NDT, Wärmetauscher und Abgasgehäuse).

Anforderungen an nicht-geregelte Einheiten wurden vom BMC übernommen, z.B. die Überwachung der Versorgung von Kraftstoff- und Hydraulikeinheiten.

Die Kommunikation zwischen den Reglern ist in Bild 11 dargestellt. Eine schnelle optische Verbindung (1 Gb/s) besteht zwischen BMC und dem VCS. Darüber werden Fahrhebelstellung, Testphase, Zeitstempel und Sicherheitssignale übertragen. Der BMC hat eine direkte Verbindung zu den Kraftstoffschnellschlussventilen, über die er im Falle eines Notstops den Kraftstoff abstellen kann.

Die Kommunikation zu Sekundärluft-, Ölsystem- und Wasserbremsenregler ist über hartverdrahtete Signale beziehungsweise eine serielle Schnittstelle realisiert.

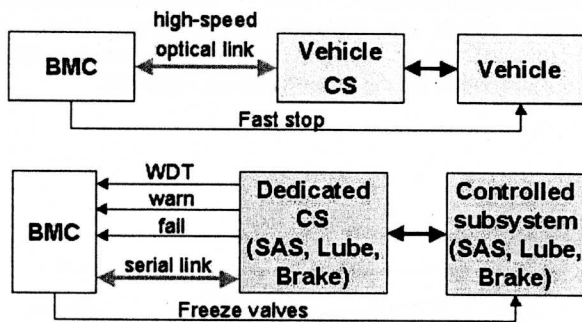


BILD 11. Kommunikation der Kontrollsysteme

Für die Erfassung komplexer Fehlerfälle in den Reglersystemen wurde eine aufwändige Analyse durchgeführt. Exemplarisch für einen Fehlerfall und die daraus abgeleiteten Aktionen ist in Bild 12 ein Ausfall des Vehikelkontrollsystems dargestellt.

Bei einem Ausfall eines Untersystems muss eindeutig festgelegt sein, welcher Regler den Fehler erkennt und welche Auswirkungen der Fehler hat.

Requirement: [SUBSYS-300] General VCS failure

Failure effects:

- Wrong HP core control (fuel flow, VSV, ...),
- No LP VCS supervision,
- Wrong speed demand for the Brake CS.

Failure detection by: BMC: via optical link WDT failure.

Signals for detection: BMC: WDT_VCS_FAIL

Failure confirmation time: VCS_FAIL_CONF_TIME

Automatic action processing:

- BMC introduces FAST STOP,
- BMC sends BRAKE_FREEZE to water brakes,
- BMC demands safety action from SAS CS,
- BMC sends VCS_FAIL alarm to the operator,
- Water brakes freeze the valves,
- SAS CS closes V9, opens both M2, M5, and sets V10 to 1kg/s.

Manual action schedule:

- Operator command on VCS_FAIL: PL to zero,
- Operator command to ATF to reduce to windmilling conditions,
- ATF reduces supply and suction to windmilling conditions.

BILD 12. Beispiel für eine Anforderung an das Vehikel Kontrollsystem

Zeitkritische Fehlerfälle müssen über einen Regler abgedeckt sein und das Reglerdesign sollte so flexibel sein, dass Änderungen koordinierter Abläufe einfach durchgeführt werden können. Für die Absicherung von Reglerfehlern ist es wichtig, dass der BMC das Untersystemverhalten einfrieren kann, um eine fehlerhafte Positionierung von Aktuatoren zu vermeiden. Automatische Rückmeldungen an den Bediener müssen erfolgen, um dem Bediener die Auslösung manueller Aktionen zu ermöglichen.

3. DURCHFÜHRUNG DES CLEAN-TESTS

Die CLEAN Testkampagne wurde Ende September 2004 gestartet. Vor dem Test war erheblicher organisatorischer Aufwand erforderlich, um letztendlich gewährleisten zu können, dass alle am Test beteiligten Partner das gleiche Verständnis von der Durchführung der Tests haben.

