



## Schlussbericht

### FH3-Projekt "Grüner Frachter"

Entwurfsuntersuchungen zu umweltfreundlichen und kosteneffektiven Frachtflugzeugen mit unkonventioneller Konfiguration

Zuwendungsgeber: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  
Projektträger: Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen  
"Otto von Guericke" e.V. (AiF)  
FKZ: 1710X06  
Laufzeit: 1. Sept. 2006 – 30. Apr. 2010

Dieter Scholz, Kolja Seeckt

30. April 2010

**Prof. Dr.-Ing. Dieter Scholz, MSME**

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau  
Aero - Aircraft Design and Systems Group  
Berliner Tor 9  
20099 Hamburg

Tel.: 040 / 42875 - 8825  
Fax: 040 / 42875 - 8829  
E-Mail: [info@ProfScholz.de](mailto:info@ProfScholz.de)

**Dipl.-Ing. Kolja Seeckt**

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau  
Aero - Aircraft Design and Systems Group  
Berliner Tor 9  
20099 Hamburg

Tel.: 040 / 428 75 – 88 27  
Fax: 040 / 428 75 – 88 29  
E-Mail: [kolja.seeckt@haw-hamburg.de](mailto:kolja.seeckt@haw-hamburg.de)

## Dokumentationsblatt

<b>1. Berichts-Nr.</b> GF_WT0.1_AB	<b>2. Auftrags-titel</b> Grüner Frachter (Entwurfsuntersuchungen zu umweltfreundlichen und kosteneffektiven Frachtflugzeugen mit unkonventioneller Konfiguration)	<b>3. ISSN / ISBN</b> ---
<b>4. Sachtitel und Untertitel</b> Schlussbericht FH3-Projekt "Grüner Frachter"		<b>5. Abschlussdatum</b> 2010-04-30
		<b>6. Ber. Nr. Auftragnehmer</b> GF_WT0.1_AB
<b>7. Autor(en) (Vorname, Name)</b> Dieter Scholz (info@ProfScholz.de) Kolja Seeckt (kolja.seeckt@haw-hamburg.de)		<b>8. Vertragskennzeichen</b> 1710X06
		<b>9. Projektnummer</b> FBMBS06-004
<b>10. Durchführende Institution (Name, Anschrift)</b> Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW) Fakultät Technik und Informatik Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau Aero - Aircraft Design and Systems Group Berliner Tor 9 D - 20099 Hamburg		<b>11. Berichtsart</b> Schlussbericht
		<b>12. Berichtszeitraum</b> 01.09.2006 - 30.04.2010
		<b>13. Seitenzahl</b> 80, plus Anhänge: 144
<b>14. Fördernde Institution / Projektträger (Name, Anschrift)</b> Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Heinemannstraße 2, 53175 Bonn - Bad Godesberg  Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) Bayenthalgürtel 23, 50968 Köln		<b>15. Literaturangaben</b> 159
		<b>16. Tabellen</b> 8
		<b>17. Bilder</b> 17
<b>18. Zusätzliche Angaben</b> Sprache: Deutsch; URL: <a href="http://GF.ProfScholz.de">http://GF.ProfScholz.de</a>		
<b>19. Kurzfassung</b> Wasserstoff wird als Energieträger auch nach dem Ende der fossilen Energieträger noch vorhanden sein. Wasserstoff als Kraftstoff in der Luftfahrt erfordert aber neue oder modifizierte Flugzeuge um das größere Tankvolumen aufzunehmen. Untersucht wurden mit Wasserstoff betriebene Regionalfrachtflugzeuge und Langstreckenfrachtflugzeuge auch in Blended Wing Body Konfiguration im Vergleich mit herkömmlichen Flugzeugversionen. Die neuen Flugzeuge sind etwas teurer in den Betriebskosten (bei energie-äquivalentem Kraftstoffpreis) sind aber umweltverträglicher. Ein Umstieg der Luftfahrt in die Wasserstofftechnologie muss eher heute als morgen beginnen, ansonsten werden die fossilen Kraftstoffe verbraucht sein, bevor der Umstieg gelungen ist.		
<b>20. Deskriptoren / Schlagwörter</b> Flugzeug, Flugzeugentwurf, unkonventionell, Konfiguration, Fracht, Frachtflugzeug, umweltfreundlich, Wasserstoff, Blended Wing Body		
<b>21. Bezugsquelle</b> HAW Hamburg, Dep. F&F, Aero, Berliner Tor 9, D - 20099 Hamburg		
<b>22. Sicherheitsvermerk</b> öffentlich - unbegrenzt	<b>23.</b>	<b>24. Preis</b>

## Report Documentation Page

<b>1. Report-Number</b> GF_WT0.1_AB	<b>2. Project Title</b> Green Freighter (Design Evaluation of Environmentally Friendly and Cost Effective Freighters with Unconventional Configuration)	<b>3. ISSN / ISBN</b> ---
<b>4. Title and Subtitle</b> Final Report FH3 Project "Green Freighter"		<b>5. Report Date</b> 2010-04-30
<b>7. Author(s) (First Name, Last Name)</b> Dieter Scholz (info@ProfScholz.de) Kolja Seeckt (kolja.seeckt@haw-hamburg.de)		<b>6. Performing Org. Rep. No</b> GF_WT0.1_AB
<b>10. Performing Agency (Name, Address)</b> Hamburg University of Applied Sciences (HAW) Faculty of Engineering and Computer Science Department of Automotive and Aeronautical Engineering Aero - Aircraft Design and Systems Group Berliner Tor 9 D - 20099 Hamburg		<b>8. Contract Code</b> 1710X06
<b>14. Sponsoring / Monitoring Agency (Name, Address)</b> Federal Ministry of Education and Research (BMBF) Heinemannstraße 2, D - 53175 Bonn - Bad Godesberg  Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) Bayenthalgürtel 23, D - 50968 Köln		<b>9. Project Number</b> FBMBS06-004
<b>18. Supplementary Notes</b> Language: German; URL: <a href="http://GF.ProfScholz.de">http://GF.ProfScholz.de</a>		<b>11. Report Type</b> Final Report
<b>19. Abstract</b> Hydrogen will be available as energy carrier even when fossil fuels have been depleted. Hydrogen as aviation fuel requires new or modified aircraft to adapt to the necessary larger fuel tanks. Hydrogen powered regional freighter aircraft and long range freighter aircraft also in blended wing body configuration have been investigated and compared against conventional aircraft. The new aircraft show higher operating costs (assuming an energy-equivalent fuel price) but are more environment friendly. A shift from kerosine to hydrogen in aviation needs to start rather today than tomorrow. Otherwise fossil fuel could be depleted before the shift has been accomplished.		<b>12. Time Period</b> 2006-09-01 – 2010-04-30
<b>20. Subject Terms</b> aircraft, design, unconventional, configuration, cargo, freighter, environment, costs, fuel, hydrogen, blended wing body		<b>13. Number of Pages</b> 80, plus appendices 144
<b>21. Distribution</b> HAW Hamburg, Dep. F&F, Aero, Berliner Tor 9, D - 20099 Hamburg		<b>15. Number of References</b> 159
<b>22. Classification / Availability</b> unclassified - unlimited	<b>23.</b>	<b>16. Number of Tables</b> 8
		<b>17. Number of Figures</b> 17
		<b>24. Price</b>

# Inhalt

	Seite
Verzeichnis der Bilder .....	7
Verzeichnis der Tabellen .....	8
Liste der Abkürzungen .....	9
<b>1 Einführung</b> .....	<b>10</b>
1.1 Projektdaten .....	10
1.2 Aufgabenstellung .....	11
1.3 Voraussetzungen .....	11
1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	12
1.5 Wissenschaftlich/technischer Stand zu Beginn des Vorhabens .....	18
1.5.1 Allgemein .....	18
1.5.2 Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens genutzt wurden .....	21
1.5.3 Verwendete Fachliteratur .....	24
1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	25
<b>2 Eingehende Darstellung des Projekts</b> .....	<b>28</b>
2.1 Erzielte Ergebnisse .....	28
2.1.1 Übersicht .....	28
2.1.2 Erweiterung der verwendeten Methoden und Werkzeuge .....	36
2.1.3 Technische Ergebnisse – Regionalfrachtflugzeuge in konventioneller Bauweise .....	40
2.1.4 Technische Ergebnisse – Langstreckenfrachtflugzeuge in konventioneller und unkonventioneller Bauweise .....	45
2.2 Verwendung der Zuwendung .....	51
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	52
2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit .....	53
2.5 Fortschritte bei anderen Stellen .....	55
<b>3 Zusammenfassung</b> .....	<b>57</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>61</b>

## **Anhänge nur in der gedruckten Version des Schlussberichtes**

<b>Anhang A</b> Veröffentlichung „Jet versus Prop, Hydrogen versus Kerosene for a Regional Freighter Aircraft“ .....	81
<b>Anhang B</b> Veröffentlichung „Gesamtentwurfsuntersuchungen zu BWB-Frachtflugzeugen mit alternativen Treibstoffen“ .....	94
<b>Anhang C</b> Veröffentlichung „Mitigating the Climate Impact of Aviation – What does Hydrogen Hold in Prospect?“ .....	108
<b>Anhang D</b> Veröffentlichung „Application of the Aircraft Preliminary Sizing Tool PreSTo to Kerosene and Liquid Hydrogen Fueled Regional Freighter Aircraft“ .....	119
<b>Anhang E</b> Veröffentlichung „Hydrogen Powered Freighter Aircraft – The Final Results of the Green Freighter Project“ .....	132

## Verzeichnis der Bilder

<b>Bild 1.1</b>	Balkenplan und Meilensteine .....	16
<b>Bild 1.2</b>	Boeing/NASA X-48B .....	19
<b>Bild 1.3</b>	Geometrie des Propellertriebwerkmodells des Referenzflugzeugs ATR72 .....	22
<b>Bild 1.4</b>	Geometrie des Jet-Triebwerkmodells des Referenzflugzeugs Boeing B777 .....	23
<b>Bild 1.5</b>	Beispiel einer Wasserstoffsystemarchitektur .....	23
<b>Bild 2.1</b>	Variationsmöglichkeiten des Triebwerksarrangements in PrADO .....	37
<b>Bild 2.2</b>	Variationsmöglichkeiten des Arrangements von Kryotanks in PrADO .....	37
<b>Bild 2.3</b>	PreSTo-Benutzeroberfläche (Dimensionierung, Propellerflugzeug) .....	39
<b>Bild 2.4</b>	PreSTo-Benutzeroberfläche (Rumpfgestaltung, Entwicklungsstand: Ende April 2010) .....	39
<b>Bild 2.5</b>	Regionalfrachtflugzeuge: Referenzversion RF00 auf Basis der ATR 72 Full Freight Version .....	41
<b>Bild 2.6</b>	Regionalfrachtflugzeuge: Versionsüberblick .....	42
<b>Bild 2.7</b>	Regionalfrachtflugzeuge: Relativer Vergleich von Wasserstoffvarianten zu Kerosinflugzeug .....	44
<b>Bild 2.8</b>	Langstreckenfrachtflugzeuge: PrADO-Modell der Referenzversion B777F .....	46
<b>Bild 2.9</b>	Langstreckenfrachtflugzeuge: PrADO- Modell des konventionellen Wasserstofffrachtflugzeugs .....	46
<b>Bild 2.10</b>	Langstreckenfrachtflugzeuge: PrADO-Modell der Wasserstoff-BWB-Versionen (bemannt: oben, unbemannt: unten) .....	47
<b>Bild 2.11</b>	Langstreckenfrachtflugzeuge: Relativer Parametervergleich von konventioneller Wasserstoffvariante, Wasserstoff-BWB und unbemanntem Wasserstoff-BWB zu konventionellem Kerosinflugzeug .....	49
<b>Bild 2.12</b>	Langstreckenfrachtflugzeuge: Relative Massevergleiche von konventioneller Wasserstoffvariante, Wasserstoff-BWB und unbemanntem Wasserstoff-BWB zu konventionellem Kerosinflugzeug .....	50

## Verzeichnis der Tabellen

<b>Tabelle 1.1</b>	Im Projekt "Grüner Frachter" erzielte Ergebnisse (Deliverables). Ein Vergleich zwischen Planung und Ausführung .....	17
<b>Tabelle 2.1</b>	Erstellte Dokumente der Projektpartner 2007 .....	30
<b>Tabelle 2.2</b>	Erstellte Dokumente der Projektpartner 2008 .....	31
<b>Tabelle 2.3</b>	Erstellte Dokumente der Projektpartner 2009 .....	32
<b>Tabelle 2.4</b>	Erstellte Dokumente der Projektpartner 2010 .....	34
<b>Tabelle 2.5</b>	Veröffentlichungen der Projektpartner .....	35
<b>Tabelle 2.6</b>	Vorstellungen des Projekts "Der Grüne Frachter" .....	36
<b>Tabelle 2.7</b>	Vorstellungen des Projekts "Der Grüne Frachter" auf Kongressen .....	36



## Liste der Abkürzungen

AEA	Association of European Airlines
AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V.
BWB	Blended-Wing-Body (-Konfiguration)
CEASIOM	Computerised Environment for Aircraft Synthesis and Integrated Optimisation Methods
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
FLECS	Functional Library of the Environmental Control System
FPO	Future Projects Office
GF	Grüner Frachter
GUI	Graphical User Interface
HAW	Hochschule für Angewandte Wissenschaften
ICAS	International Council of the Aeronautical Sciences
IFL	Institut für Flugzeugbau und Leichtbau
KMU	Kleines/mittleres Unternehmen
KTH	Kungliga Tekniska Höskolan (Stockholm) – Königlich Technische Hochschule Stockholm – Royal Institute of Technology
LH2	Flüssigwasserstoff
LTH	Luftfahrttechnisches Handbuch
PrADO	Preliminary Aircraft Design and Optimisation programme
SimSAC	Simulating Aircraft Stability And Control Characteristics for Use in Conceptual Design
TUBS	Technische Universität Braunschweig
UHC	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe (Unburned Hydrocarbons)
WP	Work Package
WT	Work Task

# 1 Einführung

## 1.1 Projektdaten

**FH3-Programm:**

Angewandte Forschung an Fachhochschulen im Verbund mit der Wirtschaft

**Projektträger:**

Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF)

**Titel:**

Entwurfsuntersuchungen zu umweltfreundlichen und kosteneffektiven Frachtflugzeugen mit unkonventioneller Konfiguration

**Kurztitel:**

Grüner Frachter

**Homepage:**

<http://GF.ProfScholz.de>

**Kooperationspartner:**

- Technische Universität Braunschweig  
Institut für Flugzeugbau und Leichtbau (IFL)  
Herrmann-Blenk-Str. 35, 38108 Braunschweig
- Airbus Deutschland GmbH (Future Projects Office)  
Kreetslag 10, 21129 Hamburg
- Bishop GmbH – Aeronautical Engineers (KMU)  
Blankeneser Bahnhofstr. 12, 22587 Hamburg

**Name der antragstellenden Hochschule:**

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg)

**Name des zuständigen Projektleiters:**

Prof. Dr.-Ing. Dieter Scholz, MSME

**Laufzeit des Vorhabens:**

01.09.2006 bis 30.04.2010

**Antragsumme:**

234559 € (Antragsumme der teilnehmenden Fachhochschule beim Projektträger)

**Finanzieller Anteil der Partner:**

64 % (Bar- und geldwerte Leistungen am Gesamtvolumen)

**Gesamtvolumen des Vorhabens:**

645539 €

## 1.2 Aufgabenstellung

Aufgabe der Projektpartner des Projekts „Der Grüne Frachter“ (GF) war es, konventionelle und unkonventionelle Flugzeuge zu untersuchen, die speziell für den Frachtluftverkehr ausgelegt sind und einen umweltfreundlicheren und preiswerteren Betrieb im Vergleich zu heute eingesetzten Frachtflugzeugen erlauben. Das Vorhaben sollte als Ergebnisse quantitative Aussagen über die Vor- und Nachteile dieser neuen Flugzeuge liefern. Damit sollten die Grundlagen für zukünftige Luftfahrtprojekte gelegt werden.

Gleichzeitig sollte das Vorhaben den Aufbau eines Forschungsnetzwerkes zwischen Flugzeughersteller, Hochschulen und KMU fördern. Im Verbund sollten die Fähigkeiten der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg) in der Forschung auf dem Gebiet des Flugzeugentwurfs gestärkt werden. Dies sollte durch den Aufbau und die Anwendung moderner Entwurfstools erreicht werden. Die gestärkten Fähigkeiten in der Forschung sollten auch in die Lehre an der HAW Hamburg einfließen. Weiterhin sollte ein kleines bis mittleres Unternehmen (KMU) seine Erfahrungen einbringen und an Aufgaben in der Forschung herangeführt werden.

## 1.3 Voraussetzungen

**Voraussetzungen an der HAW Hamburg**

Projektleiter Prof. Dr.-Ing. Dieter Scholz, MSME der HAW Hamburg verfügte bei Projektbeginn über Forschungserfahrung aus dem vorhergehenden Forschungsprojekt FLECS (**Scholz 2009**). Forschungsschwerpunkte von Prof. Scholz waren und sind Auslegungsrechnungen und Simulationen in den Bereichen Flugzeugsysteme und Flugzeugentwurf. In beiden Bereichen verfügte Prof. Scholz darüber hinaus bereits bei Projektbeginn über mehrjährige Lehrerfahrung an der HAW Hamburg. Im Rahmen dieser Lehrveranstaltung wurde von Prof. Scholz eine Tabellenkalkulation für die Dimensionierung von Flugzeugentwürfen erstellt, welche während des Vorhabens „Der Grüne Frachter“ erweitert werden sollte.

### **Voraussetzungen im Airbus Future Projects Office**

Das Airbus Future Projects Office verfügte als Forschungs- und Entwicklungsabteilung des Flugzeugherstellers Airbus zu Projektbeginn bereits über ausgeprägte anwendungsorientierte Forschungserfahrung in vielfältigen Forschungsgebieten der Luftfahrt – insbesondere auch im Bereich des Flugzeugentwurfs. Hinsichtlich wasserstoffgetriebener Flugzeuge ist insbesondere das europäische Großforschungsprojekt Cryoplane (**Faaß 2001**) zu nennen.

### **Voraussetzungen am Institut für Flugzeugbau und Leichtbau der TU Braunschweig**

Das IFL verfügte zu Projektbeginn über Forschungserfahrung aus diversen Forschungsprojekten im Bereich des Flugzeugentwurfs (**IFL 2010**). Weiterhin war am IFL die über zwei Jahrzehnte selbst entwickelte Flugzeugentwurfssoftware PrADO (Preliminary Aircraft Design and Optimisation programme) (**Heinze 2010**) vorhanden, welche als wichtigstes Entwurfswerkzeug im Projekt „Der Grüne Frachter“ eingesetzt und erweitert wurde.

### **Voraussetzungen in der Bishop GmbH – Aeronautical Engineers**

Der Projektpartner Bishop GmbH verfügte zu Projektbeginn über praktische Erfahrung als Ingenieursdienstleister im Flugzeugbau. Forschungserfahrung bestand zu Projektbeginn nicht.

## **1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens**

### **Planung**

Die inhaltliche Durchführung des Vorhabens war in neun Arbeitspaketen (WPs) geplant:

- WP 1: Anforderungen und Vorauswahl zu untersuchender Entwurfsvarianten
- WP 2: Fracht
  - WT 2.1: Fracht, Frachtkette, Bodenabfertigung
  - WT 2.2: Frachtraumgestaltung
- WP 3: Ein-Mann-Cockpit / unbemannter Frachter
- WP 4: Erweiterung des HAW-Entwurfsverfahrens zur Vorprojektierung im Flugzeugentwurf
- WP 5: Grundlagenuntersuchungen zur Erweiterung des IFL-Entwurfsverfahrens zur integrierten Entwurfsuntersuchung
  - WT 5.1: Flugzeug- und Tankgeometrie

- WT 5.2: Enttankungsmodell
  - WT 5.3: Schwerpunkt-Modell
  - WT 5.4: Erweiterung der Triebwerksmodelle für unkonventionelle Kraftstoffarten
  - WT 5.5: FEM-Untersuchungen zur Strukturauslegung unkonventionellen Konfigurationen
  - WT 5.6: Berechnung der aerodynamischen Eigenschaften von Außentanks
  - WT 5.7: Massemodell für unkonventionelle Tanks
  - WT 5.8: Einflüsse von unkonventionellen Kraftstoffen auf die DOC-Rechnung
- WP 6: Erweiterung des IFL-Entwurfsverfahrens
- WP 7: Vorprojektierung mit dem HAW-Entwurfsverfahren
- WP 8: Integrierte Entwurfsuntersuchung (IFL-Entwurfsverfahren)
- WT 8.1: Kerosin- und LH2-Flugzeuge in konventioneller Bauart
  - WT 8.2: Kerosin- und LH2-Flugzeuge in unkonventioneller Bauart
- WP 9: LH2-Kraftstoffsystem

Den genannten inhaltlichen Arbeitspaketen war ein fortwährendes Arbeitspaket „WP 0“ zu Projektkoordination (HAW Hamburg) und Projektbegleitung (Airbus) übergeordnet. Die Planung des zeitlichen Ablaufs ist in dem der Vorhabensbeschreibung entnommenen Balkenplan (Bild 1.1) dargestellt. Abweichungen von der Planung werden unten unter "Ablauf" beschrieben.

## **Ablauf**

Zum 30. Okt. 2006 konnte Herr Dipl.-Ing. Kolja Seeckt für die inhaltliche Projektarbeit eingestellt werden. Aufgrund eines noch andauernden Beschäftigungsverhältnisses mit einem anderen Arbeitgeber umfasste Herrn Seeckts Arbeitszeit an der HAW während der Zeit vom 30. Okt. 2006 bis zum 30. Nov. 2006 zunächst 10 Stunden pro Woche. Seit dem 1. Dez. 2006 war Herr Seeckt dann in Vollzeit für das Projekt „Grüner Frachter“ angestellt.

Gegenüber der Planung wurde das vollumfängliche Gehalt des Wissenschaften Mitarbeiters daher erst mit 3 Monaten Verspätung ausgegeben. Dies erlaubte dann am Projektende auch eine kostenneutrale Projektverlängerung um sogar 8 Monate. Damit wurde die Laufzeit des Projektes um 5 Monate verlängert, was der sorgfältigen inhaltlichen Arbeit zugute kam.

Die Arbeitspakete dienten auch während des Ablaufs des Projektes als Orientierung, jedoch wurden die zeitlichen Grenzen der Arbeitspakete nicht so streng eingehalten. Gleiches galt für die Ergebnisübergaben an den Meilensteinen. Dies bedeutete nicht immer eine Verspätung. Arbeiten, die erst später im Projekt vorgesehen waren wurden teilweise bereits früher begonnen, wenn die Situation dafür günstig war (z. B. wenn sich ein Student am Thema des Arbeitspaketes interessiert zeigte und mit einem Projekt oder einer Abschlussarbeit aktiv wurde).

In der Vorhabensbeschreibung war detailliert dargelegt welcher Partner am Ende von jedem Arbeitspaket welche Leistungen (Deliverables) erbringen muss. Dies strickt einzufordern stellte sich in der Praxis als unmöglich heraus. Das Projekt nahm daher seine eigene Dynamik an. Die Plan- und Ist-Situation bei den Deliverables ist in Tabelle 1.1 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Deliverables oft in anderer Form erbracht wurden als zunächst geplant. Es gab auch Verschiebungen zwischen den Partnern. Die Industrie hat weniger konkrete (schriftliche) Ergebnisse erbracht als vorgesehen war. Dies wurde von den Hochschulen ausgeglichen, die oft mehr Dokumente produziert haben als geplant war. Ergebnisse wurden oft auch eher in Form von Veröffentlichungen dargestellt (die für eine Promotion zählen) als in internen Berichten. Diese Verschiebung sollte auch im Interesse des öffentlichen Mittelgebers sein, der eine Verbreitung der gewonnenen Erkenntnisse verlangt.

Das **IFL der TU Braunschweig** erbrachte seine Leistung durch die Erstellung von Software, die direkt in das Programmpaket PrADO eingebaut wurde. Die Ergebnisse, die mit PrADO erzielt wurden wurden in zwei sehr umfangreichen Berichten dargestellt. Für den Grünen Frachter wurde nicht - wie ursprünglich vorgesehen - am IFL ein Wissenschaftlicher Mitarbeiter eingestellt. Herr Dr. Heinze nahm sich mit seiner großen Erfahrung dem Projekt selbst an. Auf diese Weise wurden die Arbeiten an und mit PrADO professionell erledigt. Die Finanzierung des Grünen Frachters am IFL übernahm Airbus in der Weise, wie es bereits in der Vorhabensbeschreibung ausgeführt wurde.

