

Liebe Leserin, lieber Leser,



hinter uns liegt ein „Jahrhundert der Luftfahrt“: von den Anfängen Otto Lilienthals bis zum modernen Großraumjet, wie dem neuen Airbus A380, fand eine stürmische Entwicklung statt. Die Konfiguration der Flugzeuge durchlief dabei viele Evolutionsstadien, die immer wieder durch neue Erfindungen und Pionierleistungen geprägt waren. Meilensteine waren z.B. die Einführung der Strahltriebwerke, das Überschallflugzeug, die „fly-by-wire“ Flugsteuerung oder die Faserverbundbauweise. Parallel dazu entwickelte sich das Luftverkehrssystem, von der einfachen Graspiste zum international operierenden Großflughafen, vom auf sich selbst gestellten Flugpionier zur Airline, vom Platzwart zur Flugsicherung mit optimierten Prozessen.

Seit einiger Zeit scheint diese stürmische technische Entwicklung in eine Art Sättigungsphase gekommen zu sein: Fluggeräte, Flughäfen und Prozesse verändern sich in ihrer Konfiguration kaum noch, die Entwicklung konzentriert sich eher auf die Optimierung in Teilsystemen. Revolutionäre Veränderungen finden dagegen im wirtschaftlichen oder politischen Bereich statt. Beispiele sind die erfolgreichen neuen

Geschäftsmodelle der Billigfluglinien, sowie die weitere Liberalisierung und Internationalisierung des Luftverkehrs. Dies übt einen zunehmenden Druck auf die etablierten Systempartner aus, wie die vielen Insolvenzen insbesondere amerikanischer Fluglinien zeigen. Parallel dazu erfährt der Luftverkehr ein ungebrochenes Wachstum. Das führt zunehmend zu Engpässen im Luftraum sowie an den großen Hubs wie Frankfurt. Gleichzeitig werden die Umwelteinflüsse des Luftverkehrs, wie Lärm und Emissionen, als zunehmend negativ empfunden.

Für die Forschung bedeutet das, dass in allen Disziplinen wieder ganz neue Ideen und Ansätze gefunden werden müssen, um Kapazität, Sicherheit, Komfort, Effizienz und Umweltverträglichkeit des Luftverkehrs zu steigern. Dazu kann die TU Darmstadt mit ihren stark interdisziplinären Luftfahrtkompetenzen, die u.a. im Arbeitskreis Luftverkehr (siehe unten) gebündelt sind, einen bedeutenden Beitrag leisten.

Uwe Klingauf

13. Kolloquium Luftverkehr

Technologieentwicklung im Luftverkehr – Das Beispiel A 380

WS 2005/2006 Programm

- 07.12.2005 Anforderungen des A 380 an die Flughäfen
Michael Schwarz • Fraport AG
- 11.01.2006 Zulassungsanforderungen und Testprogramme für den A 380
Wolfgang Engler • Airbus SAS
- 18.01.2006 The A 380 Transport Project and Logistics
Jesus Morales • Airbus SAS
- 25.01.2006 Advanced Aircraft Technologies – The Boeing Perspective
Eric Schwartz • The Boeing Company
- 01.02.2006 Strategic Options for Airlines in Aircraft Procurement
Clive Clemson • Emirates
- 08.02.2006 Flugzeugelektrik als technologische und industrielle Herausforderung am Beispiel des A 380
Christoph Zammert • Airbus SAS

Die öffentlichen Veranstaltungen finden jeweils von 17:15 bis 18:45 Uhr statt.

Veranstaltungsort: Staatsarchiv Darmstadt, Karolinenplatz

Arbeitskreis Luftverkehr der Technischen Universität Darmstadt

www.tu-darmstadt.de/akl

Inhaltsverzeichnis

Intermodalität an Flughäfen – Überblick und Erfahrungen

Manfred Boltze/Susanne Scherz

Bequem bereits im Zug einchecken, komfortabler Gepäcktransport, perfekter Umstieg von der Bahn ins Flugzeug: Was bremst die Erfüllung dieser Wünsche mobiler Kunden?

