FLECS\_ZB\_2\_2007-03-31



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Hamburg University of Applied Sciences



# **FLECS**

# Funktionale Modellbibliothek des Environment Control Systems

# Zwischenbericht Nr. 2

Förderkennzeichen: HH59 Laufzeit: 2005-06-01 – 2007-09-04 Berichtszeitraum: 2006-05-01 – 2007-03-31

> Dieter Scholz Christian Müller

# 2007-03-31

Studiendepartment Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Berliner Tor 9 D - 20099 Hamburg

# Kontaktdaten zu FLECS an der HAW Hamburg

Prof. Dr.-Ing. Dieter Scholz, MSME Studiendepartment Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau Fakultät Technik und Informatik Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Berliner Tor 9 20099 Hamburg Tel.: 040-70971646 Fax: 040-42875-7809 info@ProfScholz.de

Dr.rer.nat. Christian Müller Studiendepartment Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau Fakultät Technik und Informatik Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Berliner Tor 9 20099 Hamburg Tel.: 040-42875-7910 Fax: 040-42875-7809 mueller@fzt.haw-hamburg.de

Homepage des Projektes:

http://FLECS.ProfScholz.de

# Inhalt

		Seite
1	Zusammenfassung	4
1.1	Wissenschaftliche/technische Ergebnisse	5
	1.1.1 Ergebnisse von Airbus	5
	1.1.2 Ergebnisse der HAW	6
	1.1.3 Ergebnisse von CBN	7
1.2	Stand des Vorhabens	7
1.3	Aussicht auf Erreichung der Ziele des Vorhabens	9
1.4	Relevante Ergebnisse Dritter	10
1.5	Änderungen in der Zielsetzung	10
1.6	Verwertung der Ergebnisse	10
1.7	Zusammenarbeit mit den Projektpartnern	10
	1.7.1 Projektpartner CBN	10
	1.7.2 Projektpartner Airbus	12
	1.7.3 Trilaterale Zusammenarbeit	13
2	Technischer Bericht (siehe Anhang A)	15
3	Veröffentlichungen, Vorträge	17
4	Zusammenstellung der verwendeten Fachliteratur	18
4.1	Verwendete Normen und Literatur bezüglich der Benennung	
	von Parameternamen	18
5	Liste der erstellten Dokumentation	20
	Literaturverzeichnis	21
Anhan	g A Veröffentlichung im Rahmen des	
	International Workshop on Aircraft System Technologies (AST 2007)	22

# 1 Zusammenfassung

## Verbundvorhaben, Partner, Federführer

Beim Projekt FLECS (<u>F</u>unktionale Mode<u>l</u>lbibliothek des <u>E</u>nvironment <u>C</u>ontrol <u>S</u>ystems, oder: <u>F</u>unctional <u>L</u>ibrary of the <u>E</u>nvironment <u>C</u>ontrol <u>S</u>ystem) handelt es sich um ein Verbundvorhaben der Partner (**BWA 2005a**, § 3 (4))

- Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW),
- CeBeNetwork GmbH, Bremen (CBN),
- Airbus Deutschland GmbH, Hamburg (AD).

Federführend innerhalb des FLECS Projekts ist die HAW Hamburg (BWA 2005a, § 3 (2)).

# Umfang und Gliederung des Zwischenberichtes

Die Partner der HAW sind gegenüber dem Projektträger Luftfahrtforschung und -technologie (PT-LF) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Projekt FLECS nicht zur Rechenschaft verpflichtet. Demzufolge liefern CeBeNetwork und Airbus Deutschland auch keine eigenständigen Zwischenberichte an das DLR ab.

Dieser Zwischenbericht der HAW setzt auf dem am 30.04.2006 verfassten 1. Zwischenbericht auf, und gibt einen Überblick über das ganze Projekt FLECS, wobei die Arbeiten der Partner nur zusammenfassend beschrieben werden. Die im 1. Zwischenbericht erwähnten Fakten werden als bekannt vorausgesetzt. Soweit wie möglich und sinnvoll beziehen sich daher die folgenden Abschnitte auf die neuen Erkenntnisse des Gesamtprojekts. Lediglich bei den Punkten "Finanzen" und "Verwertung" bezieht sich die Darstellung im Zwischenbericht allein auf die Situation der HAW.

Die Gliederung dieses Zwischenberichtes folgt den Vorgaben in PT-LF 2004.

Die in PT-LF 2004 geforderte Darstellung der

- Gesamtziele,
- zusammenfassenden Ergebnisse,
- Termine und der
- Kooperation

sind in einem Übersichtsbericht des Federführers in Abschnitt 1 diesen Zwischenbericht eingearbeitet.

## Projektlaufzeit

Nach **BWA 2005a** (FLECS Grundvertrag) und wie im 1. Zwischenbericht ausgeführt, endet die Projektlaufzeit am 04.09.2007. Zeitnah zur Abgabe dieses Zwischenberichts wird ein Antrag auf eine kostenneutrale Verlängerung um 1 ½ Monate gestellt. Dieses Vorgehen ist bereits mit Herrn Kranz bzw. Herrn Ross abgestimmt. Von Airbus ist eine weitere Verlängerung

des Projekts um 6 Monate angedacht. Nach einer AD internen Besprechung Ende März, erfolgt am 2. Mai eine Besprechung zwischen AD und der HAW, in der die inhaltlichen Schwerpunkte der Verlängerung diskutiert werden. Bei Abgabe dieses Zwischenberichts gelten für die Leistungserbringung folgende Eckdaten:

- Die Leistungen sind bis zum 04.09.2007 zu erbringen.
- Ein Abschlussbericht ist bis zum 04.12.2007 zu erstellen.

## Berichtszeitraum

Nach **BWA 2005a** in Verbindung mit **BWA 2005b** wurde am 22.02.2006 die erste Projektfortschrittsbesprechung zu FLECS durchgeführt. Eine weitere Projektfortschrittsbesprechung unter Beteiligung des PT-LF soll am 22.06.2007 stattfinden. Der Bericht umfasst den Zeitraum vom 01.05.2006 – 31.03.2007.

# 1.1 Wissenschaftliche/technische Ergebnisse

# 1.1.1 Ergebnisse von Airbus

Airbus hat innerhalb des Projekts im wesentlichen die wissenschaftliche und technische Überprüfung der von CBN bzw. der HAW erbrachten Arbeitsleistungen übernommen. Zudem wurden der HAW klimaanlagenspezifische Daten zur Verfügung gestellt, auf deren Basis Simulationsmodelle entwickelt werden konnten.

Gemäß Kooperationsvertrag weißt AD den Komponenten im FLECS Projekt einen Vertraulichkeitsstatus zu. Die aufgeführten Komponenten werden entweder einem öffentlichen oder einem vertraulichen Bereich zugewiesen. Die im öffentlichen Teil abgelegten Komponenten basieren auf allgemein verfügbarem Wissen. Dieser Teil der Bibliothek kann von CBN und HAW uneingeschränkt genutzt werden. Die Komponenten im vertraulich zu behandelnden Teil greifen auf Wissen von Airbus oder von Zulieferern zurück. Es handelt sich hier um produktnahe Komponenten, die geheime Kenngrößen enthalten.

Die bereits bei AD entwickelten Komponenten, die eine ausreichende Funktionalität besitzen, sollen von der HAW in die FLECS Datenbank eingepasst werden.

# 1.1.2 Ergebnisse der HAW

Die im ersten Berichtszeitraum entwickelte thermodynamische und strömungsmechanische Beschreibung der Rohre wurde um eine Unterscheidung des Luftgemisches in trockene Luft, Wasserdampfgehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt und flüssiges Wasser erweitert.

Mit Hilfe dieser Beschreibung ist es möglich Kondensations- und Verdampfungsprozesse zu behandeln. Die Erweiterung der Modellblöcke erforderte eine weitergehende ausführliche Überprüfung der Simulationsmodelle auf Systemstabilität und Echtzeitfähigkeit.

Verschiedene Wärmeübergangselemente wurden definiert. Somit ist eine vernetzte Simulationsstruktur von Luftverteilungssystemen und Wärmetransfersystemen möglich, mit deren Hilfe Wärmetauscher dargestellt werden können.

Die Einbeziehung der Kondensation und Verdampfung erlaubt eine Erweiterung der Komponenten auf flugzeugspezifische Anwendungen, wie z. B. ein detailliertes Modell der Kabine. Mit den von Airbus gestellten Parametersätzen konnte eine Simulation der Temperaturregelung der Kabinenzone erzeugt werden.

Eine Formulierung für einen Massenstromknoten wurde entwickelt Die Beschreibung von allgemeinen Strömungswiderständen wurde durch Ventile erweitert, die auch eine Behandlung von kompressiblen Strömungen zulassen. Ein großer Teil der von Airbus entwickelten Komponenten wurde überarbeitet und der FLECS Modellstruktur angepasst.

In einer TN wurde eine auf DIN-Normen basierende einheitliche Bennennung von Parameternamen definiert.

Die Dokumentation der entwickelten Modellblöcke wurde in zwei Bereiche aufgeteilt. Zum einen wurde eine Lizenz des MATLAB/Simulink Report Generators von MathWorks erworben. Der Report Generator erlaubt die Struktur der Simulink Blöcke wiederzugeben. Die Dokumentation der mathematischen Formulierung erfolgt über Kommentare im Quelltext der Algorithmen, die auch als PDF-Dokumente abgerufen werden können.