An der **HAW Hamburg** ergab sich eine sehr engagierte Einbindung von Studenten. Einige Ergebnisse, die in Form von Technischen Niederschriften vorgesehen waren wurden daher in Form von Projektarbeiten oder Abschlussarbeiten erbracht. Hier hat Herr Seeckt erheblichen Aufwand in die Betreuung der Studenten gesteckt und damit gleichzeitig auch einen Beitrag zur Lehre im Department geliefert. Wie in der Vorhabensbeschreibung in Aussicht gestellt, gelang es auch ein Kooperatives Promotionsverfahren zu starten. Herr Seeckt wurde an der **KTH Stockholm** für eine Promotion zugelassen. Betreuer an der KTH ist Prof. Dr. Arthur Rizzi. Herr Seeckt musste an der KTH Credit Points erbringen. Dazu wurden Projekte aus dem Umfeld des Grünen Frachters definiert. Ein Ergebnis daraus ist:

SEECKT, Kolja: *Aircraft Preliminary Sizing with PreSTo - Re-Design of the Boeing B777-200LR*. KTH Stockholm, Report, 2008

Den Abschluss zum Grünen Frachter im Rahmen der Promotion von Herrn Seeckt stellt die Licentiate Thesis dar:

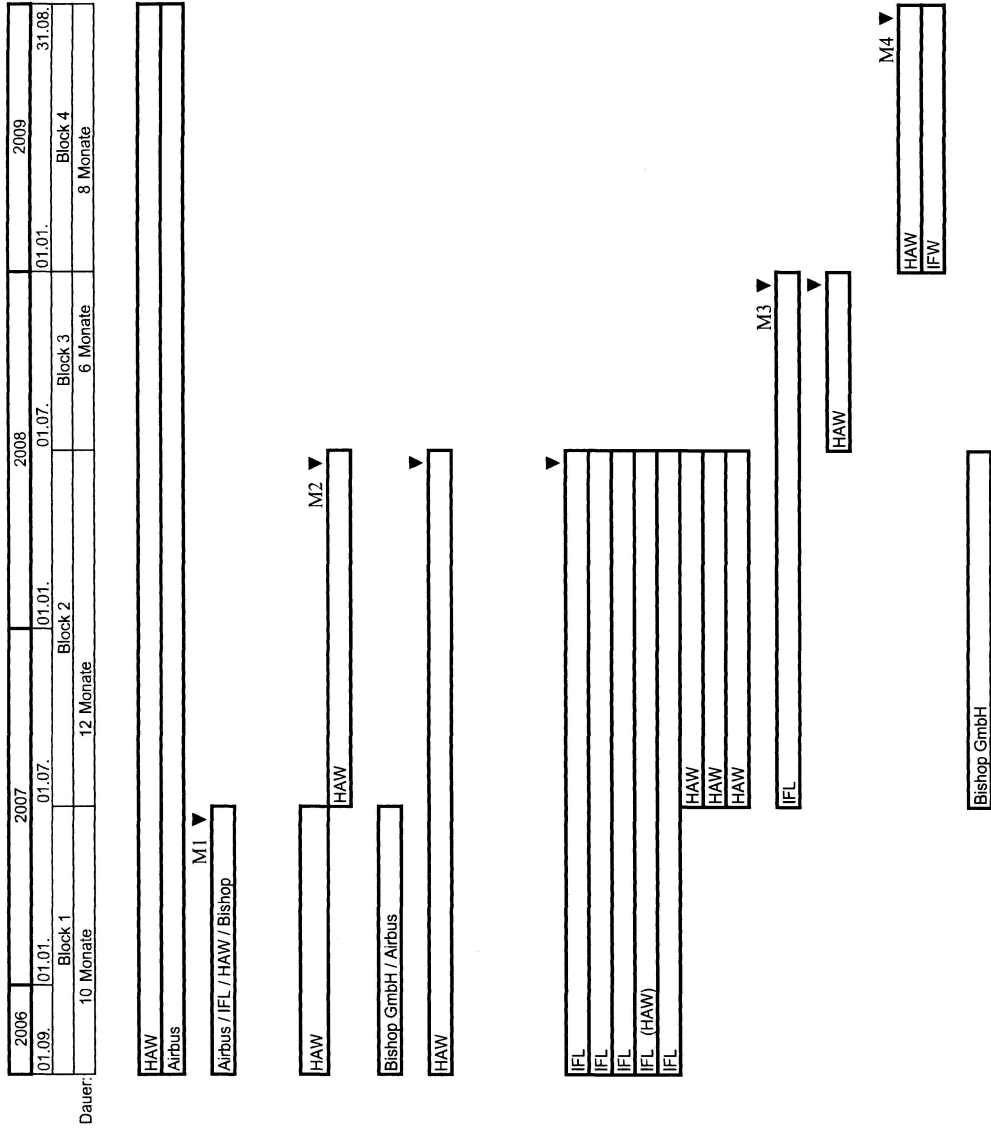
SEECKT, Kolja: *Conceptual Design and Investigation of Hydrogen-Fueled Regional Freighter Aircraft*, KTH Stockholm, Licentiate Thesis, 2010

Beide Arbeiten sind über das Internet zu beziehen:

[http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/Aero/Reports\\_at\\_Aero.html#GF](http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/Aero/Reports_at_Aero.html#GF)

Die **Bishop GmbH** brachte sich ein durch die Finanzierung von Studenten bei Abschlussarbeiten oder bei einem Praktikum. Die Betreuung der Studenten fand oft an der HAW Hamburg statt in einigen Fällen auch in Kooperation mit Airbus.

**Airbus** koordinierte den Grünen Frachter im Rahmen des internen Projektes GEF (Green Environmentally Friendly Freighter). Der Grüne Frachter stellte dabei den Kern von GEF dar. Airbus stellte Daten bereit. Dem Projekt stand der gesamte Datenbestand aus dem alten Cryoplane Projekt offen. Ergebnisse aus diesen alten Studien wurden im Grünen Frachter in Form von Mitteilungen zusammengefasst und in den Entwürfen verarbeitet. Airbus betreute und finanzierte Studenten anderer Hochschulen bei Abschlussarbeiten. Die Studenten bekamen Themen, die dann in den Grünen Frachter einfließen. Auf diese Weise war auch der Kontakt dieser auswärtigen Studenten zur HAW Hamburg sichergestellt.



- WP 0:** Projektkoordination und -begleitung
- WT 0.1:** Projektkoordination: FH3, Grüner Frachter
- WT 0.2:** Projektbegleitung
- WP 1:** Anforderungen und Vorauswahl zu untersuchender Entwurfsvarianten
- WP 2:** Fracht
- WT 2.1:** Fracht, Frachtkette, Bodenabfertigung
- WT 2.2:** Frachtraumgestaltung
- WP 3:** Ein-Mann-Cockpit / unbemannter Frachter
- WP 4:** Erweiterung des HAW-Entwurfsverfahrens zur Vorprojektion im Flugzeugentwurf
- WP 5 Grundlagenuntersuchungen** zur Erweiterung des IFL-Entwurfsverfahrens zur integrierten Entwurfsuntersuchung
  - WT 5.1: Flugzeug- und Tankgeometrie
  - WT 5.2: Entankungsmodell
  - WT 5.3: Schwerpunkt-Modell
  - WT 5.4: Erweiterung der Triebwerksmodelle für unkonventionelle Kraftstoffarten
  - WT 5.5: FEM-Untersuchungen zur Sturkturauslegung unkonventionellen Konfigurationen
  - WT 5.6: Berechnung der aerodynamischen Eigenschaften von Außentanks
  - WT 5.7: Massenmodell für unkonventionelle Tanks
  - WT 5.8: Einflüsse von unkonventionellen Kraftstoffen auf die DOC-Rechnung
- WP 6:** Erweiterung des IFL-Entwurfsverfahrens
- WP 7:** Vorprojektion mit dem HAW-Entwurfsverfahren
- WP 8:** Integrierte Entwurfsuntersuchung (IFL-Entwurfsverfahren)
  - WT 8.1: Kerosin- und LH2-Flugzeuge in konventioneller Bauart
  - WT 8.2: Kerosin- und LH2-Flugzeuge in unkonventioneller Bauart
- WP 9:** LH2-Kraftstoffsystem

**Bild 1.1: Balkenplan und Meilensteine**



Arbeitspaket / Aufgabe	IFL		HAW		Bishop		Airbus	
	Plan	Ist	Plan	Ist	Plan	Ist	Plan	Ist
WP 0: Projektkoordination	-	ZB 07-08 SB 09		ZB 2006, ZB 2007 ZB 2008, ZB2009 SB 2010 V SWAFEA	-		-	Meeting: GEFF 1 GEFF 2
WP 1: Anforderungen und Vorauswahl zu untersuchender Entwurfsvarianten	TN-A	-	TN-A	P Mainzer P Wischhusen TN Seeckt/Scholz V Klima2009	M	-	TN	-
WP 2: Fracht								
WT 2.1: Fracht, Frachtkette, Bodenabfertigung	M	-	TN	P Vrydag (P Malzahn)	-	-	K	TN Böhm
WT 2.2: Frachtraumgestaltung	M	-	TN	(P Ho Buu)	-	-	M	
WP 3: Ein-Mann-Cockpit / unbemannter Frachter	M	-	M	B Zandstra	TN	P Zandstra	K	B Zandstra P Fellechner
WP 4: Erweiterung des HAW-Entwurfsverfahrens	M	-	S, TN	S Seeckt PreSto S Seeckt FTG P,S Coene P,S Godens P,S Luthra P,S Wolf P,S Lenarczyk P,S Pommers (P Schiktanz) (P Geppert) (P Bopp)	-	-	K	-
WP 5 Grundlagenuntersuchungen zur Erweiterung des IFL-Entwurfsverfahrens zur integrierten Entwurfsuntersuchung								
WT 5.1: Flugzeug- und Tankgeometrie	TN	S	M	-	-	-	K	-
WT 5.2: Enttankungsmodell	TN	S	M	-	-	-	K	-
WT 5.3: Schwerpunkt-Modell	TN	S	M	-	-	-	K	-
WT 5.4: Erweiterung der Triebwerksmodelle für unkonventionelle Kraftstoffarten	TN	S	M	P Wolter P Gerber P Wolf	-	-	K	-
WT 5.5: FEM-Untersuchungen zur Sturkturauslegung unkonventionellen Konfigurationen	TN	S	M	-	-	-	K	-
WT 5.6: Berechnung der aerodynamischen Eigenschaften von Außentanks	TN	S	TN	(P Nzukou) P Oehlke (P Bazydlo)	-	-	K	D
WT 5.7: Massemodell für unkonventionelle Tanks	M	S	TN	P Oehlke P,S Bazydlo	-	-	K	-
WT 5.8: Einflüsse von unkonventionellen Kraftstoffen auf die DOC-Rechnung	M	S	TN	B Batal S Seeckt	-	P Batal	K	(D)
WP 6: Erweiterung des IFL-Entwurfsverfahrens	S, TN	S	-	-	-	-	-	-
WP 7: Vorprojektion mit dem HAW-Entwurfsverfahren	M	-	TN	P Lenarczyk TN Seeckt (B777) TN Seeckt (ATR) V Nita/Scholz	M	-	M	-
WP 8: Integrierte Entwurfsuntersuchung (IFL-Entwurfsverfahren)		S						
WT 8.1: Kerosin- und LH2-Flugzeuge in konventioneller Bauart	M	V ICAS 08	TN	S P Kiesel P Herda (P Salavin) B Dielbandhoesing B Dominguez P Jessen B Schwarze V ICAS 08 V DLRK 09	M	P,S Dielbandhoesing P,S Dominguez	M	P Schwarze
WT 8.2: Kerosin- und LH2-Flugzeuge in unkonventioneller Bauart	TN	S V DLRK 09	M	-	M	-	M	D
WP 9: LH2-Kraftstoffsystem	K	-	M	B Verbeke B Batal B Batal	TN	P Verbeke P Batal P Batal	K	B Verbeke

**Abkürzungen**

Technische Niederschrift (Technical Note) TN  
 einzelne Abschnitte aus einer Technischen Niederschrift (Technical Note) TN-A  
 Software S  
 Mitteilung M  
 Kommentar (mündlich) auf Projektmeeting - festgehalten im Protokoll K  
 Studentisches Projekt/Abschlussarbeit P  
 Veröffentlichung V  
 Bereitstellung von Daten D  
 Betreuung Projektarbeit B  
 Zwischenbericht ZB  
 Schlussbericht SB

Stand: 30.04.2010

**Tabelle 1.1:** Im Projekt "Grüner Frachter" erzielte Ergebnisse (Deliverables). Ein Vergleich zwischen Planung und Ausführung

## 1.5 Wissenschaftlich-technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

### 1.5.1 Allgemein

Die wissenschaftlich und technisch herausfordernden Themen in diesem Forschungsvorhaben waren:

1. Unkonventionelle Flugzeugkonfigurationen
2. Flugzeugantriebe mit unkonventionellen Kraftstoffen (LH2)
3. Entwurfsverfahren und Softwarewerkzeuge für unkonventionelle Flugzeugkonfigurationen und Flugzeugantriebe mit unkonventionellen Kraftstoffen
4. Ein-Mann-Cockpit / unbemannter Frachter
5. LH2-Kraftstoffsystem

Wie in der Vorhabensbeschreibung (**Scholz 2006**) dargestellt, waren zu vielen der genannten Themen von verschiedenen Institutionen bereits Untersuchungen zu den unterschiedlichen Aspekten und in unterschiedlicher Detailtiefe durchgeführt worden. Die folgenden Abschnitte fassen die wissenschaftlich-technischen Stände zu Beginn des Vorhabens zusammen:

#### Unkonventionelle Flugzeugkonfigurationen

Heutige Transportflugzeuge sind – von sehr wenigen Ausnahmen abgesehen – in der sog. Drachkonfiguration gebaut. Diese ist dadurch gekennzeichnet, dass

1. die Nutzlast in einem Rumpf untergebracht ist, an dem
2. die Flügel zur Auftriebserzeugung und
3. ein Leitwerk am Heck für Stabilität und Steuerung des Flugzeugs angebracht sind.

Jede in einem oder mehreren Merkmalen hiervon abweichende Flugzeugkonfiguration ist unkonventionell. Von besonderem Interesse für zukünftige Transportflugzeugprojekte ist die sog. Blended-Wing-Body (BWB) Konfiguration (siehe Bild 1.2). Diese Konfiguration wurde bisher hinsichtlich verschiedener Aspekte ihrer Anwendung, wie Bodenabfertigung (**Lee 2003**), Schwerpunkt und Stabilität (**Bansa 2004**) etc., theoretisch untersucht. Zu Projektbeginn gab es bereits einige fliegende Modellflugzeuge in der BWB-Konfiguration (siehe z. B. **AC20.30 2010**). Die X-48B (Bild 1.2), ein seit 2007 fliegendes Modell von Boeing, NASA und US Air Force Research Laboratory (AFRL). Es befand sich bei Vorhabensbeginn noch in Vorbereitung.



**Bild 1.2** Boeing/NASA X-48B (Talkingproud 2007)

### **Flugzeugantriebe mit unkonventionellen Kraftstoffen (LH2)**

Der heute in der Luftfahrt verwendete Kraftstoff ist auf Erdölbasis hergestelltes Kerosin. Jeder andere Kraftstoff oder Energieträger einschließlich Kerosins auf Basis anderer Rohstoffe wie Kohle, Gas oder nachwachsende Rohstoffe ist unkonventionell. Einen möglichen Kraftstoff für einen besonders sauberen Luftverkehr stellt Wasserstoff dar, da dieser ohne bzw. mit deutlich geringeren Emissionen von

- Kohlendioxid,
- Kohlenmonoxid,
- Stickoxiden,
- Schwefeloxiden,
- Ruß und
- unverbrannten Kohlenwasserstoffen (UHC)

verbrennt als Kohlenwasserstoffe. Bei nachhaltiger Produktion mittels Elektrolyse und regenerativ erzeugter Elektrizität würde er zudem unerschöpflich zur Verfügung stehen.

Unkonventionelle Kraftstoffe in der Luftfahrt und insbesondere Wasserstoff wurden bereits früher untersucht. Die drei wichtigsten früheren Untersuchungen zu Wasserstoff für Transportflugzeuge waren

- die Arbeiten von Lockheed und NASA in den 1970ern (**Brewer 1975, Brewer 1976**)
- die Arbeiten von Tupolev in den 1980ern (**Tupolev 2010**)
- das EU-Forschungsprojekt Cryoplane (**Faaß 2001**).

Im Rahmen der Forschungsarbeiten von Tupolev sowie weiterer Forschungsprojekte, wie etwa eines umgerüsteten Bombers B-57 der US Air Force (**Brewer 1991**), ist Wasserstoff bereits als Kraftstoff realer Demonstratorflugzeuge eingesetzt und die prinzipielle technische Machbarkeit von Wasserstoffantrieben nachgewiesen worden. Eine Umstellung des Luftverkehrs von Kerosin auf Wasserstoff hätte weitreichende Änderungen an Flughafeninfrastruktur und Flugbetrieb zur Folge. U. a. deshalb gab und gibt es derzeit keine Pläne, Wasserstoff in der Luftfahrt einzusetzen.

Untersuchungen zu von wasserstoffgetriebenen Flugzeugen unter den speziellen Aspekten von

- Regional- und Langstrecken-Frachtflugzeugen sowie
- der BWB-Konfiguration

sind nicht bekannt, doch stellen diese nach Einschätzung des Airbus FPO besonders interessante Einsatzgebiete von Wasserstoff als Luftfahrtkraftstoff dar.

### **Entwurfsverfahren und Softwarewerkzeuge für unkonventionelle Flugzeugkonfigurationen und Flugzeugantriebe mit unkonventionellen Kraftstoffen**

Siehe Abschnitt 1.5.2 .

### **Ein-Mann-Cockpit/unbemannter Frachter**

Der aktuelle Stand hinsichtlich des unbemannten Betriebs von Fluggeräten war dadurch gekennzeichnet, dass unbemannte Fluggeräte sich weitgehend noch im Stadium eines Versuchsträgers befanden bzw. im militärischen Bereich als Aufklärungseinheiten eingesetzt wurden. Es wurden einzelne automatisierte Flüge vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführt und nachgewiesen, dass ein pilotenloser Flug auf für Passagierflugzeuge möglich ist (**DLR 2004**). Doch stellte und stellt neben den technischen Herausforderungen insbesondere die Integration von bemanntem und unbemanntem Luftverkehr noch eine große Herausforderung dar.

### **LH2-Kraftstoffsystem**

Die Speicherung und Handhabung von Wasserstoff an Bord eines Flugzeugs stellte aufgrund der chemischen und physikalischen Eigenschaften von (Flüssig-)Wasserstoff von jeher ein zentrales Problemfeld bei Wasserstoffflugzeugen dar. Erfahrungen hierzu wurden in den bereits genannten wichtigsten früheren Forschungsarbeiten zu Wasserstoffflugzeugen gemacht. Am umfangreichsten und allgemein verfügbar sind die Erfahrungen von Lockheed und NASA aus den 1970ern zusammengefasst in **Brewer 1991**. Weiterhin enthält das deutsche Luftfahrttechnische Handbuch (LTH) im Abschnitt AT 01 900-00 „Wasserstofftechnologie“ (**LTH 2008**) umfangreiche Informationen. „Die sichere Handhabung von Wasserstoff ist im industriellen und kommerziellen Bereich kein Problem mehr.“ (**LTH 2008**), ist eine der wichtigsten Kernaussagen hinsichtlich der Anwendung von Wasserstoff.

Im Rahmen der genannten Forschungsprojekte von Lockheed/NASA, Tupolev und dem Cryo-plane-Projekt wurden verschiedene Architekturen von Wasserstoff(kraftstoff)systemen entworfen und verwendet, auf die sich dieses Forschungsvorhabens beziehen konnte. Die Untersuchung der Masse des gesamten Wasserstoffsystems sowie die Masse der Wasserstofftanks waren für eine fundierte Flugzeugmodellierung von besonderem Interesse.

## **1.5.2 Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens genutzt wurden**

### **Verfahren/Software**

Für den Flugzeugentwurf sind diverse kommerzielle und akademische Verfahren und Programme entwickelt worden und z. T. auf dem Markt verfügbar. Im Rahmen des Projekts „Der Grüne Frachter“ wurde das Flugzeugentwurfsprogramm PrADO (Preliminary Aircraft Design and Optimization program) des IFL angewendet (**Heinze 2010**). PrADO besteht aus diversen Einzelmodulen und Programmbibliotheken, welche die einzelnen Fachdisziplinen des Flugzeugentwurfs repräsentieren und über ein Datenmanagementsystem gesteuert und aufgerufen werden. Einige der verwendeten Entwurfsmodule mussten insbesondere hinsichtlich der Untersuchung von unkonventionellen Kraftstoffen und Antriebsarten verändert und/oder erweitert werden (WP 5, WP 6, siehe hierzu Abschnitte 2.1.2 und 2.1.4).

Zu Beginn des Vorhabens war als Softwareunterstützung für die Flugzeugdimensionierung im Vorentwurf eine Tabellenkalkulation an der HAW Hamburg vorhanden, wie sie seit mehreren Jahren im Rahmen der Vorlesung „Flugzeugentwurf“ zum Einsatz kommt (**Scholz 2010a**). Für die Durchführung von Vorentwürfen (WP 7) wurde diese bestehende Tabellenkalkulation genutzt und erweitert (WP 4). Das erstellte Tool erhielt den Namen PreSTo (Aircraft Preliminary Sizing Tool). Grundlegend lässt sich PreSTo insbesondere während der Dimensionierung

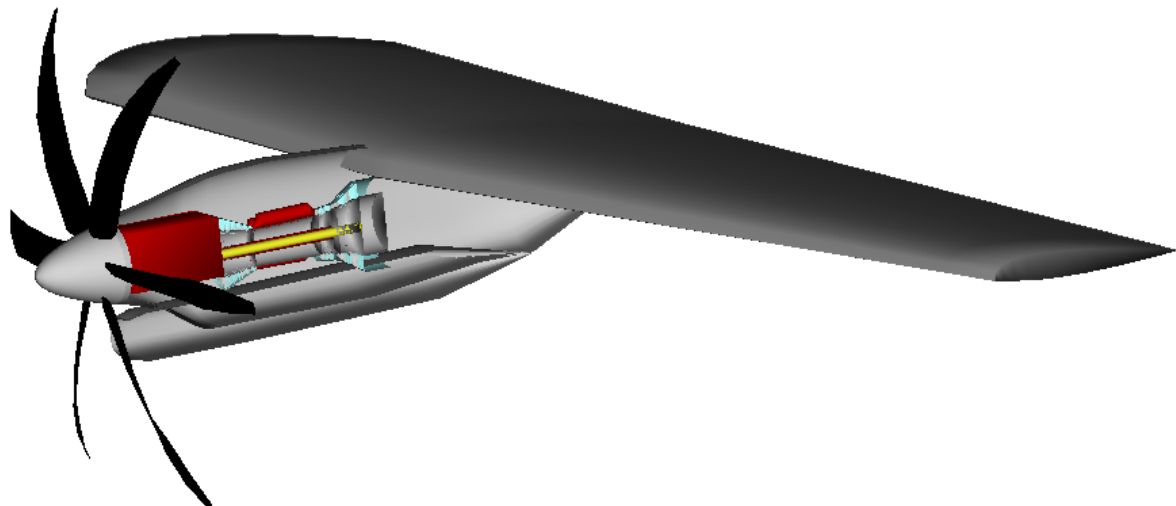
von Transportflugzeugen für konventionelle wie unkonventionelle Konfigurationen und Kraftstoffe einsetzen (siehe Abschnitt 2.1.2).

### Konstruktionen/Entwürfe

Die im Rahmen des Grünen Frachters erstellten Flugzeugentwürfe können unterschieden werden in

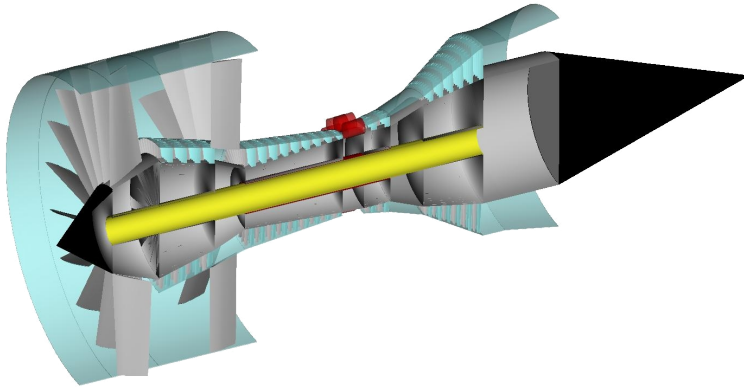
1. Regionalfrachtflugzeugvarianten und
2. Langstreckenfrachtflugzeugvarianten.

Die von der HAW Hamburg erstellten Regionalflugzeugvarianten beruhen auf dem existierenden Propellerflugzeug ATR 72 in der sog. „Full Freighter Version“ (ATR 2003, ATR 2005). Das Propellertriebwerk wurde in Anlehnung an die vorhandenen veröffentlichten und vom Hersteller erhaltenen Daten des real verwendeten Turboprop-Triebwerks PW127F der Firma Pratt & Whitney Canada erstellt (PWC 1993, Rolls-Royce 2006). Vom realen Triebwerksaufbau wurde dahingehend abgewichen, dass in PrADO keine Radialverdichter und sog. Umkehrbrennkammern modelliert werden können. Diese Komponenten wurden somit als Axialverdichter und konventionelle Brennkammern modelliert, was geringe Auswirkungen auf die Länge des erstellten Kerntriebwerks hat. Der Propeller wurde modelliert auf Basis des Originalpropellers Hamilton Sundstrand HS 568F (Hamilton Sundstrand 2003, FAA 2007) Die Triebwerkseinheit ist gezeigt in Bild 1.3. Die weiteren Eigenschaften des Triebwerks wie Masse und Thermodynamik blieben von den notwendigen Anpassungen unberührt.