Seite 4

Die Raumdimension des Luftverkehrs

Martina Löw

An jeden Fleck der Erde binnen Stunden gelangen zu können, bedeutet keineswegs den „Verlust von Distanz“. Luftverkehr individualisiert Räume, die Reisenden übersehen bewusst das „Dazwischen“.

Seite 10

Optimale kooperative Steuerung von Mehrflugzeugsystemen

Markus Glocker/Alexander Martin/Oskar von Stryk

Das stetige Wachstum des Luftverkehrs führt zu Kapazitätsengpässen an Flughäfen. Neue Ansätze zur Optimierung von Landereihenfolgen für Flughäfen versprechen Lösungen.

Seite 14

Umweltfreundlichere Triebwerke – Verdichter als Schlüsselkomponente

Heinz-Peter Schiffer/Jörg Bergner

Den Kerosinverbrauch drosseln, den Stickoxidausstoß vermindern, Lärm reduzieren: Die Triebwerksindustrie muss hohe Erwartungen erfüllen. Forscher arbeiten an wegweisenden Verdichtertechnologien.

Seite 20

Effizientere Verkehrsflugzeuge durch formvariable Landeklappen

Helmut Schürmann/Claus Bauer

Die Konstruktionsgrenzen für Verkehrsflugzeuge sind noch längst nicht ausgereizt: Eine variable Landeklappe aus Faser-Kunststoff-Verbunden bringt viele Vorteile.

Seite 26

Halbmodellmesstechnik in Windkanälen

Stephan Eder/Klaus Hufnagel/Cameron Tropea

Experimente mit Flugzeugmodellen werfen nicht-triviale Probleme auf: Wie lässt sich der Einfluss der spezifischen Aufhängung bei der Messung aerodynamischer Werte minimieren?

Seite 32

Stellenwert der Ersatzteillogistik in der Luftfahrt

Hans-Christian Pfohl/Michael Trumpfheller

Instandhaltung und Reparaturen sind essentielle Kostenfaktoren für Fluggesellschaften. Ersatzteile von Qualität und die Teilevielfalt beanspruchen Budgets. Poolbildung ist eine strategische Antwort.

Seite 40

Revenue Management – Instrumente zur Erlösmaximierung im Luftverkehr

Wolfgang Domschke/Robert Klein/Anita Petrick

Warum gibt es so viele unterschiedliche Ticket-Preise in der Economy Class? Und wie steuern Fluggesellschaften ihre Kapazitätsauslastung? Mathematische Planungsverfahren helfen, Erlöse zu optimieren.

Seite 46

Chauffeur oder Airman? Pilotenbilder und Technikerfahrung 1908 bis 1914

Christian Kehrt

In der Öffentlichkeit dominierte vor dem Ersten Weltkrieg der Mythos des heldenhaften Piloten. Tatsächlich aber war die Flugtechnik schon früh geprägt vom Bestreben nach Sicherheit und Kontrolle.

Seite 52

Durchblick – Synthetische Sicht für das Cockpit der Zukunft

Uwe Klingauf/Christoph Vernaleken

Neue Technologien sind nötig, um angesichts steigenden Luftverkehrs die Sicherheit zu erhöhen und Flugunfälle zu vermeiden. Ein viel versprechender Ansatz sind Synthetische Sichtsysteme für Piloten.