Die wissenschaftlichen Ergebnisse innerhalb des FLECS Projekts wurden im Rahmen von Kongressen vorgestellt. Eine weiterführende Beschreibung der Ergebnisse der HAW wird in Abschnitt 2 gegeben.

## 1.1.3 Ergebnisse von CBN

Die von Airbus in der Dokumentation zum Arbeitspaket WP 2 (Work Package, WP) aufgeführten Anforderungen wurden von CBN zum großen Teil umgesetzt. Es wurde ein zentrales Graphical User Interface (GUI) und ein "Cockpit" GUI erstellt. Damit ist der Benutzer in der Lage, interaktiv in die Simulation einzugreifen und Parametersätze zu definieren. Die Simulationsmodelle können über das zentrale GUI gesteuert werden, indem Lade-, Speicher- und Intialisierungsfunktionen definiert wurden. Die Simulation eines Modells mit verschiedenen Parametersätzen (Batch Mode) wurde gezeigt. Über ein "Display" GUI können einzelne, vom Benutzer definierte Signale ausgelesen und dargestellt werden.

# **1.2** Stand des Vorhabens

### Arbeitsplan (Projektstrukturplan)

Bild 1.1 zeigt den Arbeitsplan. Der Arbeitsplan enthält die hierarchische Struktur der Arbeitspakete (Work Packages, WP) und Aufgaben (Work Tasks, WT) von FLECS. Für den Soll-Ist-Vergleich im Zwischenbericht wurden die WPs und WTs gekennzeichnet mit ihrem jeweiligen Bearbeitungsstand:

- ✓ Arbeitspaket oder Aufgabe wurde abgearbeitet
- (✓) Arbeitspaket oder Aufgabe wurde inhaltlich abgearbeitet. Eine Dokumentation der Ergebnisse steht noch aus
- ! Bearbeitung des Arbeitspaketes oder der Aufgabe ist in Zeitverzug



**Bild 1.1** Arbeitplan (Projektstrukturplan). Arbeitspakete (WP) und Aufgaben (WT) von FLECS mit Kennzeichnung des Bearbeitungsstandes.

## Zeitplan (Balkenplan)

Bild 1.2 zeigt den Zeitplan (Balkenplan), der für den geforderten Soll-Ist-Vergleich (Stand 31.03.07) farblich gekennzeichnet wurde. Der Zeitverzug der HAW ist durch die gemeinsame Entscheidung der Projektpartner begründet, eine grundlegende Beschreibung der Simulationsmodelle zu erarbeiten. Mit Hilfe der grundlegenden Ausarbeitung ist eine vielseitige Beschreibung von Simulationen möglich. Aufgrund der von AD zu Verfügung gestellten Komponenten ist eine fristgerechte Erstellung aller Komponentenklassen bis zum Endes des Projekts gewährleistet.



**Bild 1.2** Zeitplan (Balkenplan) zum Projekt FLECS mit Kennzeichnung des Bearbeitungsstands zum 31.03.2007. Die Zuordnung der Arbeitspakete zu den Partnern kann Bild 1.1 entnommen werden.

## Kostenplan

Als Nachweis der Kosten wird der Zwischennachweis 2006 angeführt (Stand 31.12.2006). Mit 59.107,31€ ist der größte Teil der Aufwendungen im Jahr 2006 auf die Personalkosten entfallen. Das Defizit im Kassenbestand von 8.134,59€ zum 31.12.2006 lässt sich über eine zu geringe monatliche Kalkulation der Personalkosten erklären.

Aufgrund der der im Zwischennachweis 2006 aufgezeigten Aufwendungen läst sich abschätzen, dass die Personalkosten bis zum Ende der Laufzeit des Vorhabens gedeckt werden. Der zu erwartende Überschuss würde ausreichen, das Projekt kostenneutral um 1 <sup>1</sup>/<sub>2</sub> Monate zu verlängern.

Druckdatum: 31.01.2006		7wis	schennachweis 2	Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg			
Laufacility 04.00 2005 04.00 2007		200		Portinor Tor 0			
Lautzeit: 01.06.2005-04.09.2007			FKZ: HH39	20000 Homburg			
Förder	quote: 100%	FLECS-FU	Inktionale Model	bibliothek	20099 Hamburg		
		Gesamt-	In 2005	In 2006		insg. bisher	
		finanzierungs-	abgerechnete	abgerechnete		abgerechnete	
Nr.	Bezeichnung	plan in €	Aufwendungen	Aufwendungen		Aufwendungen	
1	2	3	4	5	6	7	
0812	BAT II a bis I	116.942,00	17.211,67	59.107,31		76.318,98	
0817	Angestellte BAT X bis III						
0820	Lohnempfänger(innen) MTArb						
0822	Beschäftigungsentgelte	1.628,00		118,58		118,58	
0831	Geräte/Gebrauchsgegenstände	9.400,00	4.809,42	3.771,60		8.581,02	
0834	Mieten und Rechnerkosten						
0835	Vergabe von Aufträgen						
0843	Verbrauchsmaterial etc.						
0846	Dienstreisen In-/Ausland						
0861	Summe Ausgaben	127.970,00	22.021,09	62.997,49		85.018,58	
0862	sog. Gemeinkosten	11.530,00	849,41	3.305,10			
0863	Ausgaben I	139.500,00	22.870,50	66.302,59			
0866	Umsatzsteuer	22.320,00	901,10			901,10	
0867	Gesamtaufwand	161.820,00	23.771,60	66.302,59		90.074,19	
abgerechnete Aufwendungen 2006			23.771,60	66.302,59		90.074,19	
Zahlung der BWA Hamburg incl. MWSt			25.026,43	58.168,00		83.194,43	
Kassenbestand 31.12.2006			1.254,83	-8.134,59		-6.879,76	
Die Bestimmungen des Vertrages sind beachtet worden. Die Richtigkeit und Vollständigkeit wird bescheinigt.							

**Bild 1.3** Zwischennachweis der Kosten im Projekt FLECS. Die Aufwendungen zum 31.12.2006 werden dem Budget für die Gesamtlaufzeit bis zum 04.09.2007 gegenüber gestellt.

Bis jetzt sind nur geringfügige Beschäftigungsentgelte in der Höhe von 118,58 € angefallen, weil sich Studenten über Diplom- bzw. Studienarbeiten am FLECS Projekt beteiligt haben.

Geräte wurden wie geplant angeschafft. Einige Anschaffungen konnten günstiger realisiert werden als zunächst geplant. Es besteht daher noch etwas Spielraum für weitere Anschaffungen bzw. eine Projektverlängerung.

Sog. Gemeinkosten sind insbesondere durch Kongressbesuche anfallen. Diese Reisen habe die Möglichkeit geboten über Poster bzw. Vorträge das FLECS Projekt einem großen Fachpublikum vorzustellen und die Ergebnisse zu diskutieren.

Trotz des Defizits des Kassenbestands ist die Kostensituation zufriedenstellend. Mittel für Beschaffungen sind abgeflossen. Für die Realisierung der Planungen in der Restlaufzeit des Projektes ist genug Geld vorhanden.

# **1.3** Aussicht auf Erreichung der Ziele des Vorhabens

Die in der Vorhabensbeschreibung definierten Ziele können nach dem jetzigen Stand der Arbeiten erreicht werden.

## **1.4 Relevante Ergebnisse Dritter**

Die relevanten Ergebnisse Dritter wurden umfassend im 1. Zwischenbericht zusammengefasst. Weiterhin spielen Patente und Schutzrechte bei der Erstellung der Software keine Rolle.

# 1.5 Änderungen in der Zielsetzung

Die schon im 1. Zwischenbericht aufgeführte stärkere Betonung der Projektergebnisse auf eine Erarbeitung von soliden Grundlagen bleibt bestehen. Bis zum offiziellen Projektende am 04.09.2007 wird eine umfangreiche Durchführung von aufwendigen Simulationenmodellen nicht abschließend durchzuführen sein. Ziel bleibt unverändert die Simulationsbibliothek mit den aus der Praxis geforderten speziellen Komponenten zu füllen (entsprechend der Technical Note von Airbus zum WP 2). Detaillierte Simulationen der entwickelten Komponenten sollen in der von Airbus finanzierten FLECS-Fortsetzung abgearbeitet werden. Airbus zeigt sich mit dem Projektfortschritt zufrieden.

# **1.6** Verwertung der Ergebnisse

Gegenüber den Zielen zur Verwertung, wie sie in der Vorhabensbeschreibung genannt sind, gibt es derzeit keine Änderungen oder Ergänzungen.

# 1.7 Zusammenarbeit mit den Projektpartnern

### 1.7.1 Zusammenarbeit mit CBN

Bis zum November 2006 war innerhalb der CeBeNetwork GmbH, Bremen (CBN) Herr Carsten Erdmann zuständig für das FLECS Projekt. Aufgrund einer internen Umstrukturierung kam es zu einem personellen Wechsel. Ab November 2006 hat Herr Matthias Haaren die inhaltliche Verantwortung für FLECS übernommen. Projektleiter für FLECS bei CBN ist Dipl.-Ing. Wolfgang Schmid CeBeNetwork GmbH Flughafenallee 28 28199 Bremen Tel.: 0421-558364-67 Fax: 0421-558364-42 wschmid@cebenetwork.de

Das Projekt FLECS wurde bei CBN bis November 2006 bearbeitet von Dipl.-Biol. Carsten Erdmann CeBeNetwork GmbH Hein-Saß-Weg 36 21129 Hamburg Tel.: 040-333987-16 Fax: 040-333987-29 cerdmann@cebenetwork.com

Ab November 2006 bearbeitet bei CBN das Projekt FLECS

Dipl.-Ing. Matthias Haaren CeBeNetwork GmbH Hein-Saß-Weg 36 21129 Hamburg Tel.: 040-333987-19 Fax: 040-40-33987-29 mhaaren@cebenetwork.com

Wie im Fall von Herrn Erdmann besitzt auch Herr Haaren eine Zugangs- und Arbeitsberechtigung an der HAW (**HAW 2006**). Herr Haaren erhält seine fachliche Anregungen und Aufgaben während den stattfindenden Projektbesprechungen (s. u.).