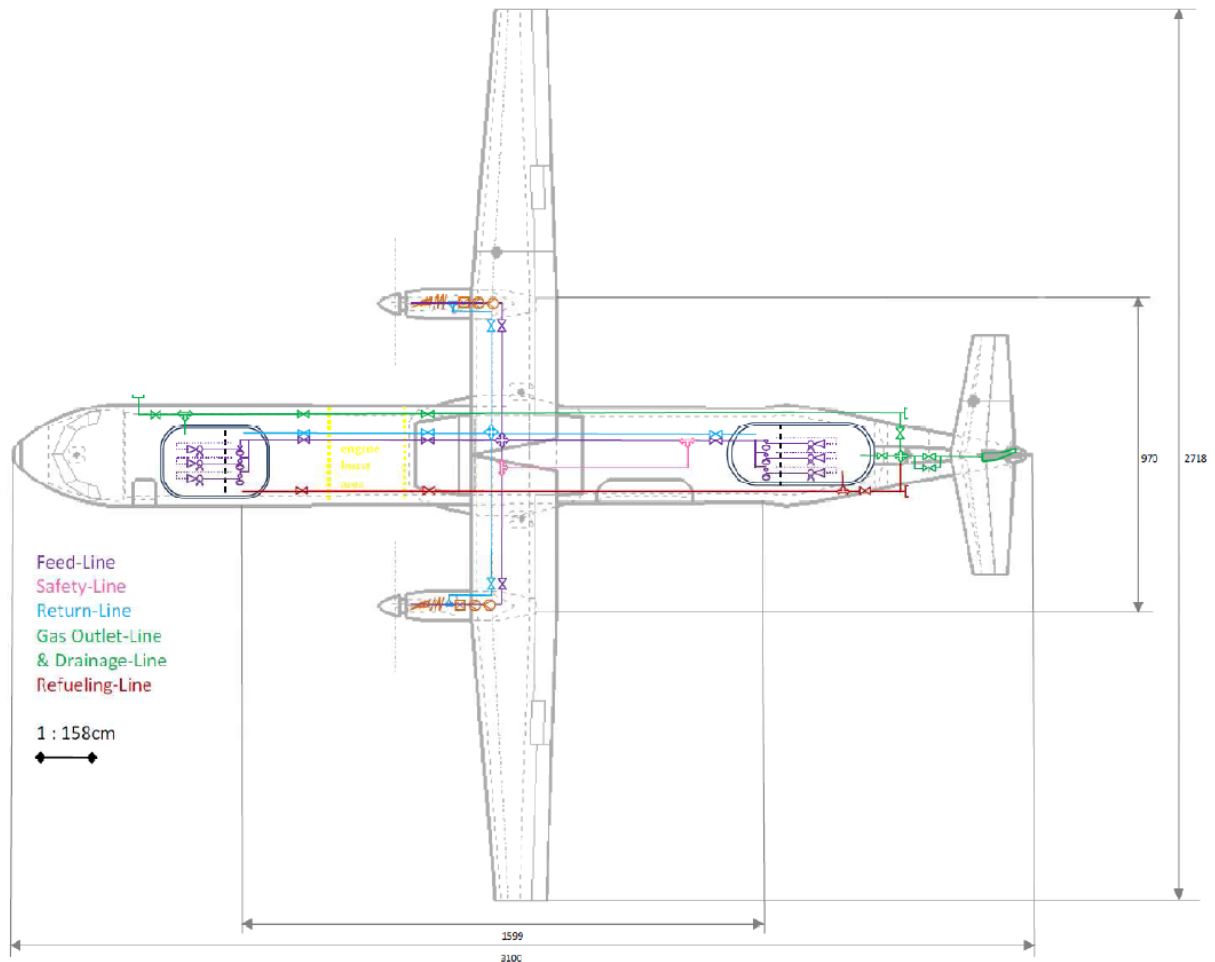
**Bild 1.3** Geometrie des Propellertriebwerkmodells des Referenzflugzeugs ATR72

Für die Erstellung der unkonventionellen Langstreckenfrachtflugzeuge in der Blended-Wing-Body Konfiguration wurde vom IFL auf der sog. „VELA3“-Konfiguration (Kresse 2006) aufgebaut. Das erstellte Strahltriebwerksmodell aller konventionellen wie unkonventionellen Langstreckenflugzeuge wurde an das reale Triebwerk GE90-110B1L angelehnt (Bild 1.4).



**Bild 1.4** Geometrie des Jet-Triebwerkmodells des Referenzflugzeugs Boeing B777

Informationen zum Wasserstoff(kraftstoff)system und dessen Architektur, Tanks und Komponenten wurden teilweise den Ergebnissen des Forschungsprojekts „Cryoplane“ entnommen oder an diese angelehnt (Bild 1.5).



**Bild 1.5** Beispiel einer Wasserstoffsystemarchitektur (Batal 2010)

### 1.5.3 Verwendete Fachliteratur

Die im Folgenden aufgelisteten Quellen wurden als wichtigste Fachliteratur verwendet.

#### Flugzeugentwurfsliteratur

Howe 2005  
Loftin 1980  
Raymer 2006  
Roskam 1990  
Scholz 2005  
Scholz 2008  
Torenbeek 1988

#### Flugzeugdaten

ATR 2003  
ATR 2005  
Boeing 2009a  
Jackson 2007  
Jackson 2008

#### Marktprognosen

Airbus 2007  
ATR 2008  
Boeing 2007  
Boeing 2008a  
Boeing 2008b  
Bombardier 2008  
Embraer 2009

#### Kraftstoffdaten

BGR 2007  
Chevron 2006  
Exxon Mobil 2008  
IATA 2008  
IATA 2009a

#### Luftfahrt und Umwelt

ACARE 2001  
ACARE 2003  
ACARE 2009  
ADV 2009

Antoine 2004  
Babikian 2001  
Boeing 2009b  
Chambers 2008  
Europäisches Parlament 2009  
Grewe 2007  
IATA 2009b  
IATA 2009c  
IPCC 1999  
IPCC 2007a  
IPCC 2007b  
Kuhlmann 2009  
Schumann 2008  
Stern 2007  
Upham 2003

#### PrADO

Hansen 2008  
Heinze 2001  
Heinze 2004  
Kossira 1990  
Österheld 2000  
Werner-Westphal 2008

#### Konventionelle Triebwerkstechnologie

Bräunling 2009  
EASA 2007  
EASA 2008  
FAA 2007  
FAA 2008  
FAA 2010  
GE 2008  
Hamilton Sundstrand 2003  
PWC 1993  
Mattingly 1987  
Rolls-Royce 2006  
Roux 2007



**Unkonventionelle Konfigurationen****DLR 2010****Torenbeek 2005****Wasserstoff in der Luftfahrt****Albrecht 2009****Böhm 2008****Brewer 1975****Brewer 1976****Brewer 1991****Faaß 2001****Funke 2009****LTH 2008****Schwarze 2009****Sefain 2006****Steiner 2001****Svensson 2005****Tupolev 2010****Westenberger 2003****1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Ansprechpartner der jeweiligen Projektpartner waren:

**HAW Hamburg**

Prof. Dr.-Ing. Dieter Scholz, MSME (Projektleiter)

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Aero – Aircraft Design and Systems Group

Berliner Tor 9

20099 Hamburg

Dipl.-Ing. Kolja Seeckt (Wissenschaftlicher Mitarbeiter)

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Aero – Aircraft Design and Systems Group

Berliner Tor 9

20099 Hamburg

**Institut für Flugzeugbau und Leichtbau der TU Braunschweig**

Dr.-Ing. Wolfgang Heinze

Technische Universität Braunschweig

Institut für Flugzeugbau und Leichtbau

Hermann-Blenk-Str. 35

38108 Braunschweig

**Airbus Future Projects Office**

Dipl.-Ing. Andreas Westenberger  
 Airbus Operations GmbH  
 Kreetslag 10  
 21129 Hamburg

**Bishop GmbH – Aeronautical Engineers**

Peter W. Bishop, BSc  
 Bishop GmbH  
 Blankeneser Bahnhofstraße 12  
 22587 Hamburg

Neben den genannten festen Projektpartnern wurde mit den folgenden „assozierten Partnern“ in Form von Betreuungen von Projektarbeiten, Abschlussarbeiten und Praktika von Studierenden dieser Partner kooperiert:

- |  |                 |
|--|-----------------|
| - Technische Universität Delft (Niederlande):        | 4 Studierende   |
| - Universität Stuttgart (Deutschland):               | 1 Studierender  |
| - ESTACA (Paris, Frankreich):                        | 1 Studierender  |
| - Universität Warschau (Polen):                      | 2 Studierende   |
| - Katholieke Hogeschool Brugge – Oostende (Belgien): | 4 Studierende   |
| - Escuela Superior de Ingenieros Sevilla (Spanien):  | 1 Studierender. |

Die von den Projektpartnern erzielten Ergebnisse, wichtige Quellen und Projektmanagementdokumente wurden von der HAW Hamburg verwaltet und auf einem zentralen, übers Internet erreichbaren Projektlaufwerk abgelegt.

Die Zusammenarbeit der Projektpartner wurde getragen durch halbjährliche Projektfortschrittsmeetings aller Projektpartner, die durch Protokolle dokumentiert wurden. Zusätzlich fanden zu konkreten Themen und Ereignissen bilaterale Treffen und Telefonkonferenzen statt.

Während der Projektlaufzeit fanden die folgenden wichtigsten **Besprechungen** statt:

**2006**

- 05.12. Kick-Off Meeting aller Projektpartner an der HAW Hamburg  
 20.12. Vorgehensbesprechung zwischen HAW Hamburg und Airbus bei Airbus in Hamburg Finkenwerder

**2007**

- 21.-24.02. Meeting zwischen HAW Hamburg und KTH Stockholm sowie HAW Hamburg und Linköpings Universität in Stockholm bzw. Linköping:
- a) Besprechung zur Durchführung der Promotion von Herrn Seeckt.
  - b) Prof. Scholz ist in Linköping eingesetzt als „Opponent“ bei der Verteidigung einer Promotion.
  - c) Kennen lernen des schwedischen Promotionsverfahrens.
- 13.04. Bilaterales Meeting von HAW Hamburg und Airbus zum weiteren Vorgehen bei Airbus in HH Finkenwerder.
- 23.-24.04. Bilaterales Meeting HAW Hamburg und IFL zur Arbeit mit dem Entwurfsprogramm PrADO in Braunschweig.
- 26.06. Regelmäßige Projektbesprechung aller Projektpartner an der HAW Hamburg
- 01.10. Meeting der Projektpartner HAW Hamburg, Airbus, und Bishop GmbH zum weiteren Vorgehen an der HAW Hamburg.
- 27.11. Regelmäßige Projektbesprechung aller Projektpartner an der HAW Hamburg

**2008**

- 08.01. Meeting von Bishop GmbH, HAW Hamburg und Airbus zum Thema „Aufgaben der kommenden Bishop-Praktikanten“ bei Bishop GmbH.
- 01.04. Bilaterales Meeting von HAW Hamburg und IFL zum Thema „PrADO-Modelle der ATR 72“ in Braunschweig.
- 24.06. Regelmäßige Projektbesprechung aller Projektpartner an der HAW Hamburg.
- 14.11. Bilaterales Meeting der Projektpartner HAW Hamburg und Airbus zur Planung der Diplomarbeit von Malte Schwarze, einem Studenten der Universität Stuttgart zum Thema "Umrüstung einer ATR 72 auf Wasserstoffbetrieb".
- 15.12. Regelmäßige Projektbesprechung aller Projektpartner an der HAW Hamburg.

**2009**

- 12.02. Treffen aller Projektpartner plus erweitertem Airbus-Teilnehmerkreis zur Airbus-internen Begutachtung des Projekts „Der Grüne Frachter“ – Teil 1 (GEFF 1)
- 21.07. Regelmäßige Projektbesprechung aller Projektpartner an der HAW Hamburg.
- 27.07. Bilaterales Meeting von HAW Hamburg und IFL zum Thema „PrADO-Modelle der ATR 72“ in Braunschweig.
- 30.07. Bilaterales Meeting von HAW Hamburg und IFL zum Thema „PrADO-Modelle der ATR 72“ in Braunschweig.
- 28.08. Bilaterales Meeting von HAW Hamburg und Airbus zum weiteren Vorgehen an der HAW Hamburg.
- 15.09. Treffen aller Projektpartner plus erweitertem Airbus-Teilnehmerkreis zur Airbus-internen Begutachtung des Projekts „Der Grüne Frachter“ – Teil 2 (GEFF 2).
- 18.12. Regelmäßige Projektbesprechung aller Projektpartner an der HAW Hamburg.

## 2 Eingehende Darstellung des Projekts

Die Zielsetzung hinsichtlich der Anzahl und Art der erzielten Ergebnisse wurde in der Vorhabensbeschreibung (**Scholz 2006**) folgendermaßen formuliert:

*Nach Abschluss des Vorhabens werden 18 Technische Niederschriften zu den Arbeitspaketen und Aufgaben vorliegen. Zusätzlich werden etwa 15 Diplom- und Projektarbeiten (bzw. Abschlussarbeiten in den neuen Bachelor- und Master-Studiengängen) an der HAW angefertigt worden sein – weitere Arbeiten werden an der TU Braunschweig betreut werden. Im Rahmen des Vorhabens werden Entwurfsverfahren erstellt bzw. weiter entwickelt, die sichtbar als Software auf Datenträger mit Dokumentation vorliegen werden.*

*Es sollen zwei neue Stellen geschaffen werden für Wissenschaftliche Mitarbeiter, eine am IFL in Braunschweig (finanziert durch Airbus) und die andere an der HAW (finanziert durch AiF). Es wird angestrebt, beide Mitarbeiter zur Promotion zu führen. Damit könnten dann (zu einem späteren Zeitpunkt) möglicherweise zwei Dissertationen aus dem Themengebiet des Vorhabens angefertigt worden sein. An der HAW ergibt sich damit möglicherweise die Gelegenheit eine kooperative Promotion am Studiendepartment Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau durchzuführen.*

### 2.1 Erzielte Ergebnisse

#### 2.1.1 Übersicht

Im Rahmen des Vorhabens „Der Grüne Frachter“ wurde/wurden

- 10 (angekündigt: 18) Technische Niederschriften und Mitteilungen (Memos) erstellt,
- 33 (angekündigt: 15) studentische Projektarbeiten, Abschlussarbeiten und Praktika betreut,
- 10 technische Veröffentlichungen auf nationalen und internationalen Kongressen und Workshops präsentiert, wovon ein Paper als Kapitel in das im Sommer 2010 erschiene Fachbuch des Springer Verlags „The Economic, Social and Political Elements of Climate Change“ aufgenommen wurde (**Seeckt 2010e**),
- das Vorhaben auf 4 Fachkongressen in Form eines Posters auf dem Stand der Forschungsgruppe Aero präsentiert,
- das Vorhaben in 7 Fachzeitschriften, Tageszeitungen und fachlichen Newslettern vorgestellt,
- die Projektzwischenstände zweimal dem Projektpartner und Drittmittelgeber Airbus präsentiert,
- 2 Zwischenberichte durch das IFL für den Projektpartner und Drittmittelgeber Airbus verfasst,
- 3 Zwischenberichte an den Projektträger AiF verfasst und

– ein Schlussbericht (dieser) verfasst.

Die genannten Dokumente sind in den Tabellen 2.1 bis 2.7 nach Jahren sortiert aufgelistet.

Weiterhin wurde der Wissenschaftliche Mitarbeiter der HAW Hamburg, Herr Dipl.-Ing. Kolja Seeckt, als Promotionsstudent an der Königlich Technischen Hochschule (KTH) Stockholm angenommen. Das Promotionsvorhaben konnte durch die Arbeiten am Projekt „Der Grüne Frachter“ erfolgreich voran getrieben werden. Der schwedische Zwischenschritt – das sogenannte „Licentiatexamen“ – konnte im Herbst 2010 erfolgreich mit der Verteidigung der Thesis abgeschlossen werden. Die von Herrn Seeckt erstellte Licentiat-Thesis kann somit zum erweiterten Kreis der Ergebnisse des Projekts „Der Grüne Frachter“ zählen. Das gleiche gilt für die Dissertation und den geplanten Abschluss der Promotion an der KTH.

Am IFL der TU Braunschweig wurde kein Mitarbeiter eingestellt auf dem Projekt "Grüner Frachter". Daher wurde dort auch nicht (wie im Antrag der HAW Hamburg in Aussicht gestellt wurde) mit einer Promotion zum Thema begonnen.

Die erzielten Ergebnisse hinsichtlich der Erweiterung der verwendeten Methoden und Werkzeuge PrADO und PreSTo werden im Abschnitt 2.1.2 vorgestellt. Die technisch-inhaltlichen Ergebnisse zu den untersuchten Regional- und Langstreckenflugzeugvarianten sind in den Abschnitten 2.1.3 (Regionalfrachtflugzeuge) und 2.1.4 (Langstreckenfrachtflugzeuge) zusammengefasst.

**Tabelle 2.1** Erstellte Dokumente der Projektpartner 2007

Dokument	Titel	Dokumenttyp Organisation	Projekt- Partner
<b>Kiesel 2007</b>	Methodisches Entwerfen von Verkehrsflugzeugen mit PrADO	Projektarbeit HAW Hamburg	HAW
<b>Mainzer 2007</b>	Umweltaspekte des Luftverkehrs - Möglichkeiten der Quantifizierung von Umweltfreundlichkeit im Reise- flug	Projektarbeit Katholieke Hogeschoo Brugge-Oostende	HAW
<b>Seeckt 2007a</b>	Zwischenbericht FH3-Projekt "Grü- ner Frachter" – Entwurfsuntersu- chungen zu umweltfreundlichen und kosteneffektiven Frachtflugzeugen mit unkonventioneller Konfiguration; Berichtszeitraum: 1. Sept. 2006 – 31. Dez. 2006	Forschungszwischenbericht HAW Hamburg	HAW
<b>Seeckt 2007b</b>	Green Freighter - Requirements and Selection of Design Concepts to be Investigated	Technische Niederschrift HAW Hamburg	HAW
<b>Vrydag 2007</b>	Contributions of Air Cargo to To- day's and Future Intermodal Freight Transport	Projektarbeit Katholieke Hogeschool Brugge-Oostende	HAW
<b>Wischhusen 2007</b>	Umweltaspekte des Luftverkehrs - Möglichkeiten der Quantifizierung von Umweltfreundlichkeit im Nah- bereich von Flughäfen	Projektarbeit HAW Hamburg	HAW
<b>Zandstra 2007a</b>	The Economic Performance of the Green Freighter	Literature Research / Praktikumsbericht	Airbus Bishop HAW
<b>Zandstra 2007b</b>	Green Freighter, Green Systems - Systems Optimized for Freighters and their Economic Performance	Master-Thesis Delft University of Technology	Airbus Bisho- pHAW

**Tabelle 2.2** Erstellte Dokumente der Projektpartner 2008

Dokument	Titel	Dokumenttyp Organisation	Projekt- Partner
<b>Böhm 2008</b>	Analysis of the freighter turn around process	Technische Niederschrift Airbus Deutschland GmbH	Airbus
<b>Coene 2008</b>	Conceptual Design of Wings and Tailplanes – Methods, Statistics, Tool Setup	Master-Thesis Katholieke Hogeschool Brugge–Oostende	HAW
<b>Dielbandhoesing 2008</b>	Propeller Propulsion Systems - Investigation and Efficiency Calculation in PrADO	Praktikumsbericht Delft University of Technology	Bishop HAW
<b>Dominguez 2008</b>	Aircraft Modeling for PrADO	Praktikumsbericht Escuela Superior de Ingenieros Sevilla	Bishop HAW
<b>Gerber 2008</b>	Abschätzung von Propellerwirkungsgraden mittels JavaProp	Projektarbeit HAW Hamburg	HAW
<b>Goderis 2008</b>	Conceptual Design of Fuselages, Cabins and Landing Gears – Methods, Statistics, Tool Setup	Master-Thesis Katholieke Hogeschool Brugge–Oostende	HAW
<b>Herda 2008</b>	Methodisches Entwerfen von Verkehrsflugzeugen mit PrADO	Projektarbeit HAW Hamburg	HAW
<b>Oehlke 2008</b>	Aerodynamik eines Wasserstoffaußentanks	Mitteilung HAW Hamburg	HAW
<b>Salavin 2008</b>	Structure and function of the aircraft design program PrADO	Projektarbeit École Supérieure des Techniques Aéronautiques et de Construction Automobile (ESTACA) Paris	HAW
<b>Schiktanz 2008a</b>	Untersuchung von Tragflügelumströmungen mittels Tornado	Projektarbeit HAW Hamburg	HAW
<b>Schiktanz 2008b</b>	Inforapid Suchen & Ersetzen	Mitteilung HAW Hamburg	HAW
<b>Schiktanz 2008c</b>	OmniPage 16	Mitteilung HAW Hamburg	HAW
<b>Seeckt 2008a</b>	Zwischenbericht FH3-Projekt "Grüner Frachter" – Entwurfsuntersuchungen zu umweltfreundlichen und kosteneffektiven Frachtflugzeugen mit unkonventioneller Konfiguration; Berichtszeitraum: 1. Jan. 2007 – 31. Dez. 2007	Forschungszwischenbericht HAW Hamburg	HAW
<b>Verbeke 2008a</b>	Study and Assessment of the Results of the Reference Aircrafts of the Cryoplane Project	Mitteilung Delft University of Technology	Airbus Bishop HAW
<b>Verbeke 2008b</b>	Comparison of various concepts Cryoplane	Mitteilung Delft University of Technology	Airbus Bishop HAW

**Noch: Tabelle 2.2**      Erstellte Dokumente der Projektpartner 2008

Dokument	Titel	Dokumenttyp Organisation	Projekt- Partner
<b>Verbeke 2008c</b>	Cryoplane Long Range Version	Mitteilung Delft University of Technology	Airbus Bishop HAW
<b>Verbeke 2008d</b>	Cryoplane Technical Data	Mitteilung Delft University of Technology	Airbus Bishop HAW
<b>Verbeke 2008e</b>	Citavi	Mitteilung Delft University of Technology	Bishop HAW
<b>Verbeke 2008f</b>	Study and Assessment of the Cryoplane designs	Praktikumsbericht Delft University of Technology	Airbus Bishop HAW
<b>Wolter 2008</b>	Abschätzung von Propellerwirkungsgraden mittels HamProp	Projektarbeit HAW Hamburg	HAW

**Tabelle 2.3**      Erstellte Dokumente der Projektpartner 2009

Dokument	Titel	Dokumenttyp Organisation	Projekt- Partner
<b>Batal 2009a</b>	Direct Operating Costs (DOC) für Frachtflugzeuge Entwicklung einer Zielfunktion zur Optimierung "grüner" Frachtflugzeuge	Projektarbeit HAW Hamburg	Bishop HAW
<b>Batal 2009b</b>	Kraftstoffsystem für Wasserstoffflugzeuge – Systemkomponenten und Architekturen	Bachelor-Thesis HAW Hamburg	Bishop HAW
<b>Bopp 2009</b>	Erweiterung des Flugzeugdimensionierungsprogramms PreSTo um Anforderungen hinsichtlich Lärm- und CO <sub>2</sub> -Emissionen	Projektarbeit HAW Hamburg	HAW
<b>Geppert 2009</b>	Aircraft Preliminary Sizing with the Design Tool of the University Linköping	Projektarbeit HAW Hamburg	HAW
<b>Heinze 2009a</b>	AiF-Projekt mit Unterstützung durch Airbus Deutschland GmbH – Entwurfsuntersuchungen zu umweltfreundlichen und kosteneffektiven Frachtflugzeugen mit unkonventioneller Konfiguration; Bericht – Zeitraum: 01.01.2007 – 31.12.2008	Forschungszwischenbericht Technische Universität Braunschweig, Institut für Flugzeugbau und Leichtbau	IFL



**Noch: Tabelle 2.3**      Erstellte Dokumente der Projektpartner 2009

Dokument	Titel	Dokumenttyp Organisation	Projekt- Partner
<b>Heinze 2009c</b>	AiF-Projekt mit Unterstützung durch Airbus Deutschland GmbH – Entwurfsuntersuchungen zu umweltfreundlichen und kosteneffektiven Frachtflugzeugen mit unkonventioneller Konfiguration; Bericht – Zeitraum: 01.01.2009 – 31.12.2009	Forschungsabschlussbericht Technische Universität Braunschweig, Institut für Flugzeugbau und Leichtbau	IFL
<b>Jessen 2009</b>	Integration eines Moduls zur Abbildung eines Propellertriebwerks in das Flugzeugentwurfsprogramm PrADO	Projektarbeit HAW Hamburg	HAW
<b>Lenarczyk 2009</b>	Preliminary Sizing of Propeller and Jet Aircraft - Extension of PreSTo and Combination with CEASIOM	Master-Thesis Warsaw University of Technology	HAW
<b>Luthra 2009</b>	Dimensionierung und Entwurf von Strahlverkehrsflugzeugen mit Statistiken – Programmentwicklung von PreSTo und Anbindung an PrADO	Diplomarbeit HAW Hamburg	HAW
<b>Malzahn 2009</b>	Innovative Compartment Designs for Cargo Aircraft	Projektarbeit HAW Hamburg	HAW
<b>Oehlke 2009</b>	Masseabschätzung eines Wasserstoff-Außentanks für ein Turboprop- Verkehrsflugzeug	Projektarbeit HAW Hamburg	HAW
<b>Seeckt 2009a</b>	Zwischenbericht FH3-Projekt "Grüner Frachter" – Entwurfsuntersuchungen zu umweltfreundlichen und kosteneffektiven Frachtflugzeugen mit unkonventioneller Konfiguration; Berichtszeitraum: 1. Jan. 2008 – 31. Dez. 2008	Forschungszwischenbericht HAW Hamburg	HAW
<b>Seeckt 2009e</b>	Berechnung des Propellerwirkungsgrades	Technische Niederschrift HAW Hamburg	HAW
<b>Wolf 2009</b>	Erweiterung des „Aircraft Preliminary Sizing Tools“ PreSTo	Projektarbeit HAW Hamburg	HAW

**Tabelle 2.4** Erstellte Dokumente der Projektpartner 2010

Dokument	Titel	Dokumenttyp Organisation	Projekt- Partner
<b>Batal 2010</b>	Auslegung des Kraftstoffsystems von wasserstoffbetriebenen Frachtflugzeugen	Bachelor-Thesis HAW Hamburg	Bishop HAW
<b>Bazydlo 2010a</b>	Integration von Masse- und Aerodynamik- Abschätzmethoden für Wasserstoff-Außentanks in das Flugzeugentwurfsprogramm PrADO	Projektarbeit Warsaw University of Technology	HAW
<b>Bazydlo 2010b</b>	Masse- und Schwerpunktberechnungen im Flugzeugentwurf mit PreSTo	Projektarbeit Warsaw University of Technology	HAW
<b>Bhatia 2010</b>	Integration der Berechnungsmethode zum Hochauftrieb in die Tabellenkalkulation von PreSTo	Projektarbeit HAW Hamburg	HAW
<b>Golberg 2010</b>	Fahrwerksauslegung im Flugzeugentwurf und Berechnung der Bodenbelastung in PreSTo	Projektarbeit HAW Hamburg	HAW
<b>Montarnal 2010</b>	Integration von Algorithmen des Flugzeugentwurfs in PreSTo - Schwerpunkt: Kabinen- und Rumpfauslegung	Praktikumsbericht École Supérieure des Techniques Aéronautiques et de Construction Automobile (ESTACA) Paris	Bishop HAW
<b>Pommers 2010</b>	Entwicklung einer Methode für die automatische Visualisierung von Flugzeugentwürfen in einem 3D-CAD-Modell auf der Basis von variablen konstruktiven Parametern	Projektarbeit HAW Hamburg	HAW
<b>Seeckt 2010a</b>	Schlussbericht FH3-Projekt "Grüner Frachter" – Entwurfsuntersuchungen zu umweltfreundlichen und kosteneffektiven Frachtflugzeugen mit unkonventioneller Konfiguration; Laufzeit: 1. Sept. 2006 – 30. April 2010	Forschungsabschlussbericht HAW Hamburg	HAW