Seite 58

Inserentenverzeichnis

Seite 64

Impressum

thema Forschung 3/2005

Herausgeber: Präsident
der TU Darmstadt

Redaktion: Jörg Feuck

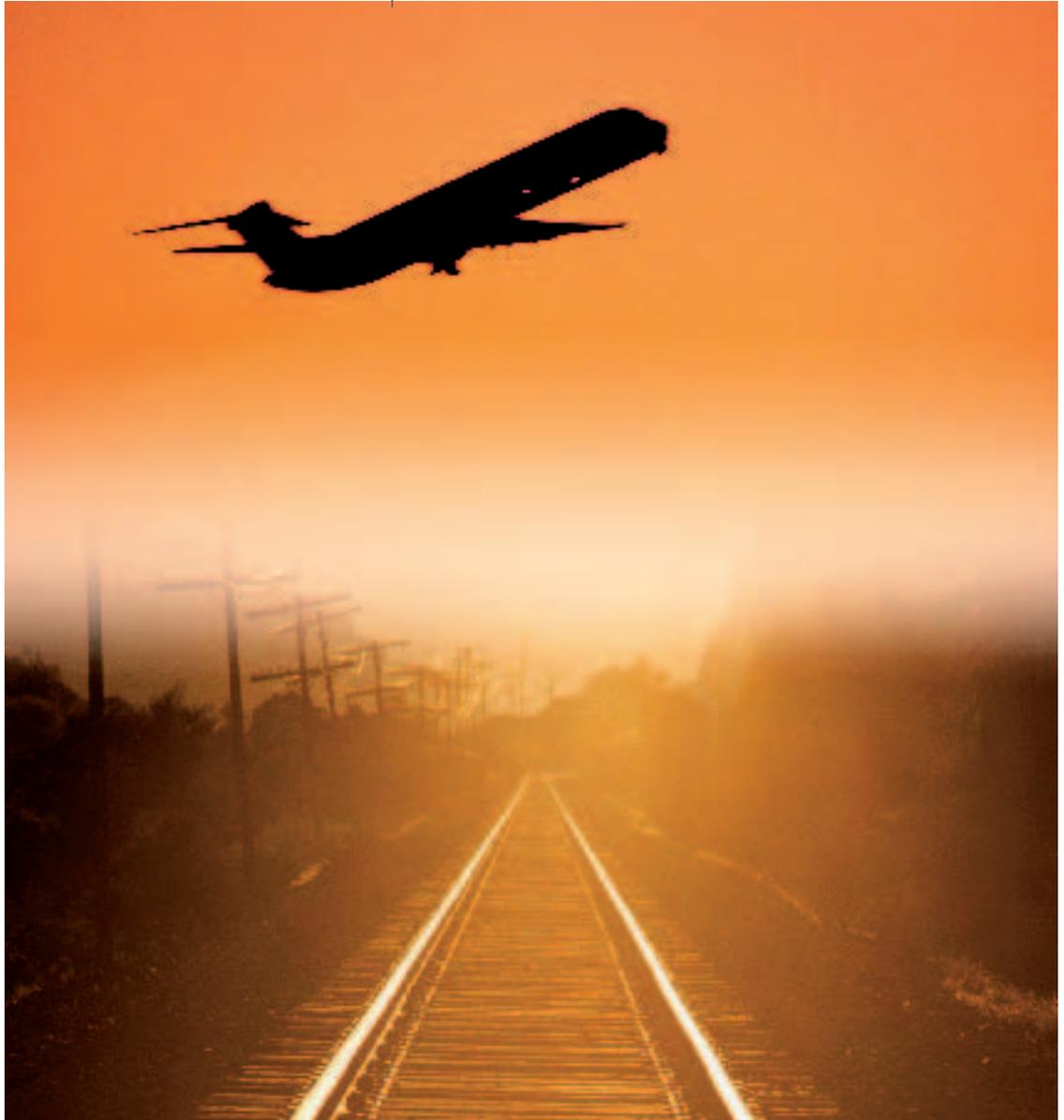
Moderation: Prof.
Dr.-Ing. Uwe Klingauf

Verlag: Verlag für Marke-
ting und Kommunikation
GmbH & Co. KG, Faber-
straße 17, 67590 Mons-
heim, Tel. 0 62 43/90 90

Layout: Kirberg Design,
Hünfelden

Druck: VMK Druckerei,
Monsheim

Titel-Bild: mit freund-
licher Genehmigung
der EADS Deutschland
GmbH (www.eads.net)



Intermodalität an Flughäfen – Überblick und Erfahrungen

Manfred Boltze/Susanne Scherz

Intermodalität an Flughäfen – das klingt vielversprechend. Insbesondere der Verknüpfung von Schienen- und Luftverkehr wird ein großes Potential bei der Lösung von Verkehrs-, Kapazitäts- und Umweltproblemen zugeschrieben. Die mit der Realisierung verbundenen Hürden werden aber oftmals unterschätzt. Intermodalität bedeutet die Vernetzung einer Vielzahl von Einzeldienstleistungen entlang der gesamten Reisekette. Dabei sind die Interessen aller beteiligten Partner zu berücksichtigen. Dieser Beitrag zeigt Anforderungen an Intermodalprodukte auf und stellt verschiedene Varianten eines Check-in außerhalb des Flughafens vor.