## 1.7.2 Zusammenarbeit mit Airbus

Die wissenschaftliche Koordination für FLECS und den Hauptteil der konkreten Mitarbeit am Projekt übernimmt bei Airbus

Dr.-Ing. Tim Giese Technology & Processes - EYVAT Airbus Deutschland GmbH Kreetslag 10 21129 Hamburg Tel.: 040-743-80110 Fax.: 040-743-73787 tim.giese@airbus.com

Die formale Einbindung von FLECS in die Forschungsprojekte bei Airbus übernimmt Dr.-Ing. Georg Mühlthaler Environmental Control Systems - Future Technologies - EYVAT Airbus Deutschland GmbH Kreetslag 10 21129 Hamburg Tel.: 040-743-78487 Fax: 040-743-73787 georg.muehlthaler@airbus.com

Eine Zusammenarbeit mit Airbus erfolgt im Rahmen der Projektbesprechungen, durch E-Mail, Telefon, bzw. über Datenaustausch mit Hilfe des BSCW-Servers.

Zudem wurden persönliche Treffen von Herrn Giese (AD) und Herrn Müller (HAW) durchgeführt:

- 1. Besprechung Giese/Müller am 11.10.06, 16:00 19:00 Uhr
- 2. Besprechung Giese/Müller am 14.12.06, 16:00 18:00 Uhr

Während dieser Treffen wurden fachliche Fragen, die sich bei der konkreten Umsetzung von Simulationsmodellen ergeben haben, diskutiert.

# 1.7.3 Trilaterale Zusammenarbeit

### Besprechungen

Innerhalb der Projektbesprechungen werden die Arbeitsfortschritte der einzelnen Partner vorgetragen und diskutiert, sowie Fakten, die das Projektmanagement betreffen, besprochen. Die Besprechungen finden regelmäßig statt und werden durch ein Protokoll dokumentiert. Bisher wurden folgenden Besprechungen durchgeführt:

- Kick-Off Meeting am 09.06.05, 15:30 18:00 Uhr
- 2. FLECS-Treffen am 06.07.05, 10:00 12:30 Uhr
- 3. FLECS-Treffen am 31.08.05, 09:30 12:30 Uhr
- 4. FLECS-Treffen am 19.09.05, 14:00 16:30 Uhr
- 5. FLECS-Treffen am 10.10.05, 13:00 19:00 Uhr
- 6. FLECS-Treffen am 05.12.05, 09:00 12:30 Uhr
- 7. FLECS-Treffen am 09.01.06, 10:00 15:00 Uhr
- 8. FLECS-Treffen am 15.02.06, 10:00 14:00 Uhr
- 9. FLECS-Treffen am 16.03.06, 10:00 13:00 Uhr
- 10. FLECS-Treffen am 27.04.06, 10:00 13:00 Uhr
- 11. FLECS-Treffen am 29.05.06, 09:30 13:45 Uhr
- 12. FLECS-Treffen am 30.08.06, 09:30 13:45 Uhr
- 13. FLECS-Treffen am 02.11.06, 09:30 13:00 Uhr
- 14. FLECS-Treffen am 07.12.06, 10:00 13:00 Uhr
- 15. FLECS-Treffen am 05.02.07, 09:00 13:00 Uhr
- 16. FLECS-Treffen am 20.03.07, 09:00 12:30 Uhr

### Zusammenarbeit der Partner über das Internet

Die Nutzung eines Servers auf dem eine Software "Basic Support for Cooperative Work" (BSCW) (**OrbiTeam 2004**, **OrbiTeam 2007**) installiert ist, hat sich als sinnvolles Mittel für die Zusammenarbeit der einzelnen Partner herausgestellt. Als ein weiteres Werkzeug wurde von CBN das Programm Subversion/Tortoise in das Projekt eingeführt. Mit Hilfe von Subversion/Tortoise (**Subversion 2007**, **Tortoise 2007**) kann eine Versionsverwaltung der FLECS Datenbank durchgeführt werden. Innerhalb der restlichen Laufzeit des Projekts soll überprüft werden, ob mit Subversion/Tortoise eine effiziente Versionsverwaltung aufgebaut werden kann. Die Erkenntnisse werden von AD als ein Projektergebnis gesehen, und können dazu führen, dass Subversion/Tortoise bei AD eingeführt wird.

## **Trilateraler Kooperationsvertrag**

Am 05.10.2006 wurde ein Kooperationsvertrag zwischen AD, CBN und der HAW (CBN-HAW-AD 2006) unterschrieben.

Die Gliederung des Vertrages ist:

- Vorbemerkung
- § 1 Informationsaustausch, Berichte, Nutzungsrechte
- § 2 Geheimhaltung
- § 3 Haftung
- § 4 Schlussbestimmungen

# 2 Technischer Bericht

Während des Berichtszeitraumes dieses Zwischenberichtes wurde keine Projektfortschrittsbesprechung durchgeführt. Der Projektfortschritt im Berichtszeitraum wird zum einen über die Veröffentlichung im Rahmen des International Workshop on Aircraft System Technologies (AST 2007) (Hamburg, 29. – 30. März 2007) (siehe Anhang A) dargestellt. Die mitgelieferte CD-ROM enthält das AST-Paper sowie die Präsentationsunterlagen zu FLECS vom Workshop AST 2007.

In diesem Abschnitt soll eine Zusammenfassung der Projektfortschritte der HAW, die innerhalb der Veröffentlichung nicht diskutiert werden konnten, gegeben werden. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse von Airbus Deutschland (AD) und der CeBeNetwork GmbH (CBN) wurden in Abschnitt 1.1.1 bzw. 1.1.3 und Anhang A besprochen.

Mit Hilfe der im 1. Zwischenbericht beschriebenen Volumen und Strömungswiderstände konnte die prinzipielle Formulierung der Modellblöcke erarbeitet werden. Die Beschreibung der physikalischen Grundlagen beruht auf thermodynamischen bzw. strömungsmechanischen Formulierungen.

Um die definierten Blöcke auch für flugzeugspezifische Simulationen anwenden zu können, wurden eine Unterscheidung in trockene Luft, Wasserdampfgehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt und flüssigem Wasser eingeführt. Dabei wurde die Annahme gemacht, dass das flüssige Wasser entweder als Reif oder als Nebel vorliegt. Durch Untersuchungen zur Stabilität und zur Echtzeitfähigkeit, konnte gezeigt werden, dass die innere Struktur der Blöcke zwar aufwendiger wird, die Stabilität der Blöcke aber weiterhin vorhanden ist. Aufgrund der Erweiterung ist es möglich verschiedene feuchte Luftströme zu mischen bzw. Wasserdampf- und CO<sub>2</sub>-Quellen in die Simulation einzubauen. Das physikalische Verhalten eines Menschen kann somit simuliert werden. Das Erwärmen bzw. Abkühlen feuchter Luft erfordert die Einführung eines Modells zur Kondensation und zur Verdampfung. Diese Prozesse lassen sich nicht analytisch auflösen, es ist daher notwendig eine iterative Beschreibung zu finden. Der entwickelte Algorithmus weist zum einen eine hohe Konvergenz unter verschiedenen Randbedingungen auf, zum anderen konnte die Anzahl der Iterationsschritte so gering wie möglich gehalten werden, um die Echtzeitfähigkeit zu gewährleisten.

Der entwickelte Kondensations- und Verdampfungsblock kann mit Volumen gekoppelt werden, was eine allgemeine Beschreibung einer Mischkammer zulässt.

Eine Beschreibung für einen Massenstromknoten wurde entwickelt. Dem Knoten liegt ein Linearisierungsansatz zu Grunde, der es ermöglicht, aufgrund des Erhaltungssatzes der einfließenden bzw. ausströmenden Massenströme, den Druck, die Dichte und die Temperatur des Knotens zu berechnen. Unter Berücksichtigung der Stabilität und der Echtzeitfähigkeit erfordert der Knoten einen sehr umfangreichen Algorithmus. Der Knoten kann als Ersatz für ein Volumen verwendet werden und ermöglicht somit eine größere Zahl an Simulationsmöglichkeiten.

Mit Hilfe der erarbeiteten Formulierung von Strömungswiderständen wurden Ventile entwickelt. Bei den Ventilen werden kompressible und inkompressible strömungsmechanische Blöcke unterschieden. Beim Wärmeübergang werden einzelne Blöcke zur Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung unterschieden. Mit Hilfe von Wärmetauschern ist ein vernetzter Aufbau von Luftverteilungs- und Wärmeleitungssystemen möglich.



Bild 2.1 Die Temperaturregelung einer Kabinenzone.