**Tabelle 2.5** Technische Veröffentlichungen der Projektpartner

Veröffentlichung	Titel	Medium/Kongress/Konferenz	Projekt-Partner
<b>Heinze 2009b</b>	Gesamtentwurfsuntersuchungen zu BWB-Frachtflugzeugen mit alternativen Treibstoffen	Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2009	IFL
<b>Scholz 2010</b>	Verringerung von Luftfahrtemissionen – Welche Vorteile bieten Wasserstoff & Co?	Fuelling the Climate 2010	HAW
<b>Seeckt 2008b</b>	The Green Freighter Project – Objectives and First Results	ICAS 2008	HAW IFL
<b>Seeckt 2009b</b>	The Green Freighter Project	SWAFEA – 1st European Stakeholder Meeting	HAW
<b>Seeckt 2009c</b>	Jet versus Prop, Hydrogen versus Kerosene for a Regional Freighter Aircraft	Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2009	HAW
<b>Seeckt 2009d</b>	Mitigating the Climate Impact of Aviation – What does Hydrogen Hold in Prospect?	Klima 2009	HAW
<b>Seeckt 2010b</b>	Application of the Aircraft Preliminary Sizing Tool PreSTo to Kerosene and Liquid Hydrogen Fueled Regional Freighter Aircraft	Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2010	HAW
<b>Seeckt 2010c</b>	Hydrogen Powered Freighter Aircraft – The Final Results of the Green Freighter Project	ICAS 2010	HAW IFL
<b>Seeckt 2010e</b>	Mitigating the Climate Impact of Aviation – What does Hydrogen Hold in Prospect?	Buchbeitrag zum Springer Fachbuch „The Economic, Social and Political Elements of Climate Change“	HAW
<b>Slingerland 2008</b>	Green Freighter Systems	46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit	Airbus Bishop HAW

**Tabelle 2.6** Vorstellungen des Projekts „Der Grüne Frachter“

Veröffentlichung	Titel	Medium	Projekt-Partner
<b>Blume 2009</b>	Projekt "Grüner Frachter" an der HAW Hamburg	Newsletter der Initiative Luftfahrtstandort Hamburg	HAW
<b>Hoffmann 2010</b>	New Study Examines Regional & Intercontinental H2-Fueled Transport Planes	Hydrogen & Fuel Cell Letter	HAW
<b>Schütte 2008</b>	Umweltschutz hoch über den Wolken	Die Welt	HAW
<b>Seeckt 2007c</b>	Green Freighter - Development of an Eco-Friendly Freighter at HAW Hamburg	mobiles	HAW
<b>Seeckt 2008c</b>	Der Grüne Frachter	Ingenieurspiegel	HAW
<b>Seeckt 2010d</b>	Der Grüne Frachter - Unkonventionelle Frachtflugzeuge	Festschrift 75 Jahre Flugzeugbau in Hamburg	HAW
<b>Sperling 2009</b>	Grüner Frachter	impetus	HAW

**Tabelle 2.7** Vorstellungen des Projekts „Der Grüne Frachter“ auf Kongressen

Jahr	Kongress	Ort	Projekt-Partner
2007	Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress First CEAS European Air and Space Conference	Berlin	HAW
2008	Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress	Darmstadt	HAW
2009	Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress	Aachen	HAW
2010	Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress	Hamburg	HAW

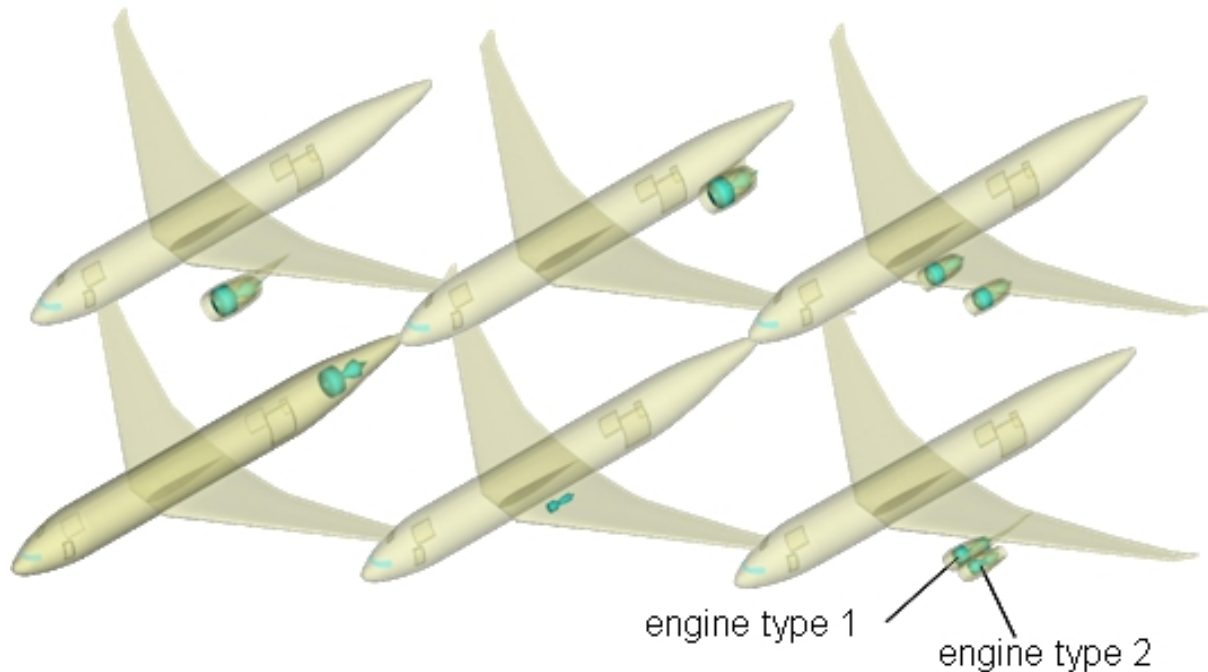
## 2.1.2 Erweiterung der verwendeten Methoden und Werkzeuge

### PrADO

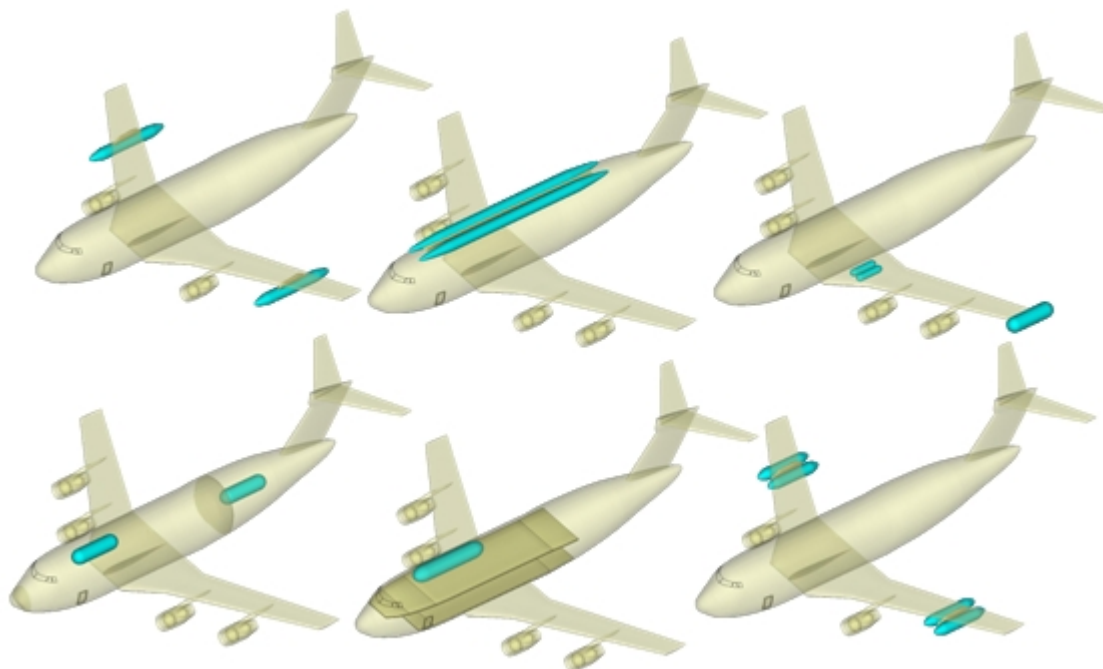
Das Flugzeugentwurfsprogramm PrADO (Preliminary Aircraft Design and Optimization program) des IFL wurde im Rahmen des Vorhabens hinsichtlich der folgenden wichtigsten Aspekte erweitert:

- Thermodynamische Triebwerksmodellierung
- Abbildung beliebiger flüssiger und kryogener Treibstoffe im Rahmen einer Gesamtentwurfsbeurteilung
- Integration verschiedener Triebwerksmodelle

Durch diese Erweiterungen ist es möglich geworden, jedes beliebige Triebwerks-, Tank- und Kraftstoffarrangement nachzubilden. Dies beinhaltet auch die Bewertung von Kombinationen verschiedener Treibstoffe sowie Triebwerks- und Antriebsarten an Bord eines Flugzeugs (Bi-Fuel-Einsatz, Strahltriebwerke, Propellertriebwerke, siehe Bilder 1.3, 2.1 und 2.2).



**Bild 2.1** Variationsmöglichkeiten des Triebwerksarrangements in PrADO



**Bild 2.2** Variationsmöglichkeiten des Arrangements von Kryotanks in PrADO

Die durchgeführten Erweiterungen werden detailliert in den IFL-Zwischenberichten **Heinze 2009a** und **Heinze 2009c** beschrieben.

Weiterhin werden die Erweiterungen und die PrADO-Anwendungen in den Veröffentlichungen auf den internationalen Luftfahrtkongressen ICAS 2008 und ICAS 2010 (**Seeckt 2008b**, **Seeckt 2010c**) und dem Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2009 (**Heinze 2009b**) präsentiert (siehe Anhänge B und E). Die Abschnitte 2.1.3 und 2.1.4 stellen ebenfalls die durch die genannten PrADO-Erweiterungen möglich gewordenen Untersuchungen vor.

Über die genannten essentiellen Erweiterungen hinaus wurden neue PrADO-Module erstellt und z. T. integriert. Es handelt sich um die neue Methoden der Betriebskostenabschätzung nach der Methode der Association of European Airlines (AEA) sowie die Massenabschätzung von Tanks für kryogene Kraftstoffe (**Bazydlo 2010a**).

### **PreSTo**

Im Rahmen des Vorhabens „Der Grüne Frachter“ wurde aus der verwendeten Tabellenkalkulation zur Dimensionierung von strahlgetriebenen Verkehrsflugzeugen das Tool PreSTo (Aircraft Preliminary Sizing Tool) erstellt und sukzessive erweitert. Mit PreSTo ist es nunmehr möglich, sowohl strahl- als auch propellergetriebene Fracht- und Passagierflugzeuge zu dimensionieren und darüber hinaus in die Komponentenauslegung von Rumpf, Kabine, Flügel, Hochauftriebssystem und Fahrwerk einzusteigen. Zudem ist PreSTo hilfreich in Zusammenarbeit mit umfassenderen Flugzeugentwurfsprogrammen wie PrADO. Die Bild 2.3 und Bild 2.4 zeigen Ausschnitte der aktuellen Benutzeroberfläche von PreSTo zur Dimensionierung von Propellerflugzeugen (Bild 2.3) und Rumpfgestaltung (Bild 2.4).

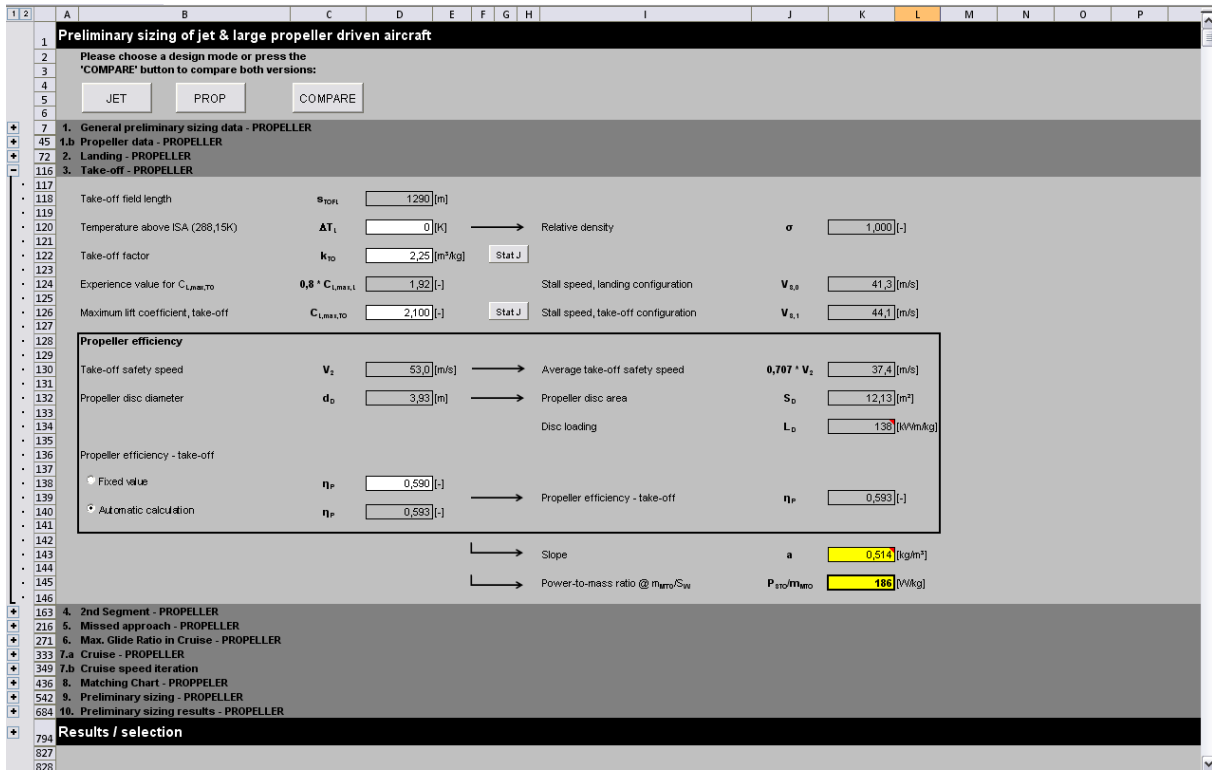


Bild 2.3 PreSTo-Benutzeroberfläche (Dimensionierung, Propellerflugzeug)

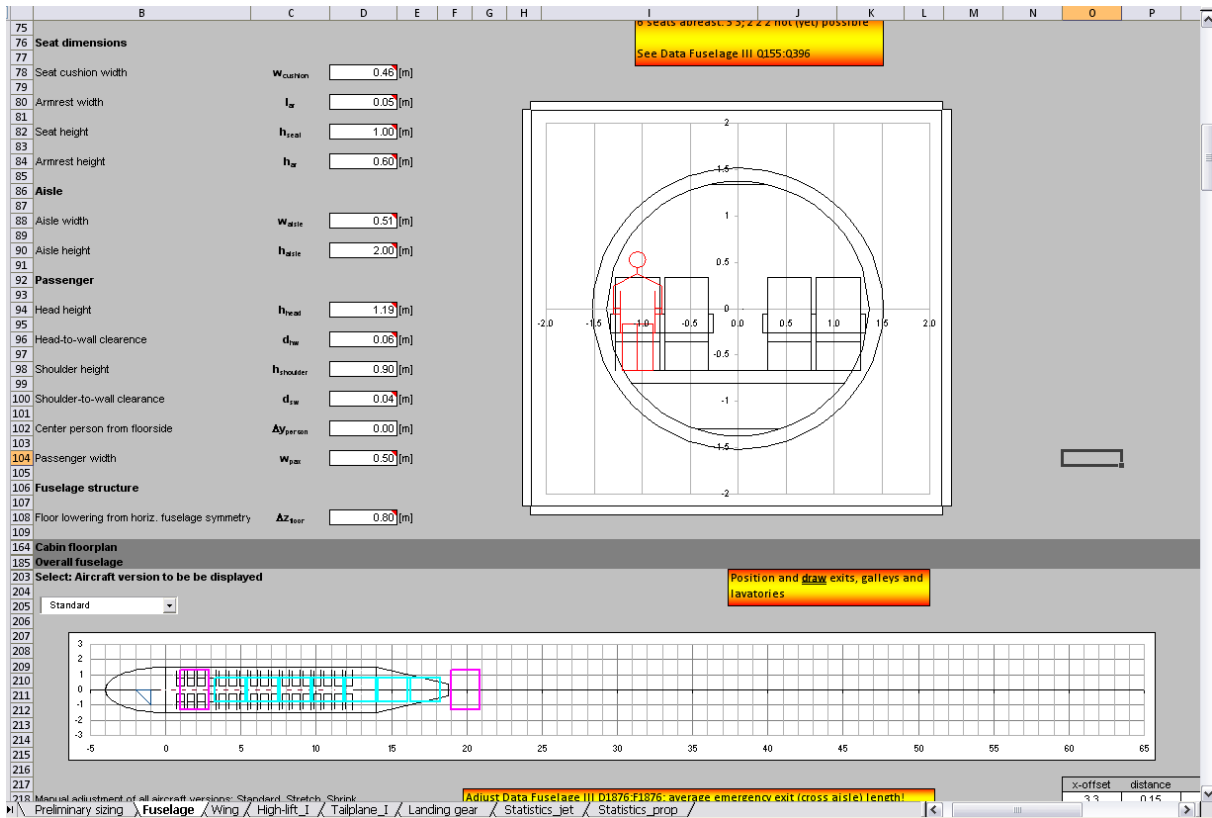


Bild 2.4 PreSTo-Benutzeroberfläche (Rumpfgestaltung, Entwicklungsstand: Ende April 2010)

Im Gegensatz zu PrADO liefert PreSTo dem Anwender aktiv Vorschläge für Größe und Gestalt eines neuen Flugzeugs, welche als Startwerte für die Arbeit in PrADO zur Analyse und Verbesserung dieser Werte genutzt werden können.

Ein Beispiel-Nachentwurf des Regionalflugzeugs ATR 72 ergibt Ergebnisse in einer realistischen Größenordnung. Die Ergebnisse der Dimensionierung hängen ab von den Eingaben (z. B. spezifischer Kraftstoffverbrauch, Gleitzahl), die über den Nachentwurf identifiziert werden. Insofern können auf den identifizierten Eingangsparametern basierende Größen wie Flugzeugmassen, Flügelfläche und Schub fast beliebig genau eingestellt werden. Andere Parameter, die direkt aus PreSTo abgeschätzt werden (z. B. Flügelmasse, Leitwerksfläche) werden mit einer Genauigkeit von ca. 10 % ermittelt.

Im Rahmen des Grünen Frachters sind an der HAW sehr viele studentische Projekte gelaufen. So hat PreSTo einen wertvollen Beitrag geliefert für Flugzeugbaustudenten im Rahmen ihrer Ausbildung an der HAW Hamburg. Die Studenten haben sich insbesondere durch studentische Projekt- und Abschlussarbeiten, auch über das Ende des Forschungsvorhabens eingebracht und haben PreSTo kontinuierlich erweitert und verbessert. PreSTo's Stand von März 2010 wurde in einer Veröffentlichung auf dem Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2010 präsentiert (Seeckt 2010b, siehe Anhang D).

Nach Abschluss des Grünen Frachters wurde PreSTo in ein eigenes HAW-intern gefördertes Forschungsprojekt überführt und kontinuierlich ausgebaut. PreSTo hat jetzt eine eigene Homepage, auf der der Fortschritt der Arbeiten verfolgt werden kann: <http://PreSTo.ProfScholz.de>. Auf dieser Seite sollen Schritt für Schritt einzelne Module für die interessierte Fachöffentlichkeit zum Download angeboten werden. Die Module sollen integriert werden über eine gemeinsame grafische Bedienoberfläche (Graphical User Interface, GUI) und eine Datenbank, die die Parameter aller Module aufnimmt.

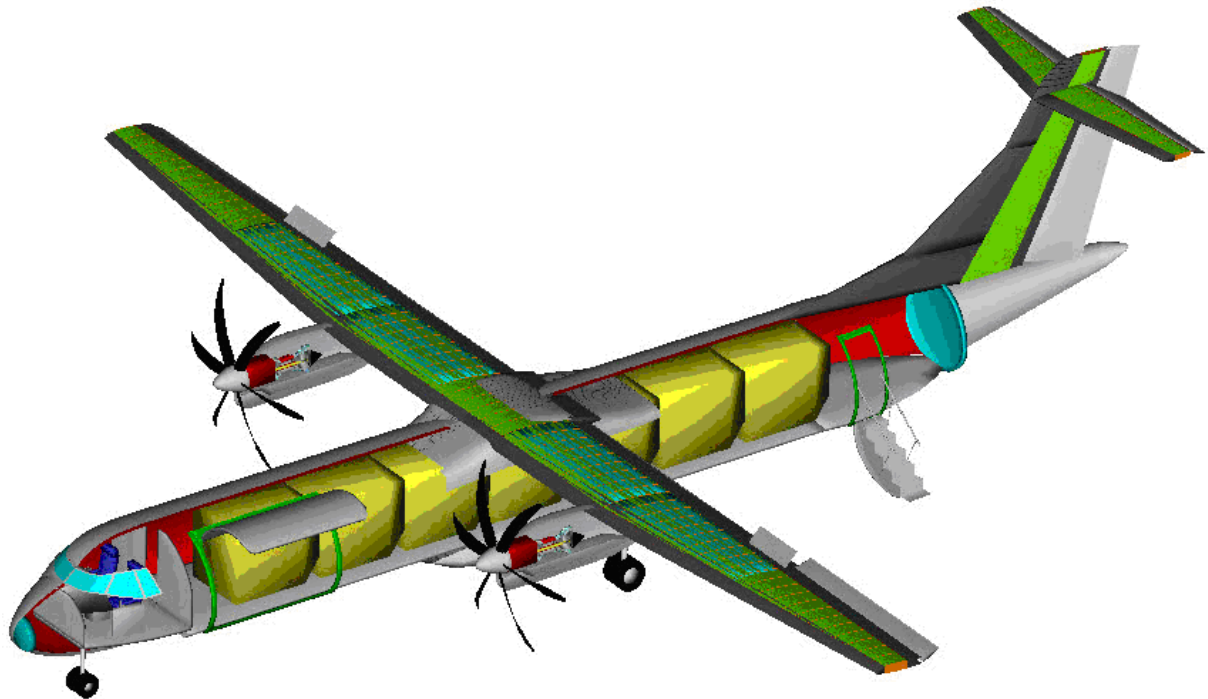
### **2.1.3 Technische Ergebnisse – Regionalfrachtflugzeuge in konventioneller Bauweise**

Während der Laufzeit des Vorhabens wurden von der HAW Hamburg verschiedene Regionalflugzeugversionen auf Basis der realen ATR 72 in PrADO modelliert, untersucht und bewertet. Die Versionen unterscheiden sich hinsichtlich des von ihnen verwendeten Kraftstoffs (Kerosin, Wasserstoff), hinsichtlich ihres Antriebs (Strahltriebwerk, Propellertriebwerk) sowie hinsichtlich der Anpassungen des Flugzeugs an die notwendigen Tankvolumina bei Verwendung von Wasserstoff. In Bild 2.5 ist das PrADO-Modell der auf der ATR 72 beruhenden Referenzversion für alle späteren Untersuchungen dargestellt. Bild 2.6 zeigt eine Übersicht der

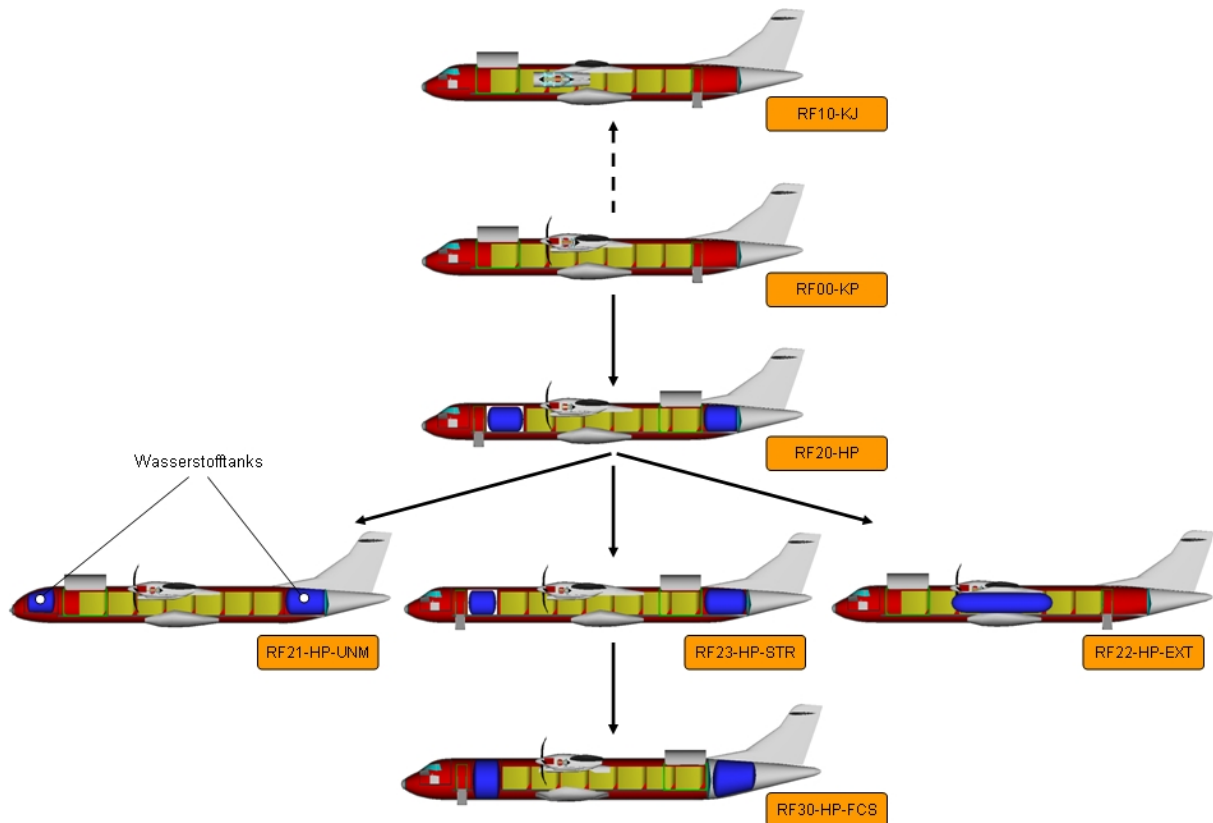


wichtigsten erstellten Versionen ausgehend vom Referenzflugzeug (Version RF00-KP) bis hin zur Wasserstoffversion RF30-FCS. Die Namensgebung folgte hierbei folgendem Schema:

RF:	Regional Freighter	UNM:	Unmanned
K:	Kerosene	EXT:	External tanks
H:	Hydrogen	STR:	Stretched fuselage
P:	Propeller	FCS:	Full cross section (Tanks über den gesamten Rumpfquerschnitt)
J:	Jet		



**Bild 2.5** Regionalfrachtflugzeuge: Referenzversion RF00-KP auf Basis der ATR 72 Full Freighter Version



**Bild 2.6** Regionalfrachtflugzeuge: Versionsübersicht

Über die gezeigten Hauptvarianten hinaus wurden diverse weitere Untervarianten mit beispielsweise veränderten Betriebspunkten erstellt und untersucht.