Die Testdurchführung am Höhenprüfstand wird begrenzt durch die Testzeiten am ILA, vier Tage pro Woche kann getestet werden. Ein Testabend beginnt normalerweise um 17:00 Uhr und endet um 24:00 Uhr. Aufgrund des enormen Strombedarf der gesamten Prüfstandssysteme ist eine Durchführung von Testläufen während üblicher Bürozeiten nur bei sehr hohen Kosten möglich.

Um die Verantwortlichkeit für jeden am Test Beteiligten festzulegen, wurde eine Organisationsstruktur definiert, wie sie in Bild 13 dargestellt ist.

Zentraler Punkt des Testteams ist der Testingenieur, der vor Ort für den Ablauf der Tests voll verantwortlich ist. Er definiert am Nachmittag des Testtages in Zusammenarbeit mit den Ingenieuren der beteiligten Partner das detaillierte Testprogramm für den Testabend. CTTC Leitung oder höhere Instanzen können das Testprogramm vor dem Testbeginn beeinflussen, nach Testbeginn ist eine Änderung des Testprogrammes nicht mehr möglich, um Verwirrung während des Testes zu vermeiden, die zu zusätzlicher Laufzeit und damit erhöhten Kosten führen können.

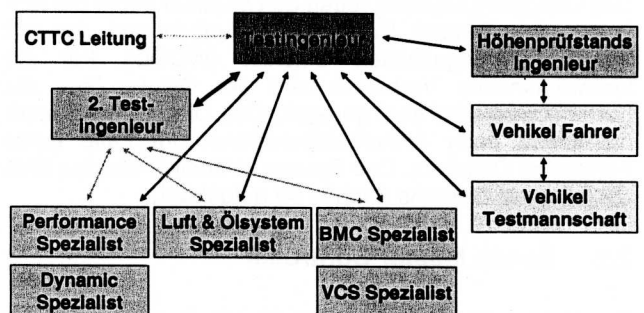


BILD 13. Übersicht der Testorganisation

Der Testingenieur kommuniziert direkt mit dem Höhenprüfstandsingenieur, dem 2. Testingenieur, der im Wesentlichen den Testingenieur im Falle von Störungen unterstützt, dem Vehikelfahrer und der Vehikeltestmannschaft.

Die Spezialisten für die verschiedenen Untersysteme sind mit dem Testingenieur über Sprechgarnitur verbunden und können darüber Warnungen oder Fehlermeldungen weitergeben.

Das CLEAN Vehikel und der Prüfstand wurden mit insgesamt mehr als 1600 Messstellen versehen, um zum einen den sicheren Betrieb des Vehikels zu gewährleisten und zum anderen einen Datenpool zu generieren, der für die Validierung des Designs aller Vehikelkomponenten notwendig ist.

Instrumentierung Typ	Vehikel	Prüfstand
Gasdruck	533	11
Differenzdruck	21	0
Fluiddruck	14	10
Dynamischer Druck	54	0
Gastemperatur	632	7
Fluidtemperatur	19	20
Dehnungsmessstreifen	175	3
Spaltmessung	40	0
Drehzahlsensoren	10	2
Schwingungsmessung	31	0
Massenströme	0	17
Sonstige	0	5
Gesamt	1529	75

BILD 14. Überblick über die Gesamtinstrumentierung

Verschiedene Messsysteme wurden am Prüfstand installiert, um alle Messwerte aufzeichnen zu können.

Ein stationäres Messsystem, das als Standardsystem am Höhenprüfstand verfügbar ist, erlaubt die Aufzeichnung von bis zu 768 Drücken und 540 Temperaturen mit einer Abtastrate von 4 Hz. Die Konfiguration und Aufzeichnung der Messdaten erfolgte mit dem Softwarepaket PULS, das bei MTU Aero Engines entwickelt wurde.

Für transiente Messungen wurde ein transportables Messwerterfassungssystem (TMEA) eingesetzt, das bis zu 550 Kanäle mit einer Abtastrate von 20 Hz aufzeichnen kann.