Die beschriebenen Komponenten ermöglichen einen Aufbau einer Simulation zur Temperaturregelung der Kabine (siehe Bild 2.1). Die Ergebnisse wurden mit Airbus-internen Resultaten verglichen. Das Pack wurde als Massenstromquelle definiert. Eine Massestromsenke ist durch das Outflow Valve in der Kabine gegeben (in Bild 2.1 nicht gezeigt). Die Regelung des Ventildurchlasses (siehe Bild 2.1: Trim Air Valve) und der Temperatur des Klimaaggregats (siehe Bild 2.1: Pack) erfolgt über von Airbus gestellte Regler. Die Regler beinhalten von Zulieferern von Airbus bestimmte Kenngrößen.

# 3 Veröffentlichungen, Vorträge

Seit dem Programmstart sind zu FLECS einige Veröffentlichungen und Vorträge erstellt worden. Hier werden die Dokumente genannten, die im ersten Zwischenbericht noch nicht aufgeführt wurden.

## Beiträge auf Kongressen und Workshops:

- 1.) Während des **ICAS Kongress** in Hamburg am 03. 08. September 2006 wurde die Simulation eines Wärmetauschers mit Simulink vorgestellt (**Schulz 2006**).
- 2.) Eine Beschreibung des Aufbaus der FLECS Datenbank und der physikalischen Grundlagen wurde in einem Vortrag und einer Veröffentlichung im Rahmen des International Workshop on Aircraft System Technologies (AST 2007) (Hamburg, 29. – 30. März 2007) gegeben. Dabei wurde das Projekt einem wissenschaftlichen und industrienahen Publikum präsentiert. Das Paper befindet sich im Anhang A dieses Berichtes. Paper und Präsentation sind auf der CD-ROM zum Bericht enthalten.

Zur Unterstützung des FLECS Projekts wurden studentische Arbeiten durchgeführt:

- 1.) KWIATKOWSKI, Mathieu: Simulation of Components from the Environmental Control System. Hamburg, HAW, Dept. Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, 2006
- 2.) SCHULZ, Oliver: *Simulation von Wärmetauschern mit Simulink*. Hamburg, HAW, Dept. Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, 2006
- 3.) WERNER, Tom: *Literaturrecherche: Verfahren und Programme zur Berechnung von Luftsystemen.* Hamburg, HAW, Dept. Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, 2006
- 4.) MAHNKEN, Max: Integration von Kabinensystemen in BWB-Flugzeugkonfigurationen. Hamburg, HAW, Dept. Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, 2006

Diese Dokumente sollen in die Digitale Bibliothek eingestellt werden: http://Bibliothek.ProfScholz.de

Herr Sauterleute der Firma Liebherr-Aerospace Lindenberg wurde am 29.05.2006 zu einem Vortrag an die HAW eingeladen. In einem anschließenden Gespräche wurden Informationen zur Flugzeugklimaanlage generell und zu deren Simulation ausgetauscht. Über den Vortrag erschien ein Artikel im Online Newsletter der HAW: http://newsletter.hawhamburg.de. Der schriftliche Beitrag zum Vortrag von Herrn Sauterleute wurde im Internet abgelegt:

LEHLE, W.; SAUTERLEUTE, A.: *Konzeption und Entwicklung von Flugzeugklimatisierungsanlagen.* Lindenberg : Liebherr Aerospace Lindenberg GmbH, 2006. http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text\_2006\_06\_01\_AirSystems.pdf

# 4 Zusammenstellung der verwendeten Fachliteratur

Verwendete Normen und Literatur bezüglich der Benennung von Parameternamen:

Baehr 2006	BAEHR, Hans Dieter: Thermodynamik. Berlin : Springer. 2006
Eichholz 2005	EICHHOLZ, J.; Airbus Deutschland GmbH, EYVCG: Standardization of Simulation Models in EYV. Hamburg : Airbus, 2005 (EYVC048/05). – Firmenschrift
Incropera 2002	INCROPERA, Frank P.; DE WITT, David P.: Fundamentals of Heat and Mass Transfer. New York : Wiley, 2002
Scholz 2006	SCHOLZ, Dieter: Diplomarbeiten normgerecht verfassen : Schreibtipps zur Gestaltung von Studien-, Diplom- und Doktorarbeiten. Würzburg : Vogel, 2006
Wikipedia 2006	<i>Hilfe:TeX</i> , 2006. – URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Hilfe%3ATeX
DIN 1303 1987	Norm DIN 1303 März 1987. Vektoren, Matrizen, Tensoren : Zeichen und Begriffe
DIN 1304-1 1994	Norm DIN 1304 Teil 1 März 1994. Formelzeichen : Allgemeine For- melzeichen
DIN 1304-5 1989	Norm DIN 1304 Teil 5 September 1989. Formelzeichen : Formelzei- chen für die Strömungsmechanik
DIN 1306 1984	Norm DIN 1306 Juni 1984. Dichte : Begriffe, Angaben
DIN 1314 1977	Norm DIN 1314 Februar 1977. Druck : Grundbegriffe, Einheiten
DIN 1345 1993	Norm DIN 1345 Dezember 1993. Thermodynamik : Grundbegriffe
DIN 1338 1996	Norm DIN 1338 August 1996. Formelschreibweise und Formelsatz

DIN 1338/1 1996	Norm Beiblatt 1 zu DIN 1338 April 1996. Formelschreibweise und Formelsatz : Form der Schriftzeichen
DIN 13303-1 1982	Norm DIN 13303 Teil 1 Mai 1982. Stochastik : Wahrscheinlichkeits- theorie, Gemeinsame Grundbegriffe der mathematischen und der be- schreibenden Stochastik, Begriffe und Zeichen
DIN 13304	Norm DIN 13304 (nicht mehr aktuell). Darstellung von Formelzei- chen auf Einzelnendruckern und Datensichtgeräten
DIN 13345 1978	Norm DIN 13345 August 1978. Thermodynamik und Kinetik chemi- scher Reaktionen : Formelzeichen, Einheiten
ISO 31-0	Norm ISO 31 Teil 0, August 1992. Größen und Einheiten; Teil 0: All- gemeine Grundsätze
ISO 31-4	Norm ISO 31 Teil 4, September 1992. Größen und Einheiten; Teil 4: Wärme

# 5 Liste der erstellten Dokumentation

Bild 5.1 zeigt die Liste der zu erstellenden Dokumente (deliverables) mit geforderten und tatsächlichen Abgabedaten. In der Dokumentation zum WT 3.1 wurden bereits zusätzlich Aufgaben aus der WT 3.4 beschrieben.

#### Deliverables

Deliverables								
	Termin gem.			Termin		Termin		Termin
	Zusatzvertrag	verantwortlich	Airbus	erledigt	HAW	erledigt	CeBeNetwork	erledigt
WT 2.1 Anforderungen an Modellbibliothek	31.12.2005	Airbus	TN	31.08.2005	Μ	07.09.2005	M	12.09.2005
WT 2.2 Def. Schnittstellen zur SystEntwicklung	30.04.2006	Airbus	TN	03.11.2005	Μ	19.12.2005	M	20.12.2005
WP 2 Endfassung	30.04.2006	Airbus	TN	30.04.2005	М		M	
WT 3.1 Voruntersuchungen zur Modellbildung	31.12.2005	HAW	М		TN/S	27.11.2006	TN-A/S	
WT 3.2 Ermittlung: Parameter & Kennwerte	30.04.2006	Airbus	TN		TN-A		M	
WT 3.3 Modellbildung Subsysteme	31.12.2006	HAW	М		TN/S		TN-A/S	
WT 3.4 Dokumentation zur Modellbildung	30.04.2007	HAW	М		TN		TN-A	
WT 4.1 Voruntersuchungen Bibliotheksentwurf	31.12.2005	CeBeNetwork	М		Μ	31.10.2005	TN/S	30.08.2006
WT 4.2 Definition Softwarearchitektur	30.04.2006	CeBeNetwork	М		М		TN/S	
WT 4.3 Erstellung der Benutzeroberfläche	31.12.2006	CeBeNetwork	М		М		TN/S	
WT 4.4 Dokumentation Modellbibliothek	30.04.2007	CeBeNetwork	М		М		TN	
WT 5.1 Definition von Testfällen	31.12.2006	HAW	М		TN		M	
WT 5.2 Validation Subsysteme	30.04.2007	HAW	М		TN		M	
WT 5.3 Integration eines Basissystems	04.09.2007	HAW	М		TN/S		M	
WT 5.4 Validation des Basiskonzeptes	04.09.2007	HAW	М		TN		М	
	TN       Technische Niederschrift (Technical Note)         TN-A       einzelne Abschnitte aus einer Technischen Niederschrift (Technical Note)         S       Software         M       Mitteilung         grün       Deliverable fertig erstellt.							
Stand: 31.03.2007	rot	Arbeit ist hinter	den Zeitpl	an zurück gefa	allen, Del	verable noch n	icth abgegeben.	

**Bild 5.1**: Liste der zu erstellenden Dokumente (deliverables). Die grün gedruckten Dokumente wurden bereits erstellt. Das geforderte und das tatsächlichen Abgabedaten sind angegeben.