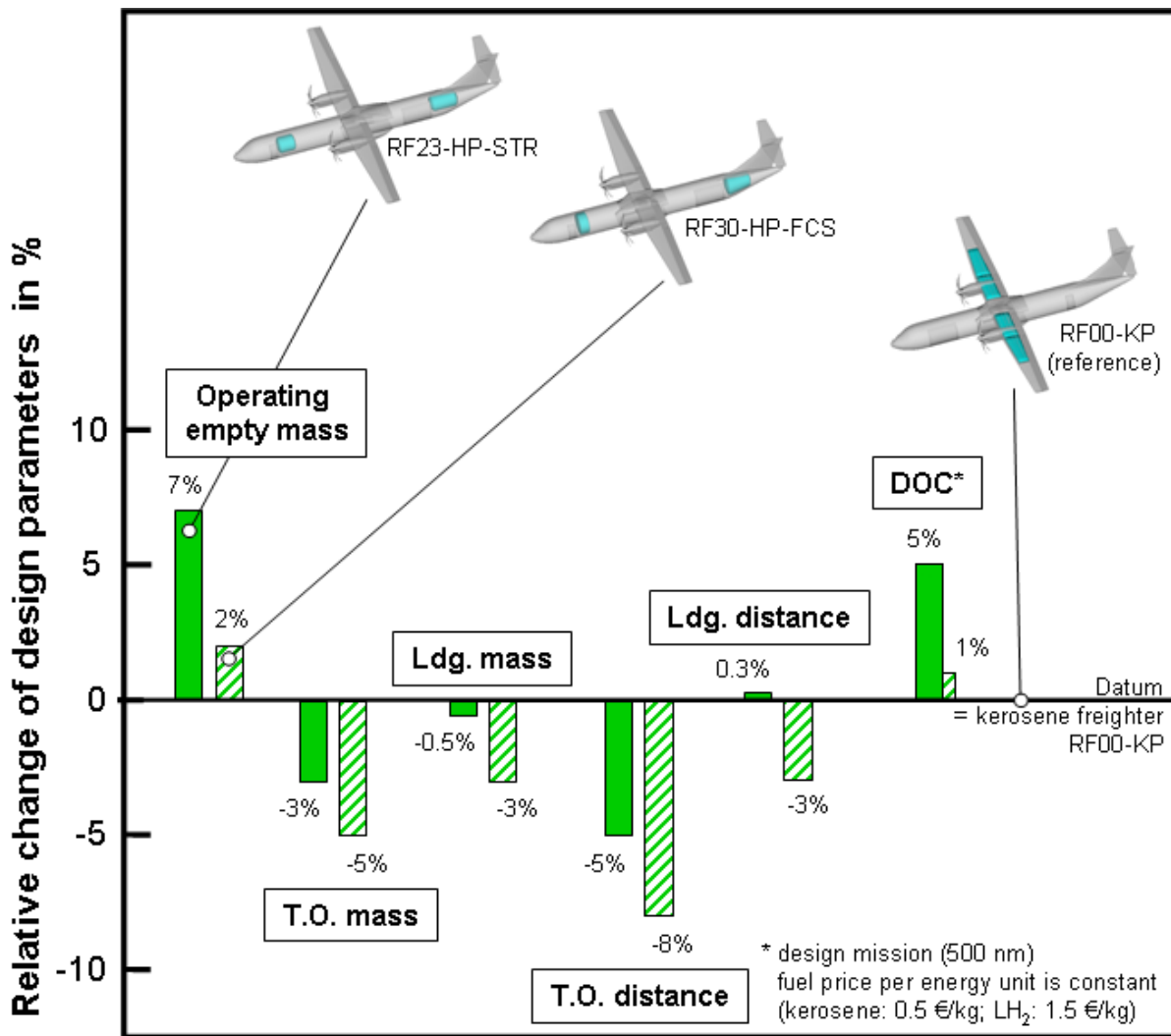
## Ergebnisse

Die Untersuchungen der PrADO-Modelle haben zu den folgenden zentralen Erkenntnissen geführt:

- Eine Umrüstung eines bestehenden Flugzeugs von Kerosin- auf Wasserstoffantrieb führt ohne Anpassungen des Rumpfes oder zusätzliche externe Tanks zu einer großen Reduktion des Nutzlastvolumens aufgrund des großen benötigten Tankvolumens.
- Für Regionalflugzeuge mit einer vergleichsweise niedrigen Reiseflugmachzahl von 0,4 bis 0,5 sind Strahlantriebe aus ökologischer Sicht und somit zukünftig (bei steigenden Kraftstoffpreisen) auch zunehmend ökonomischer Sicht deutlich schlechter als Propellerantriebe.
- Die Energieverbräuche von Wasserstoffflugzeugen sind geringer als die von Kerosinflugzeugen. Dies, zusammen mit ihren deutlich geringeren Schadstoffemissionen (kein Kohlendioxid, kein Kohlenmonoxid, keine Schwefeloxide, deutlich geringere Stickoxide) macht sie deutlich umwelt- und klimafreundlicher als vergleichbare Kerosinflugzeuge.

- Wasserstoffflugzeuge weisen aufgrund der notwendigen Tankeinbauten, Isolation, etc. eine höhere Betriebsleermasse auf als vergleichbare Kerosinflugzeuge. Aufgrund der geringen Kraftstoffdichte und –masse liegt ihre maximale Abflugmasse jedoch unter der eines Kerosinflugzeugs.
- Im speziellen Fall der ATR 72 und Regionalflugzeugen allgemein liegt zudem die maximale Landemasse der Wasserstoffversion trotz der erhöhten Betriebsleermasse unter der der Kerosinversion. Dies liegt daran, dass diese Flugzeuge dafür ausgelegt sind, mit fast vollen Tanks auch landen zu können und hat positive Auswirkung auf die relative Start- und Landebahnlänge des Wasserstoffflugzeugs im Vergleich zur Kerosinversion.
- Es empfiehlt sich die Nutzung von Tankinstallationen über den gesamten zur Verfügung stehenden Rumpfquerschnitt. Dies reduziert deutlich die Vergrößerung der Flugzeugleermasse aufgrund von Tanks, Isolation und sich daraus ergebenden Schneeball-effekten. Es wäre sogar möglich, den Rumpfquerschnitt einer Wasserstoffversion noch zu vergrößern, um die notwendige Rumpfstreckung bei Tankeinbauten zu verringern. In Hinblick auf mögliche Anwendungen desselben Rumpfes für Passagierflugzeugvarianten bedeutet ein vergrößerter Rumpfquerschnitt mehr Raum und somit mehr Komfort für die Passagiere, was aktuellen Trends im Flugzeugbau entgegenkommt (siehe z. B. Airbus A350XWB).

Bild 2.7 zeigt eine Zusammenfassung der finalen Bewertung der Wasserstoffvarianten RF23-HP-STR und RF30-HP-FCS im Vergleich zur Referenzvariante RF00-KP.



**Bild 2.7** Regionalfrachtflugzeuge: Relativer Vergleich von Wasserstoffvarianten zu Kerosinflugzeug

Es zeigt sich, dass die maximalen Abflugmassen der Wasserstoffversionen 3 % bis 5 % geringer sind als die des Kerosinflugzeugs, obwohl ihre Betriebsleermassen 2 % bis 7 % größer sind. Dies liegt an der deutlich geringeren Kraftstoffmasse des Wasserstoffs. Die geringeren Start- und Landmassen der Wasserstoffflugzeuge führen zu 5 % bis 8 % kürzeren Start- und 0 % bis 3 % kürzeren Landstrecken. Die relativ geringen Betriebskostennachteile von 1 % bis 5 % resultieren aus den geringen Energieverbräuchen der Wasserstoffflugzeuge bei einem angenommenen Kerosinpreis von 0,5 €/kg und einem energie-äquivalenten Wasserstoffpreis von 1,5 €/kg. Zudem wurde der Flugzeugpreis als proportional zur Flugzeugmasse ermittelt.

Die Untersuchungsergebnisse werden qualitativ wie quantitativ in den Veröffentlichungen auf den internationalen Luftfahrtkongressen ICAS 2008 und ICAS 2010 (Seeckt 2008b, Seeckt 2010c) sowie dem Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2009 (Seeckt 2009c) vorgestellt (siehe Anhänge A und E).

Möglichkeiten für weiterführende Massenreduktionen der Wasserstoffversionen sind die Installation von Wasserstofftanks, welche integraler Bestandteil der Flugzeugstruktur sind sowie eine Umgestaltung des Cockpit-/Eingangsbereichs, die es ermöglicht, auf die ungenutzte Eingangsfläche hinter dem Cockpit zu verzichten.

Es bieten sich die folgenden Aufgabengebiete für weiterführende Untersuchungen an:

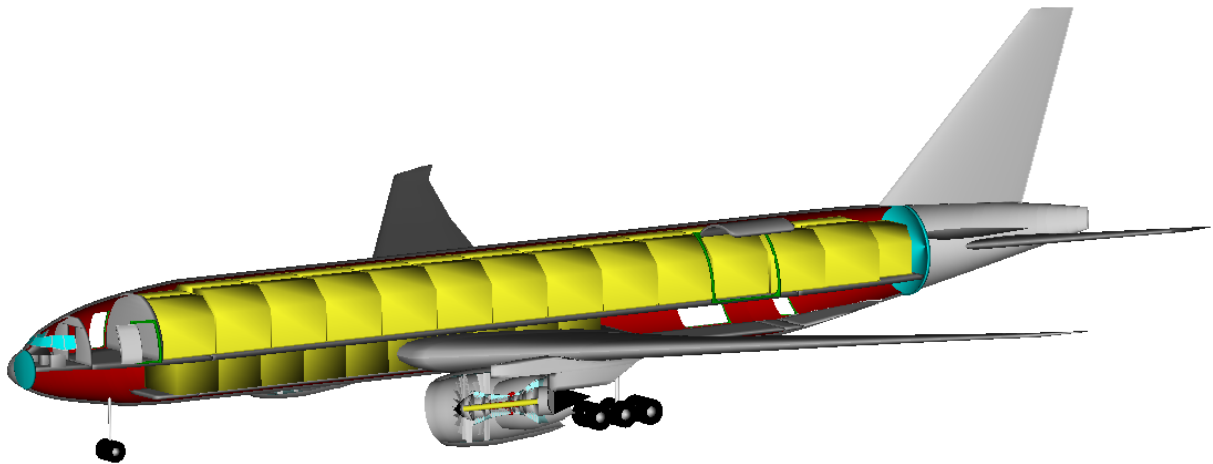
- Integration von Umweltaspekten und –kosten in bestehende Bewertungsmethoden der direkten Betriebskosten
- Integration des zusätzlichen Wartungs- und Instandhaltungsaufwands der neuen Wasserstoffsystemkomponenten in die bestehenden Betriebskostenbewertungsmethoden
- Integration einer automatischen Tank- und Systemmassenabschätzung in PrADO [Anm. d. Verf.: in Bearbeitung]
- Detailliertere Strukturanalyse, da im verwendeten Rumpf-Balkenmodell z. B. der Ausschnitt des großen Frachttors im strukturell stark belasteten Heckteil des Flugzeugs nicht berücksichtigt wird.

Weiterführende Untersuchungen könnten sich diesen Fragen stellen:

- Vergleich von Wasserstoff und Drop-in-Fuels.
- Untersuchung von Kombinationen von Antriebsvarianten (Kerosin und Wasserstoff) in einem Flugzeug. Diese Kombination könnte die Einführung der Wasserstofftechnologie in der Luftfahrt vorbereiten.
- Untersuchung von alternativen Konfigurationen (Box Wing).

#### **2.1.4 Technische Ergebnisse – Langstreckenfrachtflugzeuge in konventioneller und unkonventioneller Bauweise**

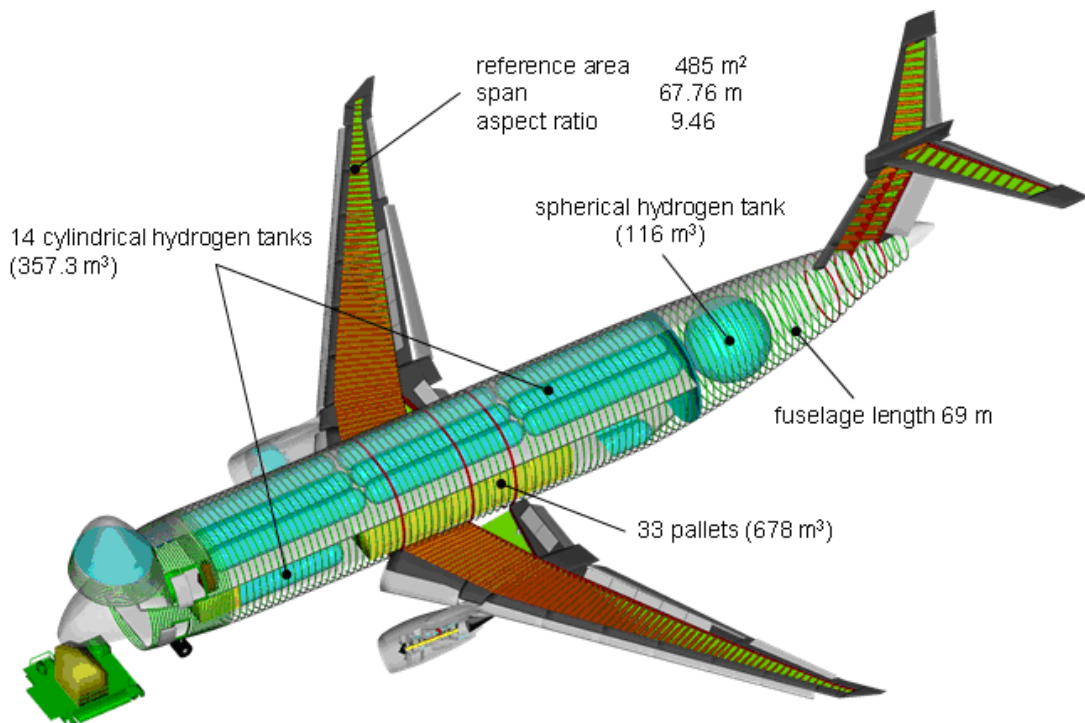
Im Vorhaben „Der Grüne Frachter“ wurden neben den beschriebenen Regionalfrachtflugzeugen ebenfalls Langstreckenfrachtflugzeuge durch das IFL in PrADO modelliert, untersucht und bewertet. Ausgangsflugzeug hierfür war das moderne und erfolgreiche Frachtflugzeug Boeing B777F, welches als PrADO-Modell im Bild 2.8 gezeigt ist.



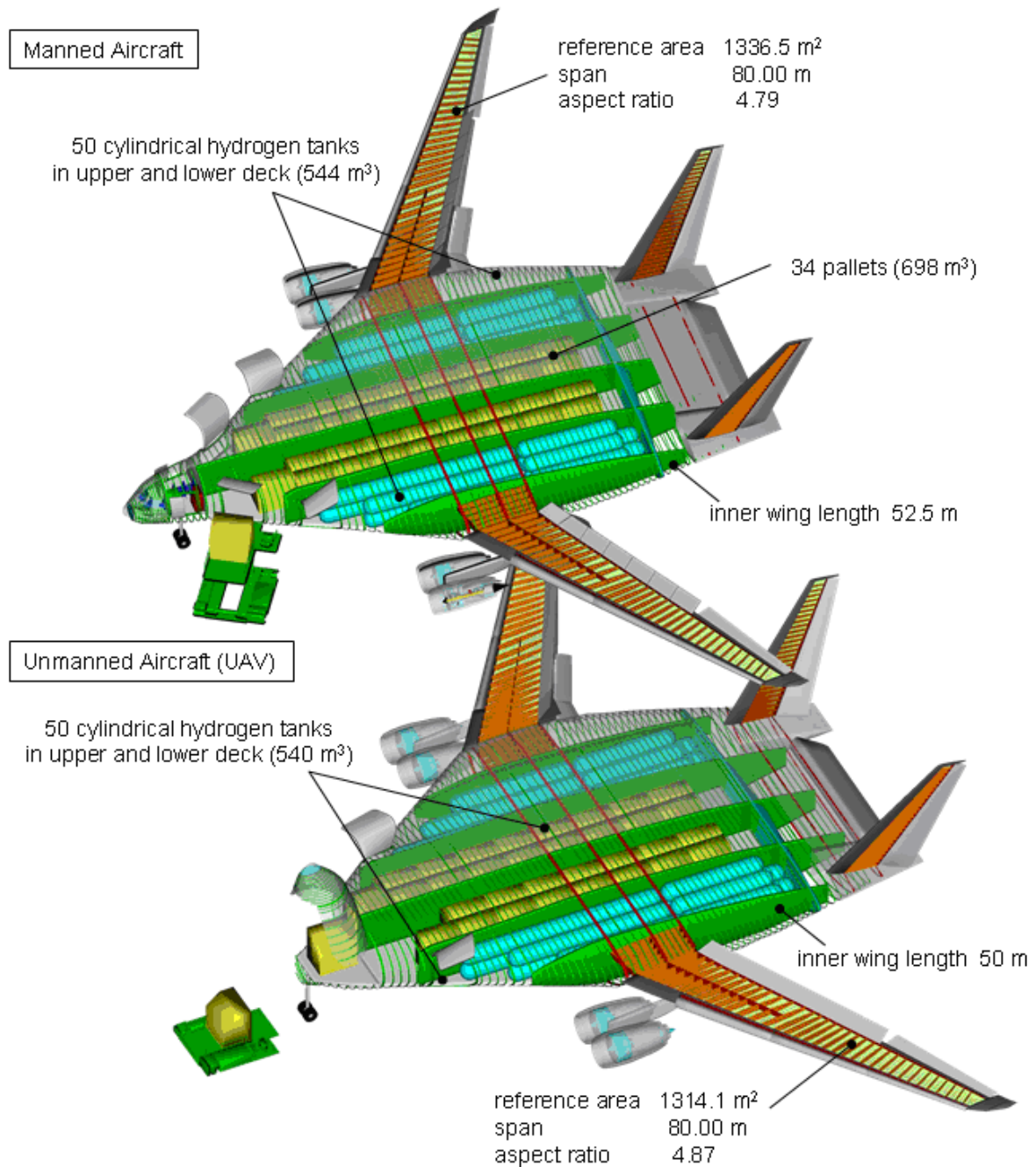
**Bild 2.8** Langstreckenfrachtflugzeuge: PrADO-Modell der Referenzversion Boeing B777F

Als Vergleich zu diesem Flugzeug, welches den heutigen Stand der Technik repräsentiert, wurden Flugzeuge in den folgenden Vergleichskonfigurationen entworfen und bewertet:

- Wasserstofffrachtflugzeug in konventioneller Konfiguration (siehe Bild 2.9)
- Wasserstofffrachtflugzeug in Blended-Wing-Body Konfiguration (BWB, siehe Bild 2.10 oben)
- unbemanntes Wasserstofffrachtflugzeug in Blended-Wing-Body Konfiguration (siehe Bild 2.10 unten)



**Bild 2.9** Langstreckenfrachtflugzeuge: PrADO-Modell des konventionellen Wasserstofffrachtflugzeugs



**Bild 2.10** Langstreckenfrachtflugzeuge: PrADO-Modelle der Wasserstoff-BWB-Versionen (bemannt: oben, unbemannt: unten)

## Ergebnisse

Die Untersuchungen der PrADO-Modelle haben zu den folgenden zentralen Erkenntnissen geführt:

- Der Betrieb von wasserstoffbetriebenen Flugzeugen in der BWB-Konfiguration ist prinzipiell möglich. Als erste reale Anwendungen für BWB-Flugzeuge erscheinen militäri-

sche Frachtflugzeuge als beste Möglichkeit, wie es beispielsweise für die X-48B (siehe Bild 1.2) angedacht ist.

- Die Reisefluggleitzahlen der BWB-Flugzeugvarianten liegen ca. 8 % über denen der konventionellen Flugzeuge. Dies bedeutet einen aerodynamischen Vorteil.
- Die Strukturmasse der BWB-Flugzeugvarianten ist trotz der 50 % größeren Flügelfläche lediglich ca. 21 % größer als die des konventionellen Wasserstoffflugzeugs. Dies zeugt von einem strukturellen Vorteil.
- Blended-Wing-Body-Flugzeuge zeigen *keine* deutliche Überlegenheit gegenüber konventionellen Wasserstoffflugzeugen. Der Grund hierfür ist ihre geringe Flächenbelastung, welche sich aus der notwendigen Mindestgröße des Flugzeugs und der geringen Kraftstoffmasse ergibt. Als Folge können BWB-Flugzeuge während des Reiseflugs nicht ihre volle aerodynamische Überlegenheit ausspielen. Eine optimierte Auslegung hinsichtlich der Reiseflughöhe könnte hier dem BWB-Flugzeug helfen.
- Die beschriebenen Effekte, die prinzipiellen Vorteile von BWB-Flugzeugen nicht voll ausnützen zu können, würden durch eine Erhöhung der Nutzlast auf 150 t oder mehr wahrscheinlich abgeschwächt und in deutlichere Vorteile umgewandelt werden.

Die Bilder 2.11 und 2.12 zeigen eine finale Gegenüberstellung der vier genannten Flugzeugtypen hinsichtlich der wichtigsten operativen Flugzeugparameter (Bild 2.11) und der Flugzeugmassen (Bild 2.12).