Über 240 dynamische Kanäle mussten aufgezeichnet werden. Dafür wurden sowohl von Snecma Moteurs und MTU Aero Engines Systeme benötigt, um den gesamten Umfang abdecken zu können.

Alle Messsysteme wurden kurz vor dem Test im August und September 2004 installiert, konfiguriert und getestet.

Da für den Testbetrieb hohe Kosten anfallen, wurde ein effizientes und optimiertes Testprogramm entwickelt (s. Bild 15). Die ersten fünf Testpunkte wurden eingeplant, um die Funktionen des Prüfstands mit dem Vehikel zu testen und die Grundperformance der Vehikelkomponenten zu evaluieren.

Der nächste Testpunkt dient der Validierung der geringen Schadstoffemissionen (NO_x) der zweistufigen Brennkammer. Ein spezieller Gasmesswagen wurde für diesen Zweck am Höhenprüfstand eingesetzt, um die ICAO-Parameter der Brennkammer zu messen.

Die Niederdruckturbinenperformance wird über die zwei nächsten Testpunkte ermittelt.

Ein weiteres Ziel, die Validierung des Turbinenaustrittsgehäuses und dessen Temperaturbeständigkeit bis 1000 K, wird über den nächsten Testpunkt abgedeckt. Da dieser Test sehr ähnlich zu den für die Verifikation des

Wärmetauschers notwendigen Testpunkten ist, werden beide Tests zusammen durchgeführt.

Der Wärmetauscher wird in zwei verschiedenen Positionen (A und B) getestet, die repräsentativ für eine Verwendung in einem Wärmetauschertriebwerk sind.

Vor der Durchführung der Pumpverhinderungsversuche werden grundlegende transiente Tests durchgeführt, um das transiente Verhalten des Vehikels besser zu verstehen. Bei den Pumpverhinderungsversuchen wird der Einfluss einer schnellen Leitgitterverstellung und von Abblaseventilen im Hochdruckverdichterbereich untersucht.

Testziel	Testbeschreibung
1	Windmilling - Dry cranks
2	Windmilling - Wet cranks
3	Start to Idle
4a	Ambient Break-In
4b	Feeding Break-In
5	LPT Break-In / Core Characterization
6	NOX ICAO
7	LPT Mapping
9	LPT Reynolds
8, 10	HEX 1 (Pos B) / TEC 1000 K Test
10	HEX 2 (Pos A)
11	Basic Transient Tests
12	CAP validation : VSV & Bleed effects
13	CAP validation : Surge avoidance

BILD 15. CLEAN Testprogramm

Die Testkampagne startete am 26. September 2004. Die ersten Tests konnten mit wenigen Anpassungen von Parametern des VCS an das reale Vehikelverhalten erfolgreich durchgeführt werden. Alle Systeme arbeiteten wie erwartet, kleinere Probleme traten z.B. mit Schwingungen an der Brennkammer während der Feeding Break-In Tests bei höheren Drücken auf. Um einen sicheren Betrieb des Vehikels während aller geplanten Tests gewährleisten zu können, wurde die Testsequenz während der Tests an die aktuellen Prüfstands- und Vehikelbedingungen angepasst. Zusätzlich ergaben sich leichte Anpassungen aus Resultaten von Hochdruck-Brennkammertests, die parallel zu den CLEAN-Versuchen am CEPr in Frankreich durchgeführt wurden.

Nach einer Testdauer von insgesamt zehn Wochen und eine Gesamtlaufzeit von 82 Stunden konnte die CLEAN Testkampagne am 10. Dezember 2004 erfolgreich abgeschlossen werden.

Die Resultate der CLEAN Tests werden in einem parallel veröffentlichten Manuskript erläutert.