# Literaturverzeichnis

BWA 2005a	BEHÖRDE FÜR WIRTSCHAFT UND ARBEIT: Vertrag zwischen BWA und HAW – Förderkennzeichen HH59. Hamburg : BWA, 2005. – Vertrag vom 29.06.2005
BWA 2005b	BEHÖRDE FÜR WIRTSCHAFT UND ARBEIT: <i>Zusatzvertrag zwischen BWA</i> <i>und HAW</i> . Hamburg : BWA, 2005. – Vertrag vom 21.10.2005
CBN-HAW-AD 2006	CEBENETWORK; HAW HAMBURG; AIRBUS DEUTSCHLAND: Vereinba- rung. Hamburg, Bremen : 2006. – Vertrag vom 05.10.2006
HAW 2006	HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN HAMBURG: Zu- gangs- und Arbeitsberechtigung für CeBeNetwork GmbH. HAW : Hamburg, 2006. – Vertrag vom 20.12.2006
OrbiTeam 2004	ORBITEAM SOFTWARE GMBH: <i>BSCW 4 Handbuch</i> . Bonn : Orbi Team, 2004. – Vertrieb: Orbi Team Software GmbH, Endenicher Allee 35, 53121 Bonn
OrbiTeam 2007	URL: http://www.bscw.de (2007-03-31)
PT-LF 2004	PROJEKTTRÄGER LUFTFAHRTFORSCHUNG UND -TECHNOLOGIE: <i>Pro- gramme der Bundesländer – Merkblatt für Zwischenberichte</i> . Bonn : PT-LF, 2004. – Anlage 6 zu <b>BWA 2005a</b>
Schulz 2006	SCHULZ, Oliver: <i>Simulation of Heat Exchangers with Simulink</i> . ICAS Student Participation Programme (Hamburg, 03 08. September 2006). Poster, Hamburg, 2006. – URL: http://FLECS.ProfScholz.de (2007-03-31)
Subversion 2007	URL: http://subversion.tigris.org (2007-03-31)
Tortoise 2007	URL: http://tortoisesvn.tigris.org (2007-03-31)

# Anhang A

# Veröffentlichung im Rahmen des

# International Workshop on Aircraft System Technologies (AST 2007)

Hamburg, 29. – 30. März 2007



# FLECS: FUNCTIONAL LIBRARY OF THE ENVIRONMENTAL CONTROL SYSTEM – A SIMULATION TOOL FOR THE SUPPORT OF INDUSTRIAL PROCESSES

Dieter Scholz<sup>1</sup>, Christian Müller\*<sup>1</sup>, Tim Giese<sup>2</sup>, Carsten Erdmann<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Automotive and Aeronautical Engineering Hamburg University of Applied Sciences Berliner Tor 9, 20099 Hamburg, Germany

<sup>2</sup>Validation & Verification, Airbus Deutschland GmbH Kreetslag 10, 21129, Hamburg, Germany

<sup>3</sup>CeBeNetwork GmbH Hein-Saß-Weg 36, 21129 Hamburg, Germany

info@ProfScholz.de

### Abstract

An Environmental Control System (ECS) in an aircraft ensures the correct air temperature and pressure for passengers and crew. The ECS development process requires the simulation of the ECS system functionality in order to find an optimum system configuration and to support sizing of components. FLECS, the "Functional Model Library of the Environmental Control System", is programmed to support this development process. It offers a library of generic models of ECS components and the aircraft cabin. The library is based on the commercial standard simulation software MATLAB/Simulink. FLECS allows the simulation of a network topology of a system, combining heat and mass flows. Fundamental to the simulation are generalized volume and generalized resistance elements – mass flow resistances as well as heat flow resistances for conduction, convention and radiation. The mass flow of predominantly dry air may contain water vapor and  $CO_2$ . A highly dynamic sample simulation from FLECS components was compared with results from another verified simulation program: Both results were in good agreement. Various Graphical User Interfaces (GUI) in FLECS support everyday use in the industrial environment.

## **1** INTRODUCTION

**Environmental control system:** Heating, cooling, ventilation, distribution and purification of the air as well as control of temperature, pressure and humidity are the tasks of an environmental control system (ECS) on board of aircrafts. Already in the early stage of the air-

craft development, different system architectures need to be compared. Trade studies need to be performed to evaluate one system architecture against another alternative, in order to be able to choose the most suitable one in the end [1]. The many functions of an ECS require many components, which need to be sized and tuned to each other in an optimum way.

**Simulation:** The ECS development as just described is achieved today with the help of simulation. Three main areas of simulation in the ECS development may be differentiated:

- the calculation of three-dimensional (3D) flow fields in components of the environmental control system or the aircraft cabin by means of Computational Fluid Mechanics (CFD) [2],
- the simulation of one-dimensional (1D) flow in air distribution networks,
- the functional simulation of the environmental control system and the cabin.

An overview of the application of different areas of simulation in ECS is given in [3]. The *functional simulation* is the topic of the project FLECS. It encompasses especially the description of thermodynamics, mechanics and control aspects of the ECS and its components with an emphasis on their dynamics and interaction.

**Functional library:** The project's aim is to support design activities for innovative air conditioning systems in future passenger aircraft. In order to achieve this, a model library based on the commercial standard software MATLAB/Simulink [4] [5] is programmed. Finally, the library will contain generic simulation models of all relevant components that can be found in the air conditioning system and of thermally relevant components in the aircraft cabin. Information on the FLECS project in [6] and [7].

**New technologies** in the area of ECS in aircrafts are e.g. bleedless aircraft, vapor cycle system, new control concepts, increase of cabin air humidity and galley cooling. These new technologies require standard components as well as new ones that are modeled in the FLECS project. In this way a functional ECS simulation is built up that ensures the safe introduction and integration of these new technologies in the aircraft.

**Literature review:** A review [8] showed that many approaches exist of 1D, 3D or functional simulation that have been or could be applied to ECS development. Publications with aircraft ECS applications are e.g. [9] [10] [11]. The goals of FLECS are fully met in none of the contribution found in [8].

## 2 IMPLEMENTATION OF FLECS IN THE INDUSTRIAL PROCESS OF ENVIRONMENTAL CONTROL SYSTEM DEVELOPMENT

#### 2.1 Product Development: The V-Model in Aircraft System Design

The development process of an aircraft environmental control system follows the widely used V-model [12]. In general the V-model is associated with software development. The application of the V-model in aircraft system development requires further substantiation that is briefly described here and in *Figure 1*.

Starting with the *aircraft top level requirements*, system **requirements** are derived to fulfill the aircraft top level requirements and to add the necessary level of detail for a complete specification of the respective system. The system specification process comprises three different levels of detail. *High level system requirements*, stating global system behavior in the aircraft context are followed by a *functional system specification*. The functional specification is a breakdown of all functions a system has to fulfill, without giving a solution how this function is to be implemented. The implementation down to signal level (for the software parts of a system) or down to a single piece of equipment (for the hardware parts) is described in the *detail specification*.



Figure 1 - Simulation in the system development process of an aircraft manufacturer

During the specification process an iterative process of **Design Verification** is carried out, to check if the more and more detailed design fulfills the requirements of the different specification levels. Right after first software and hardware prototypes have been developed, the iterative **Product Verification** processes start. This is to verify, if the now available products comply with the requirements they have been developed to. Usually information and responsibility for a certain task is handed over to another person, department or company. Nevertheless, the final product is integrated into an aircraft, for which the aircraft manufacturer is held responsible.

### 2.2 Functional Simulation

Functional simulation is a mean to support the aforementioned activities in all phases of the design and to track the development progress. To be supportive to the design process, the simulation activities shall be traceable and as seamless as possible. During early aircraft program concept phases there is the need to **investigate a large number of potential system architectures** in a short time frame with the help of simulation, to find the best candidates for an *optimum architecture*. After down selection of system architectures, simulation models need to be further detailed giving a better insight into the expected system behavior. It shall be possible to enhance the simulation model used for **concept studies** by simply adding more detail without changing the architecture of the simulation model. During this detailing process the number of contributors to such a model is increasing, as more technical disciplines get deeply involved (e.g. thermodynamics group as well as controller design group).

To be compatible to such a process **FLECS follows** a strictly **modular approach**. Sub-components representing generic physical mechanisms or software functions are assembled to components, representing a piece of aircraft equipment or a certain controller function. Components are grouped into component classes covering major aircraft functions to structure the resulting library. Components of the library are available in three different detail levels "*Pre-Design*", "*Simple Dynamic*" and "*Detailed Dynamic*", to cope with the different needs during different design phases. Interfaces of the components are standardized to ensure easy replacement of components with different detail levels.

If the design process enters the phase of prototypes, there is the need of product verification. For **hardware in the loop** (HIL) testing of controllers, simulated equipment is needed to close the loop. HIL testing takes place in a real-time environment, which needs *real-time capable* simulation models. Such models are integrated on the test rig as C-code, compiled and linked on the target platform. With the chosen simulation tool for FLECS, MATLAB/Simulink, C-Code can automatically be generated. To fulfill real time constraints for the generated C-Code, the user has to use components up to 'Simple Dynamic' level. In addition with a small set of overall modeling guidelines, the usage of these components ensures the later use of desktop models for HIL activities, without adding additional burden to the users of the library.

System designers have the need to use simulation models in two different ways: An **in-teractive mode**, where the model reacts to interactive user inputs. This is especially useful for design verification activities, when models are used to get a better insight of complex system behavior. On the other hand, there is a need to run a large number of predefined test cases in **batch mode**, to ensure proper system functionality in the whole operational envelope of the system. Furthermore it needs to be ensured, that during system development already verified functions are still working properly (regression testing). Within the FLECS project interactive mode as well as batch mode functionality has been developed (see section 4).