***Intermodality at Airports – Overview and Lessons Learned.** Intermodality at airports generates great expectations. Especially linking railway and air traffic is expected to have high potential to solve traffic, capacity, and environmental problems. But the impediments to realisation tend to be underestimated. Intermodality means not only the implementation of infrastructure, but the integration of various services along the entire travel chain. The different interests of the involved project partners must be considered. This contribution comes up with experiences at Frankfurt International Airport, and shows the requirements on intermodal products at airports and different concepts for an off-airport check-in.*

Einleitung

Die Verknüpfung von Schienen- und Luftverkehr heißt ein großes Potenzial bei der Lösung von Verkehrs-, Kapazitäts- und Umweltproblemen. Entsprechend gibt es inzwischen eine Vielzahl von Aktivitäten auf nationaler und europäischer Ebene.

Produkte für den Nahverkehr (z.B. Heathrow-, Arlanda-Express) dienen vorwiegend der Veränderung der Verkehrsmittelwahl zu Gunsten des öffentlichen Verkehrs und erhöhen den Kundennutzen. Die Entwicklung intermodaler Produkte im Fernverkehr wird vor allem von den europäischen Hub-Flughäfen vorangetrieben (z.B. Thalys-Air-France-Kooperation, AIRail Services am Flughafen Frankfurt). Diese Produkte dienen angesichts der starken Konkurrenz der Hub-Flughäfen vor allem der Erweiterung des Einzugsgebiets und der Verlagerung von Kurzstreckenflügen auf die Schiene. Auch im regionalen Bereich wird versucht, über Intermodalprodukte die Flughafeneinzugsgebiete zu sichern oder zu erweitern (z.B. Bahnhofs-Check-in in Magdeburg für den Flughafen Leipzig/Halle).

Insgesamt ist aus Sicht des Reisenden noch keine standardisierte Angebotsform erkennbar. Um zukünftige Intermodalprodukte erfolgreich zu gestalten, ist es wichtig, die Randbedingungen richtig einzuschätzen. Dazu stellt dieser Beitrag Erfahrungen am Flughafen Frankfurt in den Mittelpunkt. Grundlage ist die im Auftrag der AIRail Partner (Fraport AG, Deutsche Lufthansa AG, Deutsche Bahn Reise & Touristik AG) sowie der Rhein-Main-Verkehrsverbund (RMV) GmbH erstellte ‚Studie zur Förderung der Intermodalität am Flughafen Frankfurt‘ [4]. Eine ausführlichere Veröffentlichung zu dieser Studie ist in der Zeitschrift Internationales Verkehrswesen erschienen [3].

Anforderungen an intermodale Dienstleistungen

Intermodalität bedeutet nicht nur die Bereitstellung von Infrastruktur, sondern vielmehr die Vernetzung transportrelevanter Teilprozesse entlang der gesamten Reisekette (Bild 1). Dem Reisenden soll ein nahtloser Übergang von einem Verkehrsmittel zum nächsten ermöglicht werden.

Im Sinne eines integrierten Gesamtverkehrssystems Schiene/Luft wurden folgende maximalen Ziele formuliert:

- Der Personentransport erfolgt mit möglichst kurzen Gesamtreisezeiten und optimierten Umsteigebeziehungen. Im Idealfall werden Direktverbindungen zum/vom Flughafen angeboten. Eine zuverlässige Gesamtreise ist garantiert, d.h. Anschlüsse bzw. Reisealternativen sind sichergestellt. Der Komfortstandard orientiert sich am Service eines inner-europäischen Fluges.
- Der Gepäcktransport wird im Idealfall vom Startpunkt bis zum Zielpunkt von den Transportdienstleistern übernommen. Zumindest kann das Gepäck an zentralen Umsteigepunkten aufgegeben werden. Das Gepäck wird zuverlässig zeitgleich mit dem Passagier transportiert. Der Preis für den Gepäcktransport ist im Reisepreis enthalten.