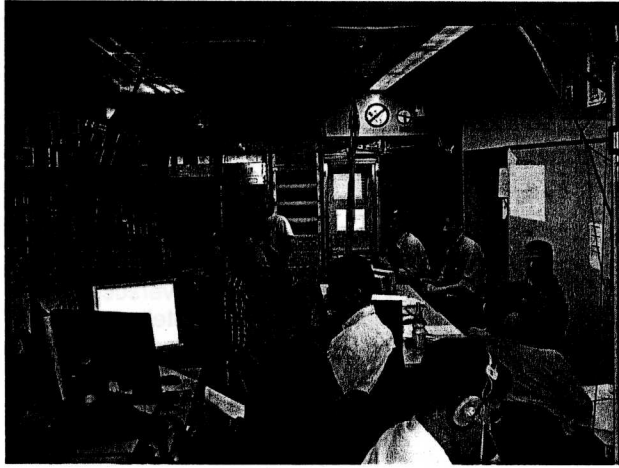


BILD 16. Kontrollraum während des Tests

4. ZUSAMMENFASSUNG

Alle Prüfstandssysteme sind im Zeitplan realisiert worden und haben wie erwartet funktioniert. Das Konzept der eigenständigen Kontrollsysteme für einzelne Teilsysteme hat sich als optimal zur Unterstützung von komplexen Testaufbauten dieser Art herausgestellt.

Die Tests am Höhenprüfstand in Stuttgart konnten im Dezember 2004 nach zehn Wochen Test erfolgreich abgeschlossen werden, ohne irgendwelche Schäden am CLEAN Vehikel zu verursachen.

Alle geplanten Tests der Programmpartner wurden durchgeführt, die im EU-Vertrag vereinbarten Ziele konnten erfüllt werden.

Mit dem CLEAN-Programm konnte gezeigt werden, dass die Zusammenarbeit der verschiedenen europäischen Triebwerksfirmen wichtige Impulse für die Entwicklung von Triebwerken der nächsten Generation liefert.

Die Arbeit wurde im Rahmen des fünften EU-Rahmenprogramms / EEFAE-Technologie-Plattform (GRD1-1999-10403) durchgeführt. Die Autoren möchten der EU für die Unterstützung dieses Programms danken.

FORMELSYMBOLS UND ABKÜRZUNGEN

p_0 [kPa]	Druck vor dem Vehikel
p_9 [kPa]	Druck hinter der Düse des Vehikels
T_0 [K]	Temperatur vor dem Vehikel
\dot{m}_{25} [kg/s]	Massenstrom durch das Vehikel
ATF	Höhenprüfstand (Altitude Test Facility)
BMC	Bench Master Controller
CAP	System zur Verhinderung des Pumpens
CLEAN	Component Validator for Environmentally-friendly Aero-Engine
CS	Kontrollsystem (Control System)
CRT	Verdichterlaufzeit (Compressor Run Time)
CTTC	CLEAN Test Technical Committee

EC	Abgasgehäuse (Exhaust Casing)
HDT	Hochdruckturbinen
HDV	Hochdruckverdichter
HEX	Wärmetauscher (Heat Exchanger)
ILA	Institut für Luftfahrtantriebe
MMI	Bedienschnittstelle (Man Machine Interface)
NDT	Niederdruckturbinen
NDV	Niederdruckverdichter
PL	Fahrhebel (Power Lever)
PULS	Datenerfassungssoftware
SAS	Sekundärluftsystem (Secondary Air System)
SQF	Squeeze Film
TMEA	Transportable Messwerterfassungsanlage
VSV	Variable Statorschaufeln (Variable Stator Vanes)
WCOC	Wassergekühlter Ölkühler (Water Cooled Oil Cooler)
WDT	Überwachungsfunktion des Kontrollsystems (Watch Dog Timer)

LITERATUR

- [1] G. Wilfert, B. Massé, Technology integration in a low emission heat exchanger engine, CEAS 2001, Nottingham, UK, 2001
- [2] K. Broichhausen, G. Wilfert, H. Scheugenpflug, CLEAN – the European Environmentally Friendly Engine Demonstrator, ICAS 2002 23rd International Congress of Aeronautical Sciences, Toronto, Canada, 2002
- [3] G. Wilfert, CLEAN – Technologies for Future Efficient and Environmentally Friendly Aero-Engines, 5th European Conference on Turbo-machinery, Praha, Czech Republic, 2003