As models get more and more complex during system development, **simulation performance** is an issue in a desktop environment. Surprisingly there are fewer performance constraints on HIL test rigs, because the modular structure of the model allows easy distribution of sub-model parts on to different processor cards. A similar principle is applied to the desktop environment: Within the FLECS project, methods are developed to generate C-Code for sub-models, which include the numerical solver for the sub-model. Different integration step sizes are applied for the different sub-models. This approach results in an optimized use of CPU time, as every sub-model is solved with the most appropriate solver and time step. For future applications it is envisaged to run the sub-models on different CPUs, allowing the creation of comprehensive *Software in the Loop* test environment.

## **3** MODELING APPROACH AND IMPLEMENTATION IN MATLAB/SIMULINK

#### 3.1 Component Classes, Components and Models

Each component of the Environmental Control System has to be mapped by a MATLAB/Simulink model block. Several **component classes** were defined for FLECS:

- Ambient conditions
- Aircraft boundaries
- Flow resistances
- Flow and pressure sources
- Volumes
- Area models
- Mixing unit
- Heat exchangers
- Air cycle machine and air compressor
- Ram flow
- Vapor cycle systems
- Sensors
- Controls

Each FLECS component class contains a number of **models** for each aircraft **components** considered. The real world behavior has to be reproduced by a physical description using the appropriate functions. To assure high flexibility and a large application range, modeling has to be as general as possible. This leads to three different **model types** "Detailed Dynamic". Simplifications of the models introduced in a second step, lead to the types "Simple Dynamic" and "Pre-Design" that enhance stability of the simulation and reduce simulation time.

### 3.2 Functions

A dynamic simulation shows the evolution of system parameters with time. The time evolution is expressed by a set of **state equations** (functions). The time series is defined by a time step  $\Delta t$ . At each defined point in time the state equation for each **state variable** has to be solved.

Three different **types of functions** that describe the components have to be distinguished:

1.) Functions that are defined by time-dependant rate equations, which can be expressed in the form dy(t)/dt = f(y(t);t). In general f(y(t);t) is not only a function of y(t), but also a function of other time-dependant variables. Equations according to this type are solved by an integrator and are only solvable, if the initial value for each variable is known.

2.) Functions that are defined by quasi steady equation in the form y(t) = f(t). These equations are solvable without any knowledge of initial values.

3.) Functions that are of steady state type y(t) = const.

The interaction of functions of type 1.) and 2.) can cause **stability problems**. Therefore the inner structure of each model block has to be optimized and well tested to ensure numeric stability.

MATLAB/Simulink provides a software platform, which enables to solve functions of type 1.) with two different **solver types**: fixed step solvers and variable step solvers. For the model blocks developed, it was ensured that both solver types work satisfactorily for different processes with different time constants.

Volumes as well as heat rate and flow resistances are at the heart of FLECS. They are the **backbone of an ECS simulation**. For this reason, details in this paper are limited to volumes and resistances. They were used to build up highly dynamic simulations. Such simulations with many components were performed to check the stability and real time capability of FLECS

## 3.3 Network Topology

FLECS allows the simulation of a network topology. The network topology is a rather universal topology and includes e.g. parallel and series systems. Model blocks can be linked together with signal lines that carry the state variables. In Simulink, it is necessary to connect two neighboring blocks A and B in the topology by two unidirectional signal lines. One signal line sends a number of output variables from A to B, the second line sends output back from B to A. An example of **a combined heat and mass flow system** is shown in *Figure 2* (Note: signal lines are not shown in *Figure 2*). Model blocks are:

- volumes or nodes (nodes have no mass storage capability),
- flow resistances or heat resistances,
- pressure sources, mass flow sinks (that are boundary conditions of the network).



Figure 2 - Example of a network topology of a simulation with heat and mass flows

#### 3.4 Basic Volume

The component class "volumes" in FLECS is characterized by constant volumes (isochore systems). State variables are temperature T, density  $\rho$  and pressure p.

The physical behavior of volume elements is based on the **first law of thermodynam**ics. FLECS is built for applications where the flow velocities are much smaller than the velocity of sound. In such applications, the kinetic energy at the start and at the end state of a system can be neglected. Differences in height are neglected. In such applications, the potential energy at the start and at the end of a system can be neglected. In this case the differential form of the first law of thermodynamics is

$$\frac{dH(t)}{dt} = (\dot{Q}(t) + \dot{H}^{in-out}(t)) + V(t)\frac{dp(t)}{dt} + \underbrace{\left(p(t)\frac{dV(t)}{dt}\right)}_{=0}$$
(1)

The heat transfer rate  $\dot{Q}$  is characterized by the external heat transfer processes and will be discussed in Subsection 3.7.  $\dot{H}^{in-out}$  specifies the enthalpy flow, which enters into the system, respectively leaves the system. Eq. 1 can be converted into a **state equation of the temperature T** using the definition of the specific enthalpy h (h=H/m) and the relation  $dh/dt = c_p \cdot dT/dt$  ( $c_p$ : specific heat capacity at constant pressure):

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{V \rho(t) c_{v}} (\dot{Q}(t) + \dot{H}^{in-out}(t)) - \frac{T(t)}{\rho(t)} \frac{d\rho(t)}{dt}$$
(2)

The state equation of the density  $\rho$  can be derived from the continuity equation

$$\frac{d\rho(t)}{dt} = \frac{1}{V} \frac{dm(t)}{dt} = \frac{\dot{m}^{in}(t) - \dot{m}^{out}(t)}{V}$$
(3)

The state variables pressure, density and temperature are coupled by the equation of state. For air flow in ECS the ideal gas equation applies. The state equation for the pressure p follows from the ideal gas law

$$p(t) = R T(t) \rho(t) \tag{4}$$

### 3.5 Generalized Volume with Air, Water and CO<sub>2</sub>

In general, the airflow is composed not only of dry air, but also of a fraction water vapor and a fraction CO<sub>2</sub>. The input and output variables (*Table 1*) for a volume element have to be adapted to account for all constituents: air, water and CO<sub>2</sub>. The composition of the gas mixture cannot be assumed constant, it is rather a time dependant variable. Therefore the different **contents of water vapor (x\_{WV}), CO<sub>2</sub> (x\_{CO2}) and water (x\_{H2O}) have to be considered separately. x\_{WV}, x\_{CO2} and x\_{H2O} are the ratio of the mass of the corresponding substance and the mass of the dry air. Hence: x\_{WV} = m\_{WV}/m\_{Air}, x\_{CO2} = m\_{CO2}/m\_{Air}, x\_{H2O} = m\_{H2O}/m\_{Air}.** 

Table I	! - Input	and out	put variable	es for a	volume with	air, '	water vap	or and	$CO_2$
				~			1		_

input variables	output variables
temperature	pressure
mass flow of air	density
water vapor content	temperature
$CO_2$ content	mass of air
water content	water vapor content
	$CO_2$ content
	water content

The pressure inside the volume has to be separated into the **partial pressures** of dry air, water vapor and  $CO_2$ .

The gas constants R and specific heat capacities  $c_p$  of these different gases are taken from [13] (valid under standard conditions):

 $R^{Air} = 287.058 \text{ J/(kgK)}, \qquad R^{WV} = 461.523 \text{ J/(kgK)}, \qquad R^{CO2} = 188.924 \text{ J/(kgK)}, \\ c_p^{Air} = 1005 \text{ J/(kgK)}, \qquad c_p^{WV} = 1870 \text{ J/(kgK)} \text{ and } \qquad c_p^{CO2} = 830 \text{ J/(kgK)}.$ 

In the case of **condensation** the gas has a gain of enthalpie  $\Delta h_C$ , in the case of **evapora**tion there is a loss of enthalpie  $\Delta h_E$  inside the water. The specific enthalpies of condensation  $\Delta h_C$  and evaporation  $\Delta h_E$  have the same value and are only functions of the temperature. Inside a wet gas an amount of latent heat is stored.

- During the phase change: gas  $\rightarrow$  liquid (condensation) the energy  $m_C \Delta h_C$  ( $m_C$ : mass of condensed water) is released. Therefore the temperature of the gas in a closed adiabatic system increases.
- During the phase change: liquid  $\rightarrow$  gas (evaporation) the free water has to enrage the energy  $m_E \Delta h_E$  ( $m_E$ : mass of evaporated water) and the temperature in a closed adiabatic system decreases.
- *Eq.* 5 considers *condensation*: Mixing is thought of consisting of two independent and consecutive steps:
  - <u>Step 1</u>: Mixing of constituents without condensation. The resulting temperature is T.

Constituents:  $m_{Air}$ ,  $m_{WV}$ ,  $m_{CO2}$ ,  $m_{H2O}$ .

• <u>Step 2</u>: Instantaneously condensation or evaporation.