- Ein Check-in/Check-out wird entlang der Reisekette angeboten.
- Die Tickets sind integriert, d.h. bei einer Flugbuchung wird die An- und Abreise zum/vom Flughafen mit berücksichtigt.
- Alle reiserelevanten Informationen werden verkehrsmittelübergreifend und entlang der gesamten Reisekette angeboten und sind über einen Zugriff erreichbar.
- Die Zielführung erfolgt entlang der Reisekette und ist nach verkehrsmittelübergreifend vereinbarten Standards gestaltet.
- Intermodalkunden werden bei den Sicherheitskontrollen bevorzugt behandelt.

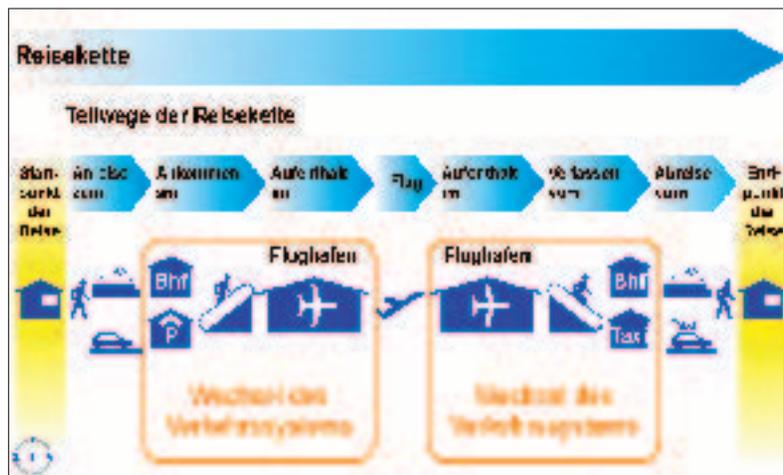
Varianten des Check-in/Check-out außerhalb des Flughafens

Ein Check-in/Check-out außerhalb des Flughafens (off-airport) ist Voraussetzung für einen hochwertigen Transport der Flugpassagiere mit der Bahn und hat deshalb hohe Bedeutung. Neben der Qualität der Transportverbindung ist der Gepäcktransport bei der Beurteilung des Komforts besonders wichtig (nach [1]). Im Folgenden werden die Analyseergebnisse ausgewählter Varianten dargestellt (nach [4]).

Die hochwertigste Check-in-Variante, abgesehen von einem Airport Express, ist der derzeit für Stuttgart und Köln Hbf angebotene AIRail Service (Bild 2 und Bild 3). Der Reisende kann den kompletten Check-in-Vorgang inkl. Gepäckaufgabe an den DB-Bahnhöfen in Anspruch nehmen. Er erhält bereits hier alle Reiseunterlagen (Bordkarte, Gepäckreceipt, Bag-Tag). Das aufgegebene Gepäck wird im ICE zeitgleich mit dem Passagier zum Flughafen Frankfurt transportiert. Dort geht der Fluggast direkt mit seinem Handgepäck zum Gate, und das Gepäck wird durch Servicepersonal von den Zügen zur Gepäckförderanlage (GFA) gebracht und dort eingespeist. Der in Frankfurt ankommende Flugreisende nimmt erst an den Zielbahnhöfen Stuttgart oder Köln das Gepäck in Empfang und passiert dort die Zollkontrolle. Der Zug-Flug-Umsteiger wird in allen Belangen wie ein Flug-Flug-Umsteiger behandelt.

Der Umfang der erforderlichen Logistik sowie die Höhe der Investitions- und Betriebskosten schränkt den AIRail Service auf wenige Bahnhöfe ein. Prinzipiell wurde daher ein AIRail Service im Zug diskutiert,

Bild 1: Schematisierte Reisekette einer Flugreise
Schematic Air Travel Chain