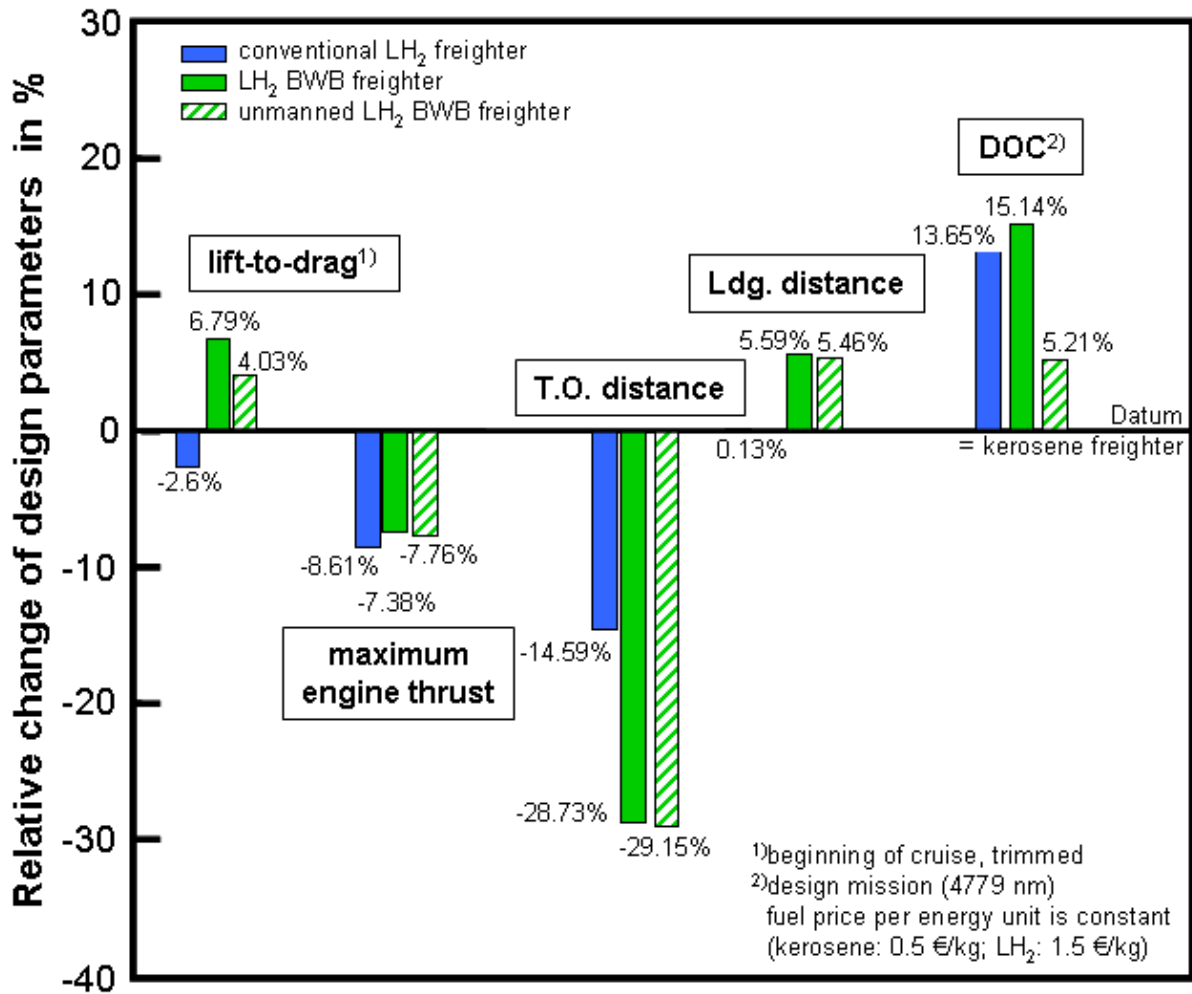
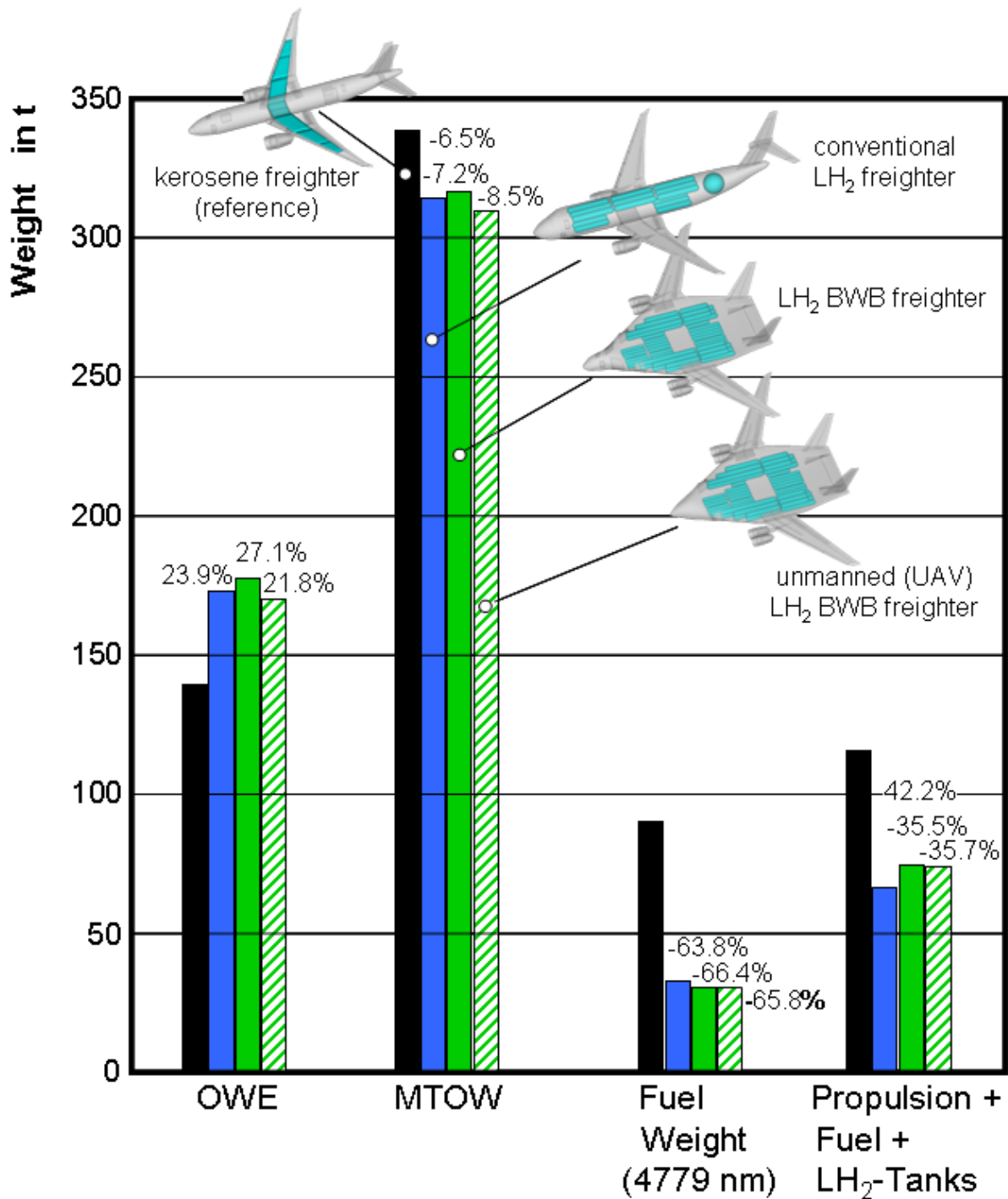


Bild 2.11

Langstreckenfrachtflugzeuge: Relativer Parametervergleich von konventioneller Wasserstoffvariante, Wasserstoff-BWB und unbemanntem Wasserstoff-BWB zu konventionellem Kerosinflugzeug



**Bild 2.12** Langstreckenfrachtflugzeuge: Relative Massevergleiche von konventioneller Wasserstoffvariante, Wasserstoff-BWB und unbemanntem Wasserstoff-BWB zu konventionellem Kerosinflugzeug

Die durchgeführten Entwurfsanalysen zeigen ein mögliches Potential der BWB-Flugzeuge zur Startmassereduktion um 6,5 % bis 8,5 % gegenüber dem konventionellen Referenzflugzeug B777F. Diese Werte beruhen hauptsächlich auf den über 60 % geringeren Treibstoffmassen, die die zusätzlichen Massen für Installationen wie Wasserstofftanks mehr als kompensieren. Aus diesen Massenvorteilen ergeben sich operationelle Vorteile, wie beispielsweise 14 % bis 28 % geringere Startstrecken, jedoch keine ökonomischen Vorteile. Selbst unter der optimisti-

schen Annahme eines energieäquivalenten Wasserstoffpreis von 1,5 €/kg (vgl. Abschnitt 2.1.3) ergeben sich ca. 15 % höhere direkte Betriebskosten für die Wasserstoffflugzeuge. Dies liegt insbesondere an der höheren Flugzeugleermasse, die in der verwendeten Betriebskostenabschätzmethode proportional in den Flugzeugpreis eingeht.

Die Modelle und Untersuchungsergebnisse werden qualitativ wie quantitativ in den Veröffentlichungen auf dem Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2009 (**Heinze 2009b**) sowie dem internationalen Luftfahrtkongress 2010 (**Seeckt 2010c**) vorgestellt (siehe Anhänge B und E). Weiterhin gehen die Zwischenberichte des IFL an den Projektpartner und Drittmittelgeber Airbus detailliert auf die Modellbeschreibungen und Bewertungen ein (**Heinze 2009a, Heinze 2009c**).

Aus den gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich die folgenden möglichen Aufgabengebiete für weiterführende Untersuchungen:

- Modellierung und Untersuchung von konventionellen Flugzeugen im Vergleich zu BWB-Flugzeugen mit einer Nutzlast von etwa 150 t oder mehr zur Überprüfung der Annahmen, dass in dieser Größenordnung die BWB-Konfiguration ihre prinzipiellen Vorteile besser ausnutzen kann.
- Erstellung von BWB-Modellen in PrADO mit weniger und dafür deutlich größeren Tanks, die zudem außerhalb der Druckkabine angeordnet sein könnten zur weiteren Massereduktion.

## 2.2 Verwendung der Zuwendung

Details über die Verwendung des Geldes im Projekt wurden bereits von der Administration zum Grünen Frachter beim Projektträger vorgelegt.

Wie in jedem ähnlichen Projekt stellen die **Personalkosten** für den Wissenschaftlichen Mitarbeiter den größten Finanzposten dar. An Studentische Hilfskräfte wurde weniger gezahlt als geplant, weil genug Studenten es vorzogen statt für Geld lieber für den Fortschritt ihres Studiums zu arbeiten. Dies wurde dann durch Projekt- und Abschlussarbeiten erreicht, die das Projekt finanziell nicht belasteten.

Es wurden zwei **spezielle PCs** angeschafft, die auf das Entwurfswerkzeug PrADO zugeschnitten waren.

Durch die aktive Veröffentlichungstätigkeit auf Kongressen fielen auch einige **Reisekosten** an. Bei jeder Reise wurde aber vom Projektleiter streng darauf geachtet, dass Transport- und Übernachtungskosten gering gehalten wurden.

Die Idee dem Projektleiter einer FH einen zeitlichen Freiraum zu schaffen für die Forschung durch **Mittel für Lehraufträge** ist eine sehr gute Idee. Die Umsetzung in der Praxis gestaltete sich aber aus zwei Gründen schwierig:

- 1.) War es in diesem Fall schwierig Lehrbeauftragte von Außen für Fächer wie Flugzeugentwurf, Flugmechanik oder Flugzeugsysteme zu finden. Die Lösung war
  - a) ein Fächertausch zwischen Kollegen und Bezahlung der Kollegen in Überstunden und
  - b) die Beauftragung von Lufthansa Technical Training für den flugzeugtypenbezogenen Teil der Vorlesung Flugzeugsysteme.
- 2.) Die administrative Umsetzung der Lehraufträge an der HAW Hamburg wurde von Teilen der Verwaltung tatkräftig unterstützt, von anderen Teilen aber angefeindet. Dies hat dann insgesamt derart viel Ärger bereitet, dass Prof. Scholz für das zweite AiF-Projekt einfach keine Lehrauftragsmittel mehr eingeworben hat.

### **2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Zur Durchführung des Projektes Grüner Frachter waren die Ausgaben notwendig und angemessen. Wie bereits ausgeführt liegt der Hauptbetrag der Ausgaben in den Personalkosten. Die Notwendigkeit der Beschäftigung eines Wissenschaftlichen Mitarbeiters für ein derartiges Projekt ist unbestritten. Die Angemessenheit seiner Bezahlung ist durch Tarifverträge bis ins Einzelne geregelt und bedarf an dieser Stelle keiner weiteren Erörterung.

Inhaltlich bestand ebenfalls eine klare Notwendigkeit für das Projekt: In wenigen Jahrzehnten wird die Welt schon ganz anders aussehen. Wir werden noch weiter die Möglichkeit zum Transport haben, jedoch dann in zunehmendem Masse unabhängig von fossilen Energien. Da die Entwurfszyklen in der Luftfahrtindustrie mehrere Jahrzehnte umfassen müssen wir heute bereits die Lösungen von morgen kennen. Es ist sowieso schon eher zu spät. Wir stehen unter Entscheidungsdruck und Handlungsdruck um die Weichen in die Richtige Richtung einer Zukunft ohne fossile Energien zu stellen. Weiterhin fordert der Klimawandel Lösungen, die das Klima möglichst wenig weiter erwärmen. Der Wasserstoff als Energiespeicher, gewonnen aus regenerativen Energiequellen wäre ein saubere Lösung.

## 2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

### HAW Hamburg

An der HAW Hamburg haben sich durch das Vorhaben „Der Grüne Frachter“ zahlreiche Nutzen und Verwertungsmöglichkeiten ergeben. So wurde auf Basis der bestehenden Tabellenkalkulation für den Flugzeugvorentwurf das Flugzeugentwurfstool „PreSTo“ geschaffen. Dieses findet am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau der HAW Hamburg bereits Anwendung im Rahmen der Vorlesung „Flugzeugentwurf“. Zudem haben sich im Zuge der Erstellung und sukzessiven Erweiterung zahlreiche Projekt- und Abschlussarbeiten für Studierende ergeben. Diese Möglichkeit für sehr praktische und anwendungsbezogene studentische Arbeiten wird auch in Zukunft weiter bestehen und noch zu einer Reihe von Erweiterungs- und Verbesserungen führen. PreSTo wurde ein eigenständiges HAW-intern gefördertes Forschungsprojekt. Siehe: <http://PreSTo.ProfScholz.de>

Über die Möglichkeit, PreSTo als eigenständiges Tool für die Lehre an der HAW anzuwenden, sind Arbeiten angelaufen, PreSTo an das Software-Paket CEASIOM (Computerised Environment for Aircraft Synthesis and Integrated Optimisation Methods) anzugliedern. CEASIOM (siehe <http://www.ceasiom.com/>) wurde im Rahmen des von der EU geförderten internationalen Forschungsvorhabens SimSAC (Simulating Aircraft Stability And Control Characteristics for Use in Conceptual Design) erstellt und wird für die sehr frühe Untersuchung von Stabilität und Steuerbarkeit im Flugzeugentwurfsprozess angewandt.

Während der Laufzeit wurde die Forschungsgruppe Aero (Aircraft Design and Systems Group) am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau der HAW Hamburg aufgebaut. Die Arbeiten und Ergebnisse des Vorhabens „Der Grüne Frachter“ haben hierzu entscheidend beigetragen.

Auf Basis der Arbeiten am Projekt „Der Grüne Frachter“ kam die kooperative Promotion des Wissenschaftlichen Mitarbeiters Dipl.-Ing. Kolja Seeckt an der HAW Hamburg und der Königlich Technischen Hochschule (KTH) Stockholm zustande. Die Promotion wird über die Laufzeit des Vorhabens weiter verfolgt. Als erstes Zwischenergebnis wurde im Herbst 2010 das sog. „Licentiatexamen“ von Herrn Seeckt abgeschlossen sein.

Über den Grünen Frachter wurde PrADO an der HAW Hamburg in der Gruppe Aero eingeführt. Im Laufe des Vorhabens wurde PrADO dann auch ein noch in weiteren Forschungsprojekten zum Einsatz gebracht. Auch in Zukunft wird Aero PrADO weiter nutzen, dies aber wohl nicht so intensiv wie für das Projekt Grüner Frachter.

Mit dem Grünen Frachter wurde in der Forschungsgruppe Aero erstmals eine Kooperative Promotion begonnen. Das hat das Arbeits- und Forschungsklima in der Gruppe sehr positiv beeinflusst.

Aus den Aktivitäten zum Grünen Frachter resultierten Einladungen an Kolja Seeckt und Prof. Scholz zu je einem Vortrag auf dem vom Bauhaus Luftfahrt organisierten EU-Workshops "1st SWAFEA Stakeholder Meeting (Brussels, Belgium, April 23/24, 2009)". SWAFEA steht für Sustainable Way for Alternative Fuels and Energy for Aviation (**SWAFEA 2010**).

Aus den Aktivitäten zum Grünen Frachter resultierte weiterhin eine Einladung zum Vortrag und als Mitglied in der Programmkommission an Prof. Scholz bei der von der HAW Hamburg organisierten Tagung "FUELLING THE CLIMATE 2010 - Klimaschutz in der Luftfahrt: Herausforderungen, Handlungsbedarf und innovative Ansätze" (**Klimaschutz 2010**).

Die Forschungsaktivitäten der Gruppe Aero - Aircraft Design and Systems Group einschließlich des Projektes Grüner Frachter haben die Akkreditierung des Masters im Flugzeugbau unterstützt.

Durch den Grünen Frachter wurden Kontakte und ein Netzwerk aufgebaut zwischen der HAW hamburg, dem IFL der TU Braunschweig, Airbus und Bishop GmbH. Weiterhin wurden die Kontakte zur KTH in Stockholm durch die begonnenen Kooperative Promotion ausgebaut. Diese Kontakte werden auch in der Zukunft belastbar bleiben.

Für die Projektpartner der HAW Hamburg haben sich durch das Vorhaben Grüner Frachter die folgenden Nutzen und Verwertungsmöglichkeiten ergeben:

### **IFL**

Die neuen Fähigkeiten von PrADO können in weitere Projekte einfließen. Die neugeschaffene Möglichkeiten der Triebwerksmodellierung (siehe Abschnitt 2.1.2) kommt bereits in einem neuen DFG-Sonderforschungsbereich des IFL zur Untersuchung von aktiven Hochauftriebssystemen zur Anwendung. Dies wäre ohne die genannten Erweiterungen nicht sofort möglich gewesen.

### **Airbus**

Airbus war von der Idee ausgegangen der BWB-Konfiguration eine maßgeschneiderte Chance als durch Wasserstoff angetriebener Frachter zu geben. Die BWB-Konfiguration konnte sich auch in dieser Anwendung gegenüber einer Konventionellen Bauart nicht klar durchsetzen. der ATR-basierte durch Wasserstoff angetriebene Frachter konnte Vorteile verbuchen. Hier hat das Projekt Grüner Frachter deutlich mehr Klarheit für Airbus gebracht hinsichtlich der strategischen Möglichkeiten. Es sind aber auch die Schwierigkeiten eines Wasserstoffflugzeugs erneut deutlich geworden. So gesehen hat der Grüne Frachter dann auch dazu beigetragen, dass die Luftfahrtindustrie heute mehr als noch vor Jahren den Drop-In-Fuel

deutlich den Vorzug gibt gegenüber dem Wasserstoff. Es ist eben viel einfacher, wenn Flugzeug und Flughafeninfrastruktur so bleiben können wie sie heute sind.

### **Bishop GmbH**

Die Firma wirbt auf Messen und im Internet mit dem Firmenbeitrag zum Grünen Frachter und konnte Fuß fassen in der Forschung. Im Luftfahrt Spitzencluster der Stadt Hamburg konnte die Bishop GmbH dann auch erfolgreich einem eigenen Forschungsantrag durchbringen.

## **2.5 Fortschritte bei anderen Stellen**

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt ist während der Projektlaufzeit des Grünen Frachters mit einer von Wasserstoff gespeisten Brennstoffzelle geflogen. Das Elektroflugzeug mit dem Namen Antares DLR-H2 absolvierte seinen Erstflug am 07.07.2009. Der Motorsegler ist eigenstartfähig (**DLR 2009**).

Später flog ein das Flugzeug RAPID-200 (Kennzeichen I-EASC) mit von Wasserstoff gespeisten Brennstoffzelle mit Elektromotor. Das Flugzeug wurde von einer Gruppe um Prof. Giulio Romeo der Politecnico di Torino im Rahmen des EU-Projektes ENFICA-FC gebaut (**Giulio 2010**).

"Für Verkehrsflugzeuge kommt die Brennstoffzelle als primäre Energiequelle für den Antrieb in absehbarer Zeit nicht in Frage" führt das DLR in **DLR 2009** aus. Es geht hier um den Nachweis der zuverlässigen Bordstromversorgung durch Brennstoffzellen.

Langsame Fortschritte wurden auf dem Gebiet der Biokraftstoffe gemacht, die den Fokus dann auch weg vom Wasserstoff lenkten. Zu nennen sind hier u.a. die Initiativen

- SWAFEA (Sustainable Way for Alternative Fuels and Energy for Aviation) in Europa (**SWAFEA 2010**) und
- CAAFI (Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative) in den USA (**CAAFI 2010**).

In beiden Gruppen geht es aber primär um den Kraftstoff und weniger um den Flugzeugentwurf passend zum Kraftstoff.

Andere Projekte von Aufsehen erregender Wirkung zum Thema wurden nicht beobachtet. Die Diplomarbeit **Schwarze 2009** der Universität Stuttgart war über Airbus ein Teil des Grünen

Frachters. Es wurden Ansätze in der Industrie verfolgt und wieder verworfen, die aber nicht in die Öffentlichkeit gelangt sind.



## 3 Zusammenfassung

### Einleitung

Das Forschungsprojekt Grüner Frachter wurde von der HAW Hamburg geführt und zusammen mit Airbus, dem Institut für Flugzeugbau und Leichtbau (IFL) der TU Braunschweig und der Bishop GmbH durchgeführt. Im Projekt ging es um Entwurfsuntersuchungen zu umweltfreundlichen und kosteneffektiven Frachtflugzeugen auch mit unkonventioneller Konfiguration. Untersucht wurden mit Wasserstoff betriebene Frachtflugzeuge als kleiner Zubringer und als großer Frachtflugzeug mit Blended Wing Body Konfiguration im Vergleich zu mit Kerosin betriebenen Frachtflugzeugen in konventioneller Konfiguration.

### Projektorganisation

Die vorgesehene Projektlaufzeit von 3 Jahren konnte durch eine kostenneutrale Verlängerung um 5 Monate ausgedehnt werden. Dies kam der sorgfältigen Bearbeitung der Aufgabe zugute. Die im Projektantrag versprochenen Ergebnisse (Deliverables) konnten erbracht werden, jedoch traten Verschiebungen zwischen den Partnern und Abweichungen in der Dokumentationsform auf (mehr studentische Arbeiten, mehr Veröffentlichungen, weniger Technische Niederschriften). Die Projektgelder wurden bis auf einen kleinen Rest ausgegeben. Der in der Vorhabensbeschreibung versprochene hohe Anteil an monetären und geldwerten Leistungen der Industriepartner von ca. 64 % des Gesamtbudgets konnte dargestellt werden. Aus dem Projekt gingen 10 Fachveröffentlichungen hervor. Die Kooperative Promotion von Kolja Seeckt zum Grünen Frachter mit der KTH Stockholm erreichte mit der Licentiate Thesis einen offiziellen Stand zur Halbzeit des Promotionsvorhabens. Durch den Grünen Frachter konnten weitere Forschungsprojekte in der Aircraft Design and Systems Group (Aero) der HAW Hamburg und bei den Projektpartnern initiiert werden. Die Erweiterung der Entwurfswerkzeuge PrADO am IFL und PreSto in der Gruppe Aero der HAW Hamburg werden weiter genutzt und sind Basis neuer Forschungsprojekte.

### Technische Ergebnisse

Die Flugzeugentwürfe lieferten folgende Erkenntnisse:

- Für Regionalflugzeuge mit einer vergleichsweise niedrigen Reiseflugmachzahl von 0,4 bis 0,5 sind Propellertriebwerke im Vorteil.
- Die Reisefluggleitzahlen der BWB-Flugzeugvarianten liegen ca. 8 % über denen der konventionellen Flugzeuge.
- Die Energieverbräuche von Wasserstoffflugzeugen sind geringer als die von Kerosinflugzeugen. Dies, zusammen mit ihren deutlich geringeren Schadstoffemissionen (kein Kohlendioxid, kein Kohlenmonoxid, keine Schwefeloxide, deutlich geringere Stick-

oxide) macht sie deutlich umwelt- und klimafreundlicher als vergleichbare Kerosinflugzeuge.

- Die Abflugmassen der Wasserstoffversionen sind um ca. 5 % geringer als die der Kerosinversionen, obwohl ihre Betriebsleermassen größer sind. Dies liegt an der deutlich geringeren Kraftstoffmasse des Wasserstoffs.
- Bei Annahme eines aus dem Kerosinpreis errechneten energieäquivalenten Wasserstoffpreises liegen die Betriebskosten der Wasserstoffversionen 1 % bis 15 % höher als die Betriebskosten der Kerosinversionen.
- Blended-Wing-Body-Wasserstoff-Flugzeuge zeigen nur eine leichte Überlegenheit gegenüber konventionellen Wasserstoffflugzeugen. Der Grund hierfür ist ihre geringe Flächenbelastung, welche sich aus der notwendigen Mindestgröße des Flugzeugs und der geringen Kraftstoffmasse ergibt. Als Folge können BWB-Wasserstoff-Flugzeuge während des Reiseflugs nicht ihre volle aerodynamische Überlegenheit ausspielen. Eine optimierte Auslegung hinsichtlich der Reiseflughöhe könnte hier dem BWB-Flugzeug helfen.

Aus dem Forschungsprojekt konnten folgende allgemeinere Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Das Ende fossiler Kraftstoffe bedeutet nicht das Ende des Fliegens. Wasserstoff kann als Energieträger genutzt und in Strahltriebwerken verbrannt werden.
- Wasserstoff ist sicher und lässt sich durch Elektrolyse einfach herstellen. Mit verschiedenen innovativen Methoden, die derzeit noch erforscht werden, soll Wasserstoff noch effizienter als durch Elektrolyse hergestellt werden. Die Energie die zur Wasserstoffproduktion erforderlich ist, würde idealerweise (oder nach dem Ende fossiler Kraftstoffe) aus regenerativen Energiequellen kommen.
- Das große Volumen des Wasserstoffs erfordert eine Speicherung im Flugzeug unter hohem Druck oder in verflüssigtem (extrem kaltem, kryogenem) Zustand. Die Verwendung von flüssigem Wasserstoff (LH2) ist davon bei großen Flugzeugen die praktikablere und sichere Variante.

Vorteile von LH2 sind:

1. Fliegen bleibt auch nach dem Ende fossiler Kraftstoffe möglich. Bereits heute ist die LH2-Technologie im Flugzeug bekannt und anwendbar.
2. Die Verbrennung von Wasserstoff ist (nach Abwägung aller Umstände) erheblich umweltfreundlicher als die von Kerosin.
3. Falls zur Erzeugung von Sekundärenergie im Flug (hier: Elektrik) die Brennstoffzelle (aufgrund hoher Wirkungsgrade) zum Einsatz kommt, dann wäre für deren Einsatz der optimale Kraftstoff (Wasserstoff) bereits an Bord verfügbar.

Nachteile von LH2 sind:

1. Herkömmliche Flugzeuge können nicht genutzt werden. Um die gleiche Nutzlast über die gleiche Reichweite zu transportieren müssen neue größere Unterbringungsräume für die (nahezu) zylindrischen LH2-Tanks gefunden werden.
2. LH2-Flugzeuge sind aufgrund der großen Tanks größer und zeigen damit einen höheren Nullwiderstand. Positiv wirkt sich jedoch aus, dass der Kraftstoff leichter ist, damit sinkt der induzierte Widerstand. Insgesamt gesehen zeigen alle untersuchten LH2-Konfigurationen (nur) leicht höhere Betriebskosten im Vergleich mit Flugzeugen, die mit Kerosin betrieben werden (bei gleichem Kraftstoffpreis pro Energieeinheit).
3. Es ist eine neue Infrastruktur am Flughafen erforderlich, um LH2 für das Flugzeug bereit zu stellen.
4. Trotz der Isolierung der Tanks erwärmt sich der Wasserstoff und wird teilweise wieder gasförmig. Im Flug kann dieser Wasserstoff verbraucht werden. Am Boden würde der Druck im Tank steigen und Wasserstoff müsste abgelassen werden. Ein betanktes Flugzeug kann also nicht einfach so auf dem Vorfeld stehen gelassen werden. Eine Betankung ist erst kurz vor dem Start sinnvoll. Der Flugbetrieb muss diesen Umstand berücksichtigen und wird damit etwas weniger flexibel.