The resulting temperature is T' > T

Constituents:  $m_{Air}$ ,  $m_{WV}' = m_{WV}^{S}(T')$ ,  $m_{CO2}$ ,  $m_{H2O}' = m_{H2O} + (m_{WV} - m_{WV}^{S}(T'))$ 

$$\underbrace{\left(m_{Air} c_{p}^{Air} + m_{WV} c_{p}^{WV} + m_{CO2} c_{p}^{CO2}\right)T}_{\text{term 1}} + \underbrace{m_{H2O} c^{H2O} T}_{\text{term 2}} = \underbrace{\left(m_{Air} c_{p}^{Air} + m_{WV}^{S}(T') c_{p}^{WV} + m_{CO2} c_{p}^{CO2}\right)T'}_{\text{term 3}} - \underbrace{\left(m_{WV} - m_{WV}^{S}(T')\right)\Delta h_{C}}_{\text{term 4}} + \underbrace{m_{H2O} c^{H2O} T'}_{\text{term 4}} + \underbrace{m_{H2O} c^{H2O} T'}_{\text{term 5}} + \underbrace{m_{H2O} c^{H2$$

**Term 1** is the enthalpy of the gas after step 1 (mixing).

**Term 2** is the enthalpy of the liquid or frozen water after step 1 (mixing).

For liquid water the specific heat is  $c^{H2O} = 4183 \text{ J/(kg K)}$ .

For frozen water the specific heat is  $c^{H2O} = 2060 \text{ J/(kg/K)}$ .

Term 3 is the enthalpy of the gas after step 2 (condensation).

The temperature of the gas mixture has risen to T'.

Term 4 is the condensation heat.

In good approximation  $\Delta h_C$  is set to the value of 2500000 J/kg.

Term 5 is the enthalpy of the liquid or frozen water after step 2 (condensation.)

• Eq. 5 cannot be solved analytically. Only a numerical solution for a given parameter set can be calculated. An iterative setup has to be chosen (see Eq. 6)

Estimation : 
$$T' = T$$
  
 $T_0' \rightarrow m_{WV}^{\ S}(T_0') \xrightarrow{\text{Eq.5}} T_1' \rightarrow m_{WV}^{\ S}(T_1') \xrightarrow{\text{Eq.5}} T_2' \rightarrow \dots$ 
(6)

This loop is executed until a certain break condition is satisfied.

• For the *evaporation* process an analogous enthalpy equation can be derived.

#### 3.6 The Generalized Resistance

Flow resistances fix the flow properties in the network. These resistance elements are always linked to a block, which has a defined pressure, density and temperature. The occurrence of a pressure drop  $\Delta p$  in the resistance elements involves a certain mass flows  $\dot{m}$ . The enthalpy flow is defined by a mass flows  $\dot{m}$ , the temperature *T* and the specific heat of the transported gas mixture. The input respectively output values are shown in *Table 2*.

Table 2 - Input and output variables for a flow resistance

input variables	output variables
pressure	pressure
density	density
temperature	temperature
water vapor content	mass flow air
$CO_2$ content	flow velocity
water content	water vapor content
	$CO_2$ content
	water content

The **mass flows**  $\dot{m}$  is calculated from the average flow velocity v. The density  $\rho_{FR}$  of the flow resistance is assumed to remain constant over the whole length of the flow resistance. Therefore Eq. 7 is limited to systems with incompressible flow properties.

$$\dot{m}(t) = A \rho_{FR}(t) v(t) \tag{7}$$

The average flow velocity v is caused by a pressure drop  $\Delta p$  at the apertures that pushes the gas through the flow component with a cross section A.

$$v(t) = \sqrt{\left|\Delta p(t)\right| \frac{2}{\rho_{FR}} \frac{1}{\zeta_G(\operatorname{Re}(t))}}$$
(8)

The average velocity v is dependent on the **minor loss coefficient**  $\zeta_G$ .  $\zeta_G$  can be divided into the friction coefficient  $\lambda(Re(t))$  of the flow and into a minor loss coefficient  $\zeta$  related to the design of the flow element (see Eq. 9). D is the diameter and L the length of the flow element, assuming that the profile is circular. [14] [15]

$$\zeta_G(\operatorname{Re}(t)) = \frac{L}{D} \lambda(\operatorname{Re}(t)) + \zeta$$
(9)

The developed flow model is able to simulate a continuous transition between laminar and turbulent flow. The **friction coefficient**  $\lambda$ (Re) is given in [14] as

laminar flow : 
$$\lambda(\text{Re}) = \frac{64}{\text{Re}}$$
,  $\text{Re} \le 2320$   
turbulent flow :  $\lambda(\text{Re}) = 0.3164 \cdot \text{Re}^{-0.25}$ ,  $\text{Re} > 2320$  . (10)  
mixed flow :  $\lambda(\text{Re}) = \begin{cases} \frac{64}{\text{Re}} , \text{Re} \le 1187.384382 \\ 0.3164 \cdot \text{Re}^{-0.25} , \text{Re} > 1187.384382 \end{cases}$ 

The **Reynolds number** Re depends on the average velocity v.  $\eta$  is the average dynamic viscosity of the air mixture.

$$\operatorname{Re}(t) = \frac{v(t) D \rho(t)}{\eta}$$
(11)

The fact, that the average flow velocity v is a function of the Reynolds number Re (see Eq. 8 and 9) but Re is also a function of v (see Eq. 11) requires an **iterative solution**:

Estimation : 
$$v_0$$
  
 $v_o \rightarrow \operatorname{Re}_0 \rightarrow v_1 \rightarrow \operatorname{Re}_1 \rightarrow \dots$ 
(12)

This loop is executed until a certain break condition is satisfied.

Under special conditions in a general flow resistance also compressible flow properties have to be assumed. With the assumption that adiabatic compression respectively adiabatic expansion occurs, the following **compressible mass flow equation** can be used [14] [16].

$$\dot{m} = \frac{A p}{\sqrt{T}} \sqrt{\frac{\gamma}{R}} \operatorname{Ma} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \operatorname{Ma}^{2}\right)^{-\frac{\gamma + 1}{2 \cdot (\gamma - 1)}}$$
(13)

The Mach number Ma is estimated for a given pressure drop by the incompressible flow equation Eq. 9 and Ma = v a with  $a = \sqrt{\gamma R T}$  the speed of sound ( $\overline{R}$ : average gas constant). The pressure and the temperature are taken from neighboring blocks. The specific heat ratio  $c_p/c_V$  is called  $\gamma$ .

#### 3.7 Heat Transfer Modeling

Heat transfer units play an important part inside the heat exchangers of an air conditioning system. Three different heat transfer processes can be distinguished: conduction, convection and radiation of heat.

The heat transfer rates for heat **conduction** with a thermal conductivity  $\alpha$  [J/(s·m·K)] is expressed by *Eq. 14*. *A* is the effective surface via which the heat transfer takes place. The thickness of the wall is *b*.

$$\dot{Q}^{Cond} = \alpha A \frac{T_1 - T_2}{b} \tag{14}$$

The **radiation** process with the Stefan-Boltzmann constant  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ J/(s \cdot m^2 \cdot K)}$ and the emissivity  $\varepsilon$ ,  $0 \le \varepsilon \le 1$  can be expressed by Eq. 15.

$$\dot{Q}^{Rad} = \varepsilon \,\sigma \,A \left(T_{S}^{4} - T^{4}\right) \tag{15}$$

Equations 13 and 14 can be embedded in quasi-steady model blocks.

**Convection** can be described by a convection heat transfer coefficient  $\lambda$  [J/(s·m<sup>2</sup>·K)]. The heat is transferred from a medium with the temperature  $T_1$  to a surface A with temperature  $T_S$  and back from the surface to a medium with a temperature  $T_2$ . The heat transfer rates can be expressed by

$$\dot{Q}^{Conv,1} = \lambda A (T_s - T_1) 
\dot{Q}^{Conv,2} = \lambda A (T_s - T_2)$$
(16)

*Equations 15* have to be embedded in a dynamic model block, because a dynamic state equation for the temperature  $T_s$  has to be solved.

#### 3.8 Example Simulations

With help of Subchapter 3.7 a set of different model blocks can be created. Each model block is saved within the FLECS database (see *Figure 3*, Database). From this database a set of model blocks can be chosen and a simulation can be built up. The mode of action will be discussed by means of two simulations.

In *Figure 3* a simulation of a **dynamic heat exchanger** is shown. The heat exchange consists of two volume blocks and a heat transfer unit. A constant mass flow (1 kg/s) enters respectively leaves the system. The cold side works with a temperature of 293.15 K and the hot side is set to a temperature of 373.15 K. An input mask fixes all the important parameters of the different blocks. A scope window can observe the results. The dynamic of the output temperature (see *Figure 3*, Result) is only given by the heat transfer via the conduction heat

transfer unit. In the case of maximum heat transfer efficiency the output temperature is the average between the cold and the hot side, knowing that a constant enthalpy flow enters the system and both mass flows are equal. For the chosen parameter set the heat transfer efficiency is much lower than 100%. The example given here neglects any thermal capacities of the heat exchanger wall material, usually dominating the dynamics of the heat transfer process. With the fully developed library this could be added easily.



*Figure 3 - The FLECS database and a simulation of a dynamic heat exchanger* 

A highly dynamic enthalpy flow system is shown in *Figure 4*. During such simulation the stability and the dynamic performance of the developed model blocks can be checked. The shown T-joint is composed as a combination of volume elements and flow resistances. Via the output a constant mass flow (1 kg/s) leaves the system. The pressure at the input rises up within 2 s from 320000 Pa to 650000 Pa (see *Figure 4*, right graph, black curve). As a result the gas mixture inside the system is compressed by the pressure wave. After the pressure has reached the maximum value, the pressure falls back within 2 s to a value of 280000 Pa. As a consequence the gas is able to expand. A mass flow curve moves through the system of the form shown in *Figure 4*, *right graph*, *red curve*. One output of the T-joint is closed by an end piece. The mass flow inside the end piece is shown in *Figure 4*, *left graph*, *red curve*. In the time range marked with a blue circle the mass flow changes the sign. The occurrence of small mass flows normally causes instabilities during a simulation. The model blocks used are optimized so that such systems are stable, independently of what kind of solver type is used.