Zu Nachteil 1.), der schwierigen Unterbringung des LH2 können aus dem Projekt Grüner Frachter folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- a) Es kann eine unkonventionelle Flugzeugkonfiguration gewählt werden. Hier bietet die voluminöse Blended Wing Body (BWB) Konfiguration Vorteile, wenn die Auslegung auf die BWB-Charakteristiken Rücksicht nimmt.
- b) Eine konventionelle Flugzeugkonfiguration (Flügel-Rumpf) sollte so realisiert werden, dass die Kraftstofftanks vorn und hinten im Rumpf untergebracht werden. Andere Anordnungen (Tanks über Kabine/Frachtraum, außenliegende Tanks, ...) sind weniger optimal.

Eher **politische Beobachtungen** konnten außerhalb des eigentlichen Arbeitsumfangs des Forschungsprojektes bei Recherchen oder Kongressbesuchen gemacht werden:

Aufgrund der Nachteile 1 und 3 wären erhebliche Investitionen in Flugzeuge und Flughafeninfrastruktur erforderlich. Daher zeigt die Luftfahrtindustrie eine große Zurückhaltung gegenüber dem Einsatz von Wasserstoff. Hoffnungen werden in Biokraftstoffe gesetzt. Biokraftstoffe können mit herkömmlichem Kerosin gemischt werden (Drop-In-Fuel). Schritt für Schritt könnten Biokraftstoffe Kerosin auch ganz ersetzen. Biokraftstoff soll aus Algen gewonnen werden auf Flächen, die nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen. Jedoch werden die Verfahren zur Kraftstoffproduktion aus Algen heute noch nicht beherrscht. Eine preiswerte Produktion im großen Maßstab ist noch nicht in Sicht (**FLIGHT 2011**). Biokraftstoff gewonnen aus einem technisch hergestellten Synthesegas

(bestehend aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid) ohne Einsatz von Pflanzen ist ein weiterer Hoffnungsträger. Dies wird z. B. an der ETH Zürich erprobt, wo das Synthesegas in einen Solar-Reaktor bei 1500 °C erzeugt wird. Bisher ist der Wirkungsgrad in der Versuchsanlage noch gering; er beträgt weniger als ein Prozent (**Chueh 2010**). Da alles danach aussieht, dass der Einstieg in die Wasserstofftechnologie in der Luftfahrt heute nicht vollzogen wird, bleibt nur zu hoffen, dass die Biokraftstoffe rechtzeitig in großer Menge und effizient bereit gestellt werden können.

Sollte der Biokraftstoff als Drop-In-Fuel für herkömmliche Flugzeug in absehbarer Zeit nicht zur Verfügung stehen, dann wäre es auch für den rechtzeitigen Einstieg der Luftfahrt in die Wasserstofftechnologie zu spät, weil dies Zeit braucht für die neuen Flugzeuge und Infrastrukturen am Boden. Eine weitgehende Durchdringung der Weltflotte mit LH2-Flugzeugen dauert Jahrzehnte bedingt durch die langen Produktzyklen in der Luftfahrt. Auch der Bau der Infrastruktur für LH2 (Versorgungswege, Tanklager, ...) erfordert viele Jahre. Alles deutet darauf hin, dass wir die Zukunft einfach auf uns zu kommen lassen werden. Hinterher sind wir dann klüger, was am besten hätte getan werden müssen.

### **Fazit**

Heute ist die Technologie bereits vorhanden, um Wasserstoff bereit zu stellen und im Flugzeug einzusetzen. Wasserstoff erfordert aber neue Flugzeuge um das große Tankvolumen aufzunehmen und eine neue Betankungsinfrastruktur. Biokraftstoffe können in heutigen Flugzeugen wie Kerosin eingesetzt werden. Jedoch ist nicht abzusehen, dass Biokraftstoffe in erforderlicher Menge zur Verfügung gestellt werden können. Wasserstoff-Flugzeuge sind etwas teurer in den Betriebskosten (bei energie-äquivalentem Kraftstoffpreis) sind aber umweltverträglicher. Ein Umstieg der Luftfahrt in die Wasserstofftechnologie muss eher heute als morgen beginnen, ansonsten werden die fossilen Kraftstoffe verbraucht sein, bevor der Umstieg gelungen ist.

## Literaturverzeichnis

### ACARE 2001

ADVISORY COUNCIL FOR AERONAUTICS RESEARCH IN EUROPE: *A Vision for 2020 – Meeting society's needs and winning global leadership*, 2001. – URL: <http://www.acare4europe.com/docs/Vision%202020.pdf> (2009-03-11), ISBN: 92-894-0559-7

### ACARE 2003

ADVISORY COUNCIL FOR AERONAUTICS RESEARCH IN EUROPE: *About us ACARE*, 2003. – URL: [http://www.acare4europe.org/html/about\\_us1.shtml](http://www.acare4europe.org/html/about_us1.shtml) (2007-07-20)

### ACARE 2009

ADVISORY COUNCIL FOR AERONAUTICS RESEARCH IN EUROPE: *Strategic Research Agenda Volume 1*, 2002. – URL: [http://www.acare4europe.com/docs/es-volume 1-2/volume1.pdf](http://www.acare4europe.com/docs/es-volume%201-2/volume1.pdf) (2009-03-11)

### AC20.30 2010

HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN HAMBURG, PROJEKT AC 20.30: Student Project AC20.30, 2010. – URL: <http://www.ac2030.de> (2010-04-29)

### ADV 2009

ARBEITSGEMEINSCHAFT DEUTSCHER VERKEHRSFLUGHÄFEN: *Fakten zum Thema: Nachtflugbetrieb*, 2009. – URL: [http://www.adv.aero/fileadmin/pdf/Wirtschaft\\_u\\_Recht/ADV-Pras\\_Nachtflug\\_2009\\_\\_Kompatibilitaetsmodu.pdf](http://www.adv.aero/fileadmin/pdf/Wirtschaft_u_Recht/ADV-Pras_Nachtflug_2009__Kompatibilitaetsmodu.pdf) (2009-03-11)

### Airbus 2007

AIRBUS: *Global market forecast 2007-2026*, 2007. – URL: <http://www.airbus.com/en/corporate/gmf/> (2009-03-03)

### Albrecht 2009

ALBRECHT, Uwe; Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH (LBST): Hydrogen technology and systems – an overview. Presentation at SWAFEA – 1st European Stakeholder Meeting (Sustainable Way for Alternative Fuels and Energy for Aviation), Brussels, 2009-04-24

### Antoine 2004

ANTOINE, Nicolas E: *Aircraft Optimization for Minimal Environmental Impact*. Stanford University, Department of Aeronautics and Astronautics, Dissertation, 2004

### ATR 2003

AVIONS DE TRANSPORT RÉGIONAL: *ATR large cargo door*, 2003. – URL: <http://www.atraircraft.com/public/atr/html/media/medias.php?aid=757> (2008-05-27)

**ATR 2005**

AVIONS DE TRANSPORT RÉGIONAL: *ATR 42-300/320 and ATR 72-200/210 - The regional way to profitability*, 2005. – URL: <http://www.atraircraft.com/public/atr/html/media/medias.php?aid=757> (2008-06-05)

**ATR 2008**

AVIONS DE TRANSPORT REGIONAL: *Regional Market Outlook 2008-2027*, 2008. – URL: <http://www.atr.fr/public/atr/html/media/downloadcenter.php> (2009-03-03)

**Babikian 2001**

BABIKIAN, Raffi: *The Historical Fuel Efficiency Characteristics of Regional Aircraft from Technological, Operational, and Cost Perspectives*. Massachusetts Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics, Master Thesis, 2001

**Bansa 2004**

BANSA, Florian: *Interaktive Parametervariation zur Einstellung eines geeigneten Stabilitätsmaßes für BWB-Flugzeugkonfigurationen*. Hamburg, Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Fachbereich Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Diplomarbeit, 2004

**Batal2009a**

BATAL, Sevgi: *Direct Operating Costs (DOC) für Frachtflugzeuge Entwicklung einer Zielfunktion zur Optimierung "grüner" Frachtflugzeuge*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Projektarbeit, 2009

**Batal 2009b**

BATAL, Sevgi: *Kraftstoffsystem für Wasserstoffflugzeuge – Systemkomponenten und Architekturen*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Bachelor-Thesis, 2009

**Batal 2010**

BATAL, Sevgi: *Auslegung des Kraftstoffsystems von wasserstoffbetriebenen Frachtflugzeugen*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Bachelor-Thesis, 2010

**Bazydlo 2010a**

BAZYDLO, Marcin: *Integration von Masse- und Aerodynamik-Abschätzmethoden für Wasserstoff-Außentanks in das Flugzeugentwurfsprogramm PrADO*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Projektarbeit, 2010

**Bazydlo 2010b**

BAZYDLO, Marcin: *Masse- und Schwerpunktberechnungen im Flugzeugentwurf mit PreSto*. Warsaw University of Technology, Faculty of Power and Aeronautical Engineering, Projektarbeit, 2010 \*

**BGR 2007**

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE: *Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2007*, 2007. – URL:

[http://www.bgr.bund.de/cln\\_101/nn\\_331182/DE/Themen/Energie/Downloads/Energiestudie\\_Kurzf\\_2007,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Energiestudie\\_Kurzf\\_2007.pdf](http://www.bgr.bund.de/cln_101/nn_331182/DE/Themen/Energie/Downloads/Energiestudie_Kurzf_2007,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Energiestudie_Kurzf_2007.pdf) (2009-03-11)

**Bhatia 2010**

BHATIA, Ramon: *Integration der Berechnungsmethode zum Hochauftrieb in die Tabellenkalkulation von PreSto*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Projektarbeit, 2010

**Blume 2009**

BLUME, Heike: Projekt "Grüner Frachter" an der HAW Hamburg. In: *Newsletter der Initiative Luftfahrtstandort Hamburg (ILSH)* (2009-01-02). - URL: <http://www.luftfahrtstandort-hamburg.de> >> Newsletter >> Archiv

**Böhm 2008**

BÖHM, Martin; Airbus Deutschland GmbH, Future Projects Office: *Analysis of the freighter turn around process*. Hamburg : Airbus Deutschland GmbH, 2008. – Firmenschrift

**Boeing 2007**

BOEING: *Current market outlook 2007-2026*, 2007. – URL: <http://www.boeing.com/commercial/cmo/freighter.html> (2007-11-16)

**Boeing 2008a**

BOEING: *Current market outlook 2008-2027*, 2008. – URL: [http://www.boeing.com/commercial/cmo/pdf/Boeing\\_Current\\_Market\\_Outlook\\_2008\\_to\\_2027.pdf](http://www.boeing.com/commercial/cmo/pdf/Boeing_Current_Market_Outlook_2008_to_2027.pdf) (2009-03-03)

**Boeing 2008b**

BOEING: *World Air Cargo Forecast 2008-2009*, 2008. – URL: <http://www.boeing.com/commercial/cargo/wacf.pdf> (2009-03-09)

**Boeing 2009a**

BOEING: *777-200LR/-300ER/-Freighter – Airplane Characteristics for Airport Planning*, 2009. – URL: <http://www.boeing.com/commercial/airports/777.htm> (2010-02-11)

**Boeing 2009b**

BOEING: *Growth in Airport Noise Restrictions*, 2009. – URL: <http://www.boeing.com/commercial/noise/restrictions.pdf> (2009-03-11)

**Böhm 2006**

BÖHM, Martin: *Gesamtentwurf eines ökonomischen und ökologischen Lufttransportsystems unter Ausnutzung von Synergieeffekten*. Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Dissertation, 2006

**Bombardier 2008**

BOMBARDIER AEROSPACE: *Commercial Aircraft Market Forecast 2008-2027*, 2008. – URL: [http://www2.bombardier.com/en/3\\_0/3\\_1/pdf/Market\\_forecast\\_Regional.pdf](http://www2.bombardier.com/en/3_0/3_1/pdf/Market_forecast_Regional.pdf) (2009-03-03)

**Bopp 2009**

BOPP, Felix: *Erweiterung des Flugzeugdimensionierungsprogramms PreSTo um Anforderungen hinsichtlich Lärm- und CO<sub>2</sub>-Emissionen*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Projektarbeit, 2009

**Bräunling 2009**

Bräunling, Willy J. G.: *Flugzeugtriebwerke: Grundlagen, Aero-Thermodynamik, ideale und reale Kreisprozesse, Thermische Turbomaschinen, Komponenten, Emissionen und Systeme*. Berlin : Springer, 2009

**Brewer 1975**

BREWER, G. Daniel; MORRIS, R. E.; et. al.; Lockheed-California Company: Volume II Final Report: Study of the application of hydrogen fuel to long-range subsonic transport aircraft. Burbank : Lockheed-California Company, 1975 (NASA Report No. NASA CR-132559).

**Brewer 1976**

BREWER, G. Daniel; MORRIS, R. E.; et. al.; Lockheed-California Company: Final report: Study of LH<sub>2</sub> fueled subsonic passenger transport aircraft. Burbank : Lockheed-California Company, 1976 (NASA Report No. NASA CR-144935).

**Brewer 1991**

BREWER, G. Daniel: *Hydrogen Aircraft Technology*. Boca Raton : CRC Press, 1991 - ISBN 0-8493-5838-8

**CAAFI 2010**

URL: <http://caafi.org> (2010-04-29)



**Chambers 2008**

CHAMBERS, Lin H.; FISCHER, Joyce D., National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center: *Contrail Education – Frequently Asked Questions*, 2008. – URL: <http://asd-www.larc.nasa.gov/GLOBE/faq.html> (2009-03-25)

**Chevron 2006**

CHEVRON CORPORATION: *Alternative Jet Fuels, Addendum 1 to Aviation Fuels Technical Review (FTR-3/A1)*, 2006. –URL: [http://www.chevronglobalaviation.com/docs/5719\\_Aviation\\_Addendum.\\_webpdf.pdf](http://www.chevronglobalaviation.com/docs/5719_Aviation_Addendum._webpdf.pdf) (2007-08-02)

**Chueh 2010**

CHUEH, William C.; STEINFELD, Aldo; et. l.: High-Flux Solar-Driven Thermochemical Dissociation of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O Using Nonstoichiometric Ceria. In: *Science*, Vol. 330, 2010-12-24, p. 1797. – <http://www.pre.ethz.ch/publications/journals/full/j236.pdf>

**Coene 2008**

COENE, Steven: *Conceptual Design of Wings and Tailplanes – Methods, Statistics, Tool Setup*. Katholieke Hogeschool Brugge–Oostende, Master-Thesis, 2008 \*

**Dielbandhoesing 2008**

DIELBANDHOESING, Denny R.: *Propeller Propulsion Systems - Investigation and Efficiency Calculation in PrADO*. Delft University of Technology, Praktikumsbericht, 2008 \*

**DLR 2004**

ATTAS als UAV erfolgreich eingesetzt, 2004. – URL: [http://www.dlr.de/dlr/News/pi\\_090704\\_ATTAS.html](http://www.dlr.de/dlr/News/pi_090704_ATTAS.html) (06-01-23)

**DLR 2010**

DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT, Institute of Aerodynamics and Flow Technology: *The VELA–Project – Very Efficient Large Aircraft*, 2010. – URL: [http://www.dlr.de/as/en/desktopdefault.aspx/tabid-188/379\\_read-636/](http://www.dlr.de/as/en/desktopdefault.aspx/tabid-188/379_read-636/) (2010-02-02)

**Dominguez 2008**

DOMINGUEZ, Roberto: *Aircraft Modeling for PrADO*. Sevilla, Escuela Superior de Ingenieros, Praktikumsbericht, 2008 \*

**EASA 2007**

EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY: *Type Certificate Data Sheet A.084 - ATR 42 - ATR 72*, 2007. – URL: [http://www.easa.eu.int/ws\\_prod/c/c\\_tc\\_aircraft.php](http://www.easa.eu.int/ws_prod/c/c_tc_aircraft.php) (2010-04-12)

**EASA 2008**

EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY: *Type Certificate Data Sheet IM E.041 – Pratt & Whitney Canada PW100 series*, 2008. – URL: [http://www.easa.eu.int/ws\\_prod/c/c\\_tc\\_engines.php](http://www.easa.eu.int/ws_prod/c/c_tc_engines.php) (2010-04-12)

**Embraer 2009**

EMBRAER: *Market Outlook 2009-2028*, 2009. – URL: <http://www.embraer.com/comercialjets.com/hotsites/market-outlook-2008/english/content/home/default.asp> (2009-03-03)

**Europäisches Parlament 2009**

EUROPÄISCHES PARLAMENT: *Emissionshandel im Luftverkehr ab 2012*, 2009. – URL: [http://www.europarl.de/presse/pressemitteilungen/quartal2008\\_3/PM\\_080708\\_1a](http://www.europarl.de/presse/pressemitteilungen/quartal2008_3/PM_080708_1a) (2009-03-11)

**Exxon Mobil 2008**

EXXONMOBIL AVIATION: *World Jet Fuel Specifications with Avgas Supplement*, 2008. – URL: [http://www.exxonmobil.com/AviationGlobal/Files/WorldJetFuelSpec2008\\_1.pdf](http://www.exxonmobil.com/AviationGlobal/Files/WorldJetFuelSpec2008_1.pdf) (2009-03-10)

**FAA 2007**

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION: *Type Certificate Data Sheet P8BO – Hamilton Sundstrand Models: 568F-1, 568F-5, 568F-7, 568F-11*, 2007. – URL: [http://www.airweb.faa.gov/Regulatory\\_and\\_Guidance\\_Library/rgMakeModel.nsf/0/F7F69B5AF75AD0378625732B0057CDE0?OpenDocument&Highlight=p8bo](http://www.airweb.faa.gov/Regulatory_and_Guidance_Library/rgMakeModel.nsf/0/F7F69B5AF75AD0378625732B0057CDE0?OpenDocument&Highlight=p8bo) (2010-04-12)

**FAA 2008**

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION: *Type Certificate Data Sheet E20NE – Pratt & Whitney Canada Models: PW118, PW123, PW125B, PW118A, PW123AF, PW126A, PW118B, PW123B, PW127, PW119B, PW123C, PW127E, PW119C, PW123D, PW127F, PW120, PW123E, PW127G, PW120A, PW124B, PW127M, PW121, PW121A*, 2008. – URL: [http://www.airweb.faa.gov/Regulatory\\_and\\_Guidance\\_Library/rgMakeModel.nsf/0/499BD75D93410FF-B862573CC007534A3?OpenDocument&Highlight=e20ne](http://www.airweb.faa.gov/Regulatory_and_Guidance_Library/rgMakeModel.nsf/0/499BD75D93410FF-B862573CC007534A3?OpenDocument&Highlight=e20ne) (2010-04-12)

**FAA 2010**

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION: *Type Certificate Data Sheet No. A53EU - Revision 19 ATR, ATR42-200, ATR42-300, ATR42-320, ATR42-500, ATR72-101, ATR72-201, ATR72-102, ATR72-202, ATR72-211, ATR72-212, ATR72-212A*, 2010. – URL: [http://www.airweb.faa.gov/Regulatory\\_and\\_Guidance\\_Library/rgMakeModel.nsf/0/5B82E73823F02134862576E9004C40EF?OpenDocument&Highlight=atr](http://www.airweb.faa.gov/Regulatory_and_Guidance_Library/rgMakeModel.nsf/0/5B82E73823F02134862576E9004C40EF?OpenDocument&Highlight=atr) (2010-04-12)

**Faaß 2001**

FAASS, R.; Airbus Deutschland GmbH: Cryoplane – Flugzeuge mit Wasserstoffantrieb. Presentation at Hamburg University of Applied Sciences, 2001-12-06. – URL: <http://www.fzt.hawhamburg.de/pers/Scholz/dgllr/hh/Veranstaltungen-2-01.html> (2010-02-23)

**FLIGHT 2011**

TRIMBLE, Stephen: In defence of biofuel. In: FLIGHT International, 2011-04-19, pp. 34

**Funke 2009**

FUNKE, Harald; Fachhochschule Aachen – Fachbereich Luft- und Raumfahrttechnik: Status and perspectives of hydrogen gas turbine systems in aviation. Presentation at SWAFEA – 1st European Stakeholder Meeting (Sustainable Way for Alternative Fuels and Energy for Aviation), Brussels, 2009-04-24

**GE 2008**

GENERAL ELECTRIC COMPANY: *Comparison Chart: Turbofans*, 2008. – URL: [http://www.geae.com/engines/commercial/comparison\\_turbofan.html](http://www.geae.com/engines/commercial/comparison_turbofan.html) (2010-02-02)

**Geppert 2009**

GEPPERT, Leah: *Aircraft Preliminary Sizing with the Design Tool of the University Linköping*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Projektarbeit, 2009

**Gerber 2008**

GERBER, Sebastian: *Abschätzung von Propellerwirkungsgraden mittels JavaProp*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Projektarbeit, 2008

**Goderis 2008**

GODERIS, Pieter-Jan: *Conceptual Design of Fuselages, Cabins and Landing Gears – Methods, Statistics, Tool Setup*. Katholieke Hogeschool Brugge–Oostende, Master-Thesis, 2008

**Golberg 2010**

GOLBERG, Alexander: *Fahrwerksauslegung im Flugzeugentwurf und Berechnung der Bodenbelastung in PreSTo*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Projektarbeit, 2010

**Grewe 2007**

GREWE, Volker; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Physik der Atmosphäre: *Climate impact of aviation* : Presentation. ERA-Net AirTN (Air-Transport-Net) - Forum on Green ATS, Bonn, 2007-10-31

**Giulio 2010**

ROMEO, Giulio; BORELLO, Fabio; CORREA, Gabriel: ENFICA-FC: Design, Realization and Flight Test of All Electric 2-Seat Aircraft Powered by Fuel Cells. In: *CD Proceedings : ICAS 2010 - 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences* (ICAS, Nizza, 19.-24. September 2010). Edinburgh, UK : Optimage Ltd, 2010. - ISBN: 978-0-9565333-0-2. Paper: ICAS2010-1.6.4 (605.pdf). Download: [http://www.icas.org/ICAS\\_ARCHIVE\\_CD1998-2010/ICAS2010/ABSTRACTS/605.HTM](http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE_CD1998-2010/ICAS2010/ABSTRACTS/605.HTM)

**Hamilton Sundstrand 2003**

HAMILTON SUNDSTRAND, Publications Department: *Component Maintenance Manual 815500, 820522 – Chapter 61-13-12*. Windsor Locks : Hamilton Sundstrand Corporation, 2003. – Firmenschrift

**Hansen 2008**

HANSEN, Lars U.; HEINZE, Wolfgang; HORST, Peter: Blended Wing Body Structures in Multidisciplinary Pre-Design. In: *Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 36 (2008), S. 93-106

**Heinze 2001**

HEINZE, Wolfgang; ÖSTERHELD, Claudia M.; HORST, Peter: *Multidisziplinäres Flugzeugentwurfsverfahren PrADO – Programmwurf und Anwendung im Rahmen von Flugzeug-Konzeptstudien*. DGLR Jahrestagung, Hamburg, DGLR-Jahrbuch 2001 Band III, 2001

**Heinze 2004**

HEINZE, Wolfgang: *Beschreibung der im Entwurfsprogramm PrADO verwendeten DOC-Berechnungsmethode als Diskussionsgrundlage für die Bewertung eines modularen Flugzeugkonzeptes*. Technische Universität Braunschweig, Institut für Flugzeugbau und Leichtbau, Work Package Description “LuFo III-Verbundvorhaben K2020, Arbeitspaket „Kosteneffizientes Verkehrsflugzeug“, 2004

**Heinze 2009a**

HEINZE, Wolfgang; HANSEN, Lars U.; WERNER-SPATZ, Christian: *AiF-Projekt mit Unterstützung durch Airbus Deutschland GmbH – Entwurfsuntersuchungen zu umweltfreundlichen und kosteneffektiven Frachtflugzeugen mit unkonventioneller Konfiguration; Bericht – Zeitraum: 01.01.2007 – 31.12.2008*. Technische Universität Braunschweig, Institut für Flugzeugbau und Leichtbau, Forschungszwischenbericht, 2009

**Heinze 2009b**

HEINZE, Wolfgang; WERNER-SPATZ, Christian; HORST, Peter: Gesamtentwurfsuntersuchungen zu BWB-Frachtflugzeugen mit alternativen Treibstoffen. In: *DGLR: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2009* (DLRK, Aachen, 01.-04. September 2009).

**Heinze 2009c**

HEINZE, Wolfgang; WERNER-SPATZ, Christian: *AiF-Projekt mit Unterstützung durch Airbus Deutschland GmbH – Entwurfsuntersuchungen zu umweltfreundlichen und kosteneffektiven Frachtflugzeugen mit unkonventioneller Konfiguration; Bericht – Zeitraum: 01.01.2009 – 31.12.2009*. Technische Universität Braunschweig, Institut für Flugzeugbau und Leichtbau, Forschungsabschlussbericht, 2009

**Heinze 2010**

URL: <http://www.ifl.tu-braunschweig.de/data/forschung/flugzeugbau/wolfgang.php>  
(2010-04-29)

**Herda 2008**

HERDA, Sebastian V.: *Methodisches Entwerfen von Verkehrsflugzeugen mit PrADO*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Projektarbeit, 2008

**Hoffmann 2010**

HOFFMANN, Peter: New Study Examines Regional & Intercontinental H2-Fueled Transport Planes. In: *Hydrogen & Fuel Cell Letter*, Band XXV (2010), Nummer 4 (April), S. 4-6. - ISSN 1080-8019. Online Ausgabe: URL: <http://www.hfcletter.com/Content/TransportPlanes.aspx>  
(2010-04-03).