In order to check of the dynamic behavior of the model blocks, the output temperature is compared with the temperature curve of a Flowmaster [17] Simulation (*Figure 5*). The setup of the simulation within the two programs is comparable. In contrast to the integration



of differential equations in the FLECS/Simulink model blocks, Flowmaster uses the hydraulic transient analysis method [18].

Figure 4 – Simulation of a dynamic enthalpy flow system



Figure 5 – Comparison of the output temperature of a simulation with the FLECS model blocks (red curve) and a Flowmaster simulation (black curve)

## 4 SOFTWARE ARCHITECTURE AND GRAPHICAL USER INTERFACE

#### 4.1 Save-Restore-Init Functionality

In order to provide the user with the necessary convenience for every-day use, one has to provide easy ways to both save the simulation's states in a file at any time as well as load saved states from a file into a simulation. It is possible to save different levels of detail (*Figure 6, left*):

- only initialization parameters
- the technically relevant values/states
- every value in the whole model, down to internal variables.

The user may want to save a simulation state with different intentions:

- to get a simple snapshot for documentation or analysis
- to save the initial parameters for further configurations of this or similar models
- to save the model's variables when the simulation has reached a steady state (these values can later be used as a starting point for further simulations, e.g. to avoid the system's settling time, for comparison of simulation results after small changes)
- to save the complete simulation state to be able to interrupt the simulation at any time and restart later from the current state.

As a Simulink model is a strictly hierarchical and self-descriptive construct. So it is possible to store all information within this model in a structurally identical MATLAB structure (struct). This is a bijective mapping, so it is easily possible to re-load the data set to reproduce the simulation's state. Additionally, the data can be saved in MATLAB's own binary data format (MAT-file). Thus, it can also be accessed externally via MATLAB, or it may be converted into another data format using MATLAB's internal converters for access in other programs. It is important that the mapping algorithm is flexible and robust enough to cope with differences in the model structure during the loading process. Only those parts of the data tree are updated that are identical in structure and path, all other will be left untouched. Thus, the user can use a data file generated with one model and use it to initialize a second, modified model.

## 4.2 Convenient Library Use in Different Scenarios

Three scenarios are implemented for the use of FLECS. Running a simulation ...

- ... on a desktop computer, e.g. during model development
- ... on a desktop computer, but with higher performance requirements
- ... in a real-time environment (HIL)

**The first requirement** is the standard way to use a MATLAB/Simulink model, so no limitations result here.

**The second requirement** was met by choosing MATLAB's "rapid simulation target" (RST). This compilation target is performance optimized, but is still running on a desktop computer (that is, not in the HIL environment). GUI access to the simulation is still available within the RST.

**The third requirement** is the strictest; it defined the requirements for the complete library development. All coding uses only elements that can be compiled into a HIL target without limitations. Especially we allowed only embedded MATLAB code blocks within the FLECS library.

## 4.3 User Maintainability and User Extendibility

In order to allow the user to not only use but also maintain and modify the FLECS, the user's competences was estimated and the languages and techniques used for coding were limited to those known at the user's site. An automatic documentation system (MATLAB Report Generator) was implemented that keeps the documentation up-to-date with little effort.

## 4.4 Development of Different GUIs

GUI controls had to be developed for 3 types of usage:

1. Simulation controls

- 2. Simulation of crew interaction
- 3. Visualization of the temperature distribution in the cabin

**Type 1:** A GUI was developed that allowed access to central control features of a FLECS library model: e.g. initialization, simulation controls, call of models, save functionalities (*Figure 6, left*). The GUI also features a scrollable logging area as well as a status line.

**Type 2**: The GUI mimics the hardware user interface in the plane's cockpit (*Figure 6, right*). As the elements of MATLAB's GUI Development Environment (GUIDE) extension are limited, functionally equivalent elements are chosen, e.g. replacing knobs by sliders.

**Type 3**: A simplified sketch of a longitudinal fuselage cross section is shown with color coded temperature distribution. This is mainly for demonstration purposes and for general tests. No extended user input functionality is present here.

	flecs_cpt_gui	_ 🗆 🛛
	AIR COND	
🛃 flecs_main_gui		HOT AIR
Init Pause Cockpit Simulation Time (s)	COCKPIT FWD CABIN AFT CABIN	PACK 2
Stop Set Init New Scope Show model Clear Msg.	OFF	OFF
Messages	CARGO HEAT	
FLECS Central GUI	FWD ISOL VALVE OK OFF COLD	FT ISOL VALVE
Status-		
Static Text	VENTILATION	
	BLOWER BKTRACT OK OK OVRD AUTO	OK OFF

*Figure 6 - The FLECS central simulation control panel (left) and the simplified human machine interface (right)* 

#### 4.5 **Optimization of Simulation Performance**

Future work is planed on an optimisation of simulation performance in the HIL scenario. Big simulation models can tend to become numerically unstable when they run with a variable step solver. A fix step solver, however, may be too slow with the necessary small step size. The fastest sub-model dictates the step size. The solution of the problem consists of running two different sub-models with different solvers. This approach is supported in Simulink.

### **5 SUMMARY**

The FLECS database contains generic standard components as well as specialized and detailed aircraft ECS components modeled with MATLAB/Simulink. Algorithms of these blocks are defined in the most general way and are based on equations from thermodynamics. Heat and mass flow systems in a network structure can be simulated. The paper presented systems consisting of volume elements and flow resistances.

Two different simulation setups are discussed: 1.) A dynamical simulation of a heat exchanger shows the interaction of different block types and can be used as example for a crosslinked heat transfer and flow system. 2.) The dynamics and the numerical stability are checked with a simulation of a T-joint, which is exposed to a steep pressure increase. The result of this simulation is in good agreement with a solution from Flowmaster.

Within the FLECS database an input mask defines each model block. A central GUI that ensures convenient save-restore-init functionality can control the overall simulation. In additional a human machine interface is built, which enhances the user-friendliness of the simulation database.

#### **6 REFERENCES**

- [1] SCHOLZ, Dieter: Aircraft Systems. In: DAVIES, Mark: *The Standard Handbook for Aeronautical and Astronautical Engineers*. New York : McGraw-Hill, 2003
- [2] WESSELING, Pieter: *Principles of Computational Fluid Dynamics*. Springer : Berlin, 2000
- [3] SCHOLZ, Dieter: FLECS Funktionale Modellbibliothek des Environment Control System. HWF: Workshop der Initiative Luftfahrtstandort Hamburg (Hamburg, 26th January 2006). Presentation, Hamburg, 06-01-26. - URL: http://FLECS.ProfScholz.de
- [4] URL: http://www.mathworks.com/products/matlab/description1.html (2007-01-12)
- [5] URL: http://www.mathworks.com/products/simulink/description1.html (2007-01-12)
- [6] URL: http://FLECS.ProfScholz.de (2007-01-12)
- [7] SCHOLZ, Dieter: FLECS Funktionale Modellbibliothek des Environment Control System. In: *mobiles*. Dep. of Automotive and Aeronautical Engineering, Hamburg University of Applied Sciences, 2005, p. 113
- [8] WERNER, Tom: *Literaturrecherche : Verfahren und Programme zur Berechnung von Luftsystemen*, Dep. of Automotive and Aeronautical Engineering, Hamburg University of Applied Sciences, 2006. URL: http://bibliothek.ProfScholz.de
- [9] OEHLER, Bettina: Modeling and Simulation of Global Thermal and Fluid Effects in an Aircraft Fuselage. In: SCHMITZ, G. (Ed.): 4th International Modelica Conference (Hamburg University of Technology 2005). Hamburg : TUHH, Department of Thermodynamics, pp. 497-506
- [10] ZIEGLER, Shayne; SHAPIRO, Steven: FLOWMASTER : Computer Simula-tion of an Aircraft Environmental Control System. UKIP MEDIA & EVENTS: Aerospace Testing Expo 2006 (Anaheim, California, 8th-10th November 2005). – A presentation from the company Flowmaster USA Inc.
- [11] HE, Jun; ZHAO, Jing-quan: Dynamic Simulation of the Aircraft Environ-mental Control System. In: *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 14 (2001), No. 3, pp. 129-133
- [12] URL: http://de.wikipedia.org/wiki/V-Modell (2007-01-12)
- [13] TAUSCH, Michael; VON WACHTENDONK, Magdalene: Chemie SII: Stoff Formel Umwelt. Bamberg: Buchners, 1993
- [14] BOHL, Willi: Technische Strömungslehre : Stoffeigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen, Hydrostatik, Aerostatik, Inkompressible Strömungen, Kompressible Strömungen, Strömungsmeßtechnik. Würzburg : Vogel, 2005
- [15] BÖSWIRTH, Leopold: Technische Strömungslehre. Wiesbaden : Vieweg, 2005
- [16] URL: http://www.lerc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/mflchk.html (2007-01-12)
- [17] URL: http://www.flowmaster.com/flowmaster/index.html (2007-01-12)
- [18] WYLIE, E. B.; STREETER, V. L.: *Fluid Transients in Systems*. Englewood : Prentice Hall, 1993