**Howe 2005**

HOWE, Denis: *Aircraft Conceptual Design Synthesis*. London : Professional Engineering Publishing, 2005

**IATA 2008**

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION: *IATA 2007 Report on Alternative Fuels*, 2008. – URL: [http://www.iata.org/whatwedo/environment/climate\\_change.htm](http://www.iata.org/whatwedo/environment/climate_change.htm) (2009-06-25)

**IATA 2009a**

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION: *Jet Fuel Price Currency Comparison*, 2009. – URL: [http://www.iata.org/whatwedo/economics/fuel\\_monitor/price\\_development.htm](http://www.iata.org/whatwedo/economics/fuel_monitor/price_development.htm) (2009-04-03)

**IATA 2009b**

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION: *Some Debunking Persistent Myths about Air Transport and the Environment*, 2009. – URL: [http://www.iata.org/whatwedo/environment/climate\\_change.htm](http://www.iata.org/whatwedo/environment/climate_change.htm) (2009-06-25)

**IATA 2009c**

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION: *Fact Sheet: IATA Technology Roadmap for Environmental Improvement*, 2009. – URL: [http://www.iata.org/pressroom/facts\\_figures/](http://www.iata.org/pressroom/facts_figures/) (2009-06-25)

**IFL 2010**

URL: <http://www.ifl.tu-braunschweig.de> (2010-04-29)

**IPCC 1999**

PENNER, Joyce E.; LISTER, David H.; GRIGGS, David J. et. al. (Bearb.); Intergovernmental Panel on Climate Change: *Aviation and the Global Atmosphere – Summary for Policy Makers*. Geneva : International Panel on Climate Change, 1999. – URL: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/aviation/index.htm>

**IPCC 2007a**

ALLEY, Richard; BERNTSENN Terje; BINDOFF, Nathaniel L. et. al. (Bearb.); Intergovernmental Panel on Climate Change: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis – Summary for Policy Makers*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva : International Panel on Climate Change, 2007

**IPCC 2007b**

PACHAURI, R.K.; JALLOW, Bubu; Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis : Presentation of Working Group I Contribution to the IPCC Fourth Assessment Report*. Nairobi, 2007-02-06 – URL: [http://www.ipcc.ch/present/WMEF\\_FINAL.ppt](http://www.ipcc.ch/present/WMEF_FINAL.ppt)

**Jackson 2007**

JACKSON, Paul (Bearb.): *Jane's All the World's Aircraft 2007- 2008*. Jane's Information Group, 2007

**Jackson 2008**

JACKSON, Paul (Bearb.): *Jane's All the World's Aircraft 2008-2009*. Jane's Information Group, 2008

**Jessen 2009**

JESSEN, Benjamin: *Integration eines Moduls zur Abbildung eines Propellertriebwerks in das Flugzeugentwurfsprogramm PrADO*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Projektarbeit, 2009

**Kiesel 2007**

KIESEL, TORSTEN: *Methodisches Entwerfen von Verkehrsflugzeugen mit PrADO*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Projektarbeit, 2007

**Kossira 1990**

KOSSIRA, HORST; HEINZE, WOLFGANG: *Untersuchung über die Auslegungsgrenzen zukünftiger Transportflugzeuge*. DGLR Jahrestagung, Friedrichshafen, DGLR-Jahrbuch 1990, 1990.

**Kresse 2006**

KRESSE, NICOLAI: VELA – Very Efficient Large Aircraft : presentation. Paper presented at Aeronautics Days Vienna, 2006-06 – URL: [aerodays2006.org/sessions/E\\_Sessions/E1/E11.pdf](http://aerodays2006.org/sessions/E_Sessions/E1/E11.pdf) (2007-07-20)

**Kuhlmann 2009**

KUHLMANN, ANDREAS; Bauhaus Luftfahrt e.V. München: *Luftfahrt und Klimawandel – Relevanz alternativer Kraftstoffe und des EU Emissionshandels* : Präsentation. Hamburg, 2009-06-25. – URL: [http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text\\_2009\\_06\\_25\\_BioFuel.pdf](http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text_2009_06_25_BioFuel.pdf) (2010-02-02)

**Lee 2003**

LEE, STEFAN: *Konzeptionelle Untersuchung einer Flying Wing Zweideckkonfiguration*. Hamburg, Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Fachbereich Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau. Diplomarbeit, 2003

**Lenarczyk 2009**

LENARCZYK, MARCIN: *Preliminary Sizing of Propeller and Jet Aircraft - Extension of PreSto and Combination with CEASIOM*. Warsaw University of Technology, Faculty of Power and Aeronautical Engineering, Master-Thesis, 2009 \*

**Loftin 1980**

LOFTIN, LAWRENCE K.: *Subsonic aircraft: evolution and the matching of size to performance*. National Aeronautics and Space Administration, NASA Reference Publication 1060, 1980

**LTH 2008**

LTH KOORDINIERUNGSSTELLE: *Luftfahrttechnisches Handbuch. Band: Triebwerkstechnologie – Wasserstofftechnologie*. Ottobrunn : IABG, 2008 (AT 01 900-00).

**Luthra 2009**

LUTHRA, Sanjay: *Dimensionierung und Entwurf von Strahlverkehrsflugzeugen mit Statistiken – Programmentwicklung von PreSTo und Anbindung an PrADO*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Diplomarbeit, 2009

**Mainzer 2007**

MAINZER, FRÉDÉRIC: *Umweltaspekte des Luftverkehrs - Möglichkeiten der Quantifizierung von Umweltfreundlichkeit im Reiseflug*. Katholieke Hogeschool Brugge–Oostende, Projektarbeit, 2007 \*

**Malzahn 2009**

MALZAHN, Jannis: *Innovative Compartment Designs for Cargo Aircraft*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Projektarbeit, 2009

**Mattingly 1987**

MATTINGLY, Jack; HEISER, William H.; DALEY, Daniel H.: *Aircraft engine design*. New York : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1987. – ISBN: 0-930403-23-1

**Montarnal 2010**

MONTARNAL, Philippe: *Integration von Algorithmen des Flugzeugentwurfs in PreSTo - Schwerpunkt: Kabinen- und Rumpfauslegung*. Paris, École Supérieure des Techniques Aéronautiques et de Construction Automobile (ESTACA), Praktikumsbericht, 2010 \*

**Oehlke 2008**

OEHLKE, Martin: *Aerodynamik eines Wasserstoffaußentanks*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Aero - Aircraft Design and Systems Group, Mitteilung, 2008

**Oehlke 2009**

OEHLKE, Martin: *Masseabschätzung eines Wasserstoff-Außentanks für ein Turboprop- Verkehrsflugzeug*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Projektarbeit, 2009

**Österheld 2000**

ÖSTERHELD, Claudia; HEINZE, Wolfgang; HORST, Peter: *Influence of Aeroelastic Effects on Preliminary Aircraft Design*. Proceedings: ICAS-Congress 2000, Harrogate, 2000.



**Pommers 2010**

POMMERS, Martins: *Entwicklung einer Methode für die automatische Visualisierung von Flugzeugentwürfen in einem 3D-CAD-Modell auf der Basis von variablen konstruktiven Parametern*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Projektarbeit, 2010

**PWC 1993**

PRATT & WHITNEY CANADA: *Engine Specification – Model: PW127F – Spec No: 1095*. Longueuil, Quebec : Pratt & Whitney Canada Inc., 1993 (P&WC 8000 (06-93)) - Firmenschrift

**Raymer 2006**

RAYMER, Daniel P.: *Aircraft Design: A Conceptual Approach*. 4th Ed. Reston : AIAA, 2006 – ISBN 1-56347-829-3

**Rolls-Royce 2006**

ROLLS-ROYCE: *Aero Data*. Derby : Rolls-Royce plc, 2006 (VCOM11141 Issue 3). – Firmenschrift

**Roskam 1990**

ROSKAM, Jan: *Airplane Design*. Vol. 1 - 8, Ottawa, Kansas, 1990

**Roux 2007**

ROUX, Elodie: *Turbofan and Turbojet Engines*. Blagnac : Editions Elodie Roux, 2007. – ISBN: 978-2-9529380-1-3

**Salavin 2008**

SALAVIN, Lionel: *Structure and function of the aircraft design program PrADO*. Paris, École supérieure des techniques aéronautiques et de construction automobile (ESTACA), Projektarbeit, 2008 \*

**Schiktanz 2008a**

SCHICKTANZ, Daniel: *Untersuchung von Tragflügelumströmungen mittels Tornado*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Projektarbeit, 2008

**Schiktanz 2008b**

SCHICKTANZ, Daniel: *Inforapid Suchen & Ersetzen*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Aero - Aircraft Design and Systems Group, Mitteilung, 2008

**Schiktanz 2008c**

SCHICKTANZ, Daniel: *OmniPage 16*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Aero - Aircraft Design and Systems Group, Mitteilung, 2008

**Scholz 2005**

SCHOLZ, Dieter: *Flugzeugentwurf*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Skript zur Vorlesung, 2005

**Scholz 2006**

SCHOLZ, Dieter: *Grüner Frachter - Entwurfsuntersuchungen zu umweltfreundlichen und kosteneffektiven Frachtflugzeugen mit unkonventioneller Konfiguration*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Aero - Aircraft Design and Systems Group, Forschungsvorhabensbeschreibung, 2006

**Scholz 2008**

SCHOLZ, Dieter (Bearb.): *Aircraft Design*. Hamburg University of Applied Sciences, Department of Automotive and Aeronautical Engineering, Aero - Aircraft Design and Systems Group, Short Course Notes, 2008. – URL: <http://AircraftDesign.ProfScholz.de>

**Scholz 2010**

SCHOLZ, Dieter: Verringerung von Luftfahrtemissionen – Welche Vorteile bieten Wasserstoff & Co? : Vortrag. (Fuelling the Climate 2010, Hamburg, 2010-06-18)

**Scholz 2010a**

URL: <http://FE.ProfScholz.de> (2010-04-29)

**Schütte 2008**

SCHÜTTE, Gisela: Umweltschutz hoch über den Wolken. In: *DIE WELT* (2008-12-08). – Online Ausgabe: WELT ONLINE (2008-12-08). URL: [http://www.welt.de/welt\\_print/article2843148/Umweltschutz-hoch-ueber-den-Wolken.html](http://www.welt.de/welt_print/article2843148/Umweltschutz-hoch-ueber-den-Wolken.html)

**Schumann 2008**

SCHUMANN, Ulrich; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Physik der Atmosphäre: Globale Verkehrsemissionen in der freien Troposphäre und unteren Stratosphäre und ihre Klimawirkung. In: Metz, Norbert (Hrsg.): *Im Spannungsfeld zwischen CO<sub>2</sub>-Einsparung und Abgasemissionsabsenkung*, Haus der Technik Fachbuch, 92 (2008), Expert Verlag, Renningen, p. 247-263. – ISBN 978-3-8169-2806-5

**Schwarze 2009**

SCHWARZE, Malte: *Flugzeugvorentwurf Bi-Fuel-und wasserstoffbetriebener Kurzstrecken-Frachtflugzeuge*. Universität Stuttgart, Institut für Flugzeugbau, Diplomarbeit, 2009. – Angefertigt in Zusammenarbeit mit dem Projekt "Der Grüne Frachter"

**Seeckt 2007a**

SEECKT, Kolja; SCHOLZ, Dieter: *Zwischenbericht FH3-Projekt "Grüner Frachter" – Entwurfsuntersuchungen zu umweltfreundlichen und kosteneffektiven Frachtflugzeugen mit unkonventioneller Konfiguration; Berichtszeitraum: 1. Sept. 2006 – 31. Dez. 2006*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Aero - Aircraft Design and Systems Group, Forschungszwischenbericht, 2007

**Seeckt 2007b**

SEECKT, KOLJA; SCHOLZ, DIETER: Green Freighter - Requirements and Selection of Design Concepts to be Investigated. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Aero - Aircraft Design and Systems Group, Technische Niederschrift, 2007 –  
URL: [http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/Aero/GF\\_WP1\\_TN\\_Requirements-unclassified\\_2007-11-29.pdf](http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/Aero/GF_WP1_TN_Requirements-unclassified_2007-11-29.pdf) (2008-02-11)

**Seeckt 2007c**

SEECKT, KOLJA; SCHOLZ, DIETER: Green Freighter - Development of an Eco-Friendly Freighter at HAW Hamburg. In: *mobiles*, Nr. 33 (2007), Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Aero - Aircraft Design and Systems Group, S. 34-37

**Seeckt 2008a**

SEECKT, Kolja; SCHOLZ, Dieter: *Zwischenbericht FH3-Projekt "Grüner Frachter" – Entwurfsuntersuchungen zu umweltfreundlichen und kosteneffektiven Frachtflugzeugen mit unkonventioneller Konfiguration; Berichtszeitraum: 1. Jan. 2007 – 31. Dez. 2007*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Aero - Aircraft Design and Systems Group, Forschungszwischenbericht, 2008

**Seeckt 2008b**

SEECKT, Kolja; HEINZE, Wolfgang, SCHOLZ, Dieter: The Green Freighter Project – Objectives and First Results. In: *CD Proceedings : ICAS 2008 - 26th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences including the 8th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference* (Anchorage, Alaska, USA, 14-19 September 2008). Edinburgh, UK : Optimage Ltd, 2008. - Paper: ICAS 2008-4.10.3 (056.pdf), ISBN: 0-9533991-9-2

**Seeckt 2008c**

SEECKT, Kolja; SCHOLZ, Dieter: Der Grüne Frachter. In: *Ingenieurspiegel* (2008), 1, S. 8 - 15

**Seeckt 2009a**

SEECKT, Kolja; SCHOLZ, Dieter: *Zwischenbericht FH3-Projekt "Grüner Frachter" – Entwurfsuntersuchungen zu umweltfreundlichen und kosteneffektiven Frachtflugzeugen mit unkonventioneller Konfiguration; Berichtszeitraum: 1. Jan. 2008 – 31. Dez. 2008*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Aero - Aircraft Design and Systems Group, Forschungszwischenbericht, 2009

**Seeckt 2009b**

SEECKT, Kolja: The Green Freighter Project : Vortrag. Brüssel, 2009-04-24. SWAFEA – 1st European Stakeholder Meeting (Sustainable Way for Alternative Fuels and Energy for Aviation), Brüssel, 23.- 24.04.2009.

**Seeckt 2009c**

SEECKT, Kolja; SCHOLZ, Dieter: Jet versus Prop, Hydrogen versus Kerosene for a Regional Freighter Aircraft. In: DGLR: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2009 : Tagungsband - Ausgewählte Manuskripte* (DLRK, Aachen, 01.-04. September 2009). - ISBN: 978-3-932182-63-4

**Seeckt 2009d**

SEECKT, Kolja; KRAMMER, Philip; SCHOLZ, Dieter; SCHWARZE, Malte: Mitigating the Climate Impact of Aviation – What does Hydrogen Hold in Prospect? *Klima 2009 - Die weltweite klimaneutrale wissenschaftliche Klimakonferenz* (Klima 2009, Online: [www.klima2009.net](http://www.klima2009.net), 02.-06. November 2009)

**Seeckt 2009e**

SEECKT, Kolja: *Berechnung des Propellerwirkungsgrades*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Aero - Aircraft Design and Systems Group, Technische Niederschrift, 2009

**Seeckt 2010a**

SEECKT, Kolja; SCHOLZ, Dieter: *Schlussbericht FH3-Projekt "Grüner Frachter" – Entwurfsuntersuchungen zu umweltfreundlichen und kosteneffektiven Frachtflugzeugen mit unkonventioneller Konfiguration; Laufzeit: 1. Sept. 2006 – 30. Apr. 2010*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Aero - Aircraft Design and Systems Group, Forschungsabschlussbericht, 2010

**Seeckt 2010b**

SEECKT, Kolja; SCHOLZ, Dieter: Application of the Aircraft Preliminary Sizing Tool PreSTo to Kerosene and Liquid Hydrogen Fueled Regional Freighter Aircraft. In: DGLR: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2010* (DLRK, Hamburg, 31. August - 02. September 2010)

**Seeckt 2010c**

SEECKT, Kolja; HEINZE, Wolfgang; SCHOLZ, Dieter: Hydrogen Powered Freighter Aircraft – The Final Results of the Green Freighter Project. In: *ICAS 2010 - 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences* (Nizza, Frankreich, 19. - 24. September 2010)

**Seeckt 2010d**

SEECKT, Kolja; SCHOLZ, Dieter: *Der Grüne Frachter - Unkonventionelle Frachtflugzeuge*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Festschrift 75 Jahre Flugzeugbau in Hamburg, 2010

**Seeckt 2010e**

SEECKT, Kolja; KRAMMER, Philip; SCHOLZ, Dieter; SCHWARZE, Malte: Mitigating the Climate Impact of Aviation – What does Hydrogen Hold in Prospect? In: LEAL FILHO, Walter (Bearb.): *The Economic, Social and Political Elements of Climate Change*. Berlin : Springer, 2010

**Sefain 2006**

SEFAIN, Michael J.: *Hydrogen Aircraft Concepts & Ground Support*. Cranfield University, School of Engineering, Dissertation, 2006

**Slingerland 2008**

SLINGERLAND, Ronald; ZANDSTRA, Sijmen; SCHOLZ, Dieter; et al.: Green Freighter Systems. In: *AIAA: 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (Reno, NV, 07.-10. January 2008). Reston, VA : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2008. - Paper: AIAA-2008-146 –  
URL: [http://pdf.aiaa.org/preview/CDReadyMASM08\\_1065/PV2008\\_146.pdf](http://pdf.aiaa.org/preview/CDReadyMASM08_1065/PV2008_146.pdf)

**Sperling 2009**

SPERLING, Linda: Grüner Frachter. In: *impetus* (2009), Nr. 10, S. 38-39. - URL: <http://www.haw-hamburg.de/4416.html>

**Steiner 2001**

STEINER, Jörg: *Umrüstung eines Großraumverkehrsflugzeugs für den Betrieb mit flüssigem Wasserstoff unter Vermeidung konfigurative Änderungen*. Technische Universität Berlin, Institut für Luft- und Raumfahrt, Diplomarbeit, 2001

**Stern 2007**

STERN, Nicholas: *The economics of climate change – The Stern review*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007

**Svensson 2005**

SVENSSON, Fredrik: *Potential of Reducing the Environmental Impact of Civil Subsonic Aviation by Using Liquid Hydrogen*. Cranfield University, School of Engineering, Dissertation, 2005

**Talkingproud 2007**

MAREK, Ed: *Blended Wing X-48B has flown*, 2007. – URL: <http://www.talkingproud.us/ScienceBlendedWing.html> (2010-04-29)

**Torenbeek 1988**

Torenbeek, Egbert: *Synthesis of Subsonic Airplane Design*. Delft : Delft University Press, 1988

**Torenbeek 2005**

TORENBEEK, Egbert (Bearb.); DECONINCK, H. (Bearb.): *Innovative Configurations and advanced Concepts for Future Civil Aircraft*. Rhode Saint Genèse, Belgien : Von Karman Institute for Fluid Dynamics, 2005 (Lecture Series 2005-06). – ISBN 2-930389-62-1

**Tupolev 2010**

PSC TUPOLEV: *Cryogenic aircraft – Development of cryogenic fuel aircraft*, 2010. – URL: <http://www.tupolev.ru/English/Show.asp?SectionID=82&Page=1> (2010-02-23)

**Upham 2003**

UPHAM, Paul; MAUGHAN, Janet, RAPER, David; et. al. (Bearb.): *Towards sustainable aviation*. London : Earthscan, 2003. – ISBN: 1-85383-818-7

**Verbeke 2008a**

VERBEKE, Jon: *Study and Assessment of the Results of the Reference Aircrafts of the Cryoplane Project*. Delft University of Technology, Mitteilung, 2008 \*

**Verbeke 2008b**

VERBEKE, Jon: *Comparison of various concepts Cryoplane*. Delft University of Technology, Mitteilung, 2008 \*

**Verbeke 2008c**

VERBEKE, Jon: *Cryoplane Long Range Version*. Delft University of Technology, Mitteilung, 2008 \*

**Verbeke 2008d**

VERBEKE, Jon: *Cryoplane Technical Data*. Delft University of Technology, Mitteilung, 2008 \*

**Verbeke 2008e**

VERBEKE, Jon: *Citavi*. Delft University of Technology, Mitteilung, 2008 \*

**Verbeke 2008f**

VERBEKE, Jon: *Study and Assessment of the Cryoplane designs*. Delft University of Technology, Praktikumsbericht, 2008 \*

**Vrydag 2007**

VRYPDAG, CHRISTOPHER: *Contributions of Air Cargo to Today's and Future Intermodal Freight Transport*. Katholieke Hogeschool Brugge–Oostende, Projektarbeit, 2007 \*

**Werner-Westphal 2008**

WERNER-WESTPHAL, Christian; HEINZE, Wolfgang; HORST, Peter: Structural Sizing for an Unconventional, Environment-Friendly Aircraft Configuration within Integrated Conceptual Design. In: *Aerospace Science and Technology (AST)*, Vol.12 (2008), No.2, S. 184-194

**Westenberger 2003**

WESTENBERGER, Andreas; Airbus Deutschland GmbH: Liquid Hydrogen Fuelled Aircraft – System Analysis, Final Technical Report. Hamburg : Airbus Deutschland GmbH, (TFR 1), 2003. – Firmenschrift; Abschlussbericht des Forschungsprojekts „Cryoplane“ (Contract No: G4RD-CT-2000-00192, Project No: GRD1-1999-10014)

**Wischhusen 2007**

WISCHHUSEN, OLIVER: *Umweltaspekte des Luftverkehrs - Möglichkeiten der Quantifizierung von Umweltfreundlichkeit im Nahbereich von Flughäfen*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Projektarbeit, 2007

**Wolf 2009**

WOLF, Sebastian: *Erweiterung des „Aircraft Preliminary Sizing Tools“ PreSTo*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Projektarbeit, 2009

**Wolter 2008**

WOLTER, Arne: *Abschätzung von Propellerwirkungsgraden mittels HamProp*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Projektarbeit, 2008

**Zandstra 2007a**

ZANDSTRA, Sijmen: *The Economic Performance of the Green Freighter*. Delft University of Technology, Literature Research/Praktikumsbereich, 2007 \*

**Zandstra 2007b**

ZANDSTRA, Sijmen: *Green Freighter, Green Systems - Systems Optimized for Freighters and their Economic Performance*. Delft University of Technology, Master-Thesis, 2007 \*

- \* Diese Arbeiten wurden an der HAW Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Aero - Aircraft Design and Systems Group erstellt. Die Kooperation mit der ausländischen Hochschule kam über das EU Programm ERASMUS zustande, das dem Studentenaustausch dient.

**Ablage der Ergebnisse aus dem Grünen Frachter im Internet**

Die Referenzen verzichten auf die Angabe der Fundstelle im Internet, wenn es sich um Ergebnisse handelt, die an der HAW Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Aero - Aircraft Design and Systems Group erstellt wurden. Diese Arbeiten sind auf der Homepage von Prof. Scholz abgelegt:

**<http://www.ProfScholz.de>**

Die Unterseite zum Grünen Frachter mit allen Veröffentlichungen:

**<http://GF.ProfScholz.de>**

Berichte zum Grünen Frachter:

[http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/Aero/Reports\\_at\\_Aero.html#GF](http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/Aero/Reports_at_Aero.html#GF)

Projekt- und Abschlussarbeiten der Studenten sind hier abgelegt und gekennzeichnet als Projekte aus dem Grünen Frachter:

**<http://Bibliothek.ProfScholz.de>**

Einige Berichte sind nur mit Passwort zugänglich und auf dem FTP-Server abgelegt:

<ftp://141.22.16.186>



## **Anhang A**

**Veröffentlichung „Jet versus Prop, Hydrogen versus Kerosene for a Regional Freighter Aircraft“**

**Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2009  
(Seeckt 2009c)**

**Auf:**

**<http://GF.ProfScholz.de>**

**Direktzugriff:**

**[http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/GF/GF\\_Paper\\_DLRK\\_09-09-08.pdf](http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/GF/GF_Paper_DLRK_09-09-08.pdf)**

## **Anhang B**

**Veröffentlichung „Gesamtentwurfsuntersuchungen  
zu BWB-Frachtflugzeugen mit alternativen Treib-  
stoffen“**

**Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2009  
(Heinze 2009b)**

**Auf:**

**<http://GF.ProfScholz.de>**

**Direktzugriff:**

**[http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/GF/GF\\_Paper\\_DLRK\\_09-09-08\\_Heinze.pdf](http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/GF/GF_Paper_DLRK_09-09-08_Heinze.pdf)**

## **Anhang C**

**Veröffentlichung „Mitigating the Climate Impact of Aviation – What does Hydrogen Hold in Prospect?“**

**Klima 2009 - Die weltweite klimaneutrale wissenschaftliche Klimakonferenz (Seeckt 2009d)**

**Auf:**

**<http://GF.ProfScholz.de>**

**Direktzugriff:**

**[http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/GF/GF\\_Paper\\_Klima2009\\_09-11-02.pdf](http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/GF/GF_Paper_Klima2009_09-11-02.pdf)**

## **Anhang D**

**Veröffentlichung „Application of the Aircraft Preliminary Sizing Tool PreSTo to Kerosene and Liquid Hydrogen Fueled Regional Freighter Aircraft“**

**Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2010  
(Seeckt 2010b)**

**Auf:**

**<http://GF.ProfScholz.de>**

**Direktzugriff:**

**[http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/PreSTo/PreSTo\\_PUB\\_DLRK\\_10-08-31.pdf](http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/PreSTo/PreSTo_PUB_DLRK_10-08-31.pdf)**



## **Anhang E**

**Veröffentlichung „Hydrogen Powered Freighter Aircraft – The Final Results of the Green Freighter Project“**

**ICAS 2010 - 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (Seeckt 2010c)**

**Auf:**

**<http://GF.ProfScholz.de>**

**Direktzugriff:**

**[http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/GF/GF\\_Paper\\_ICAS\\_10-09-19.pdf](http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/GF/GF_Paper_ICAS_10-09-19.pdf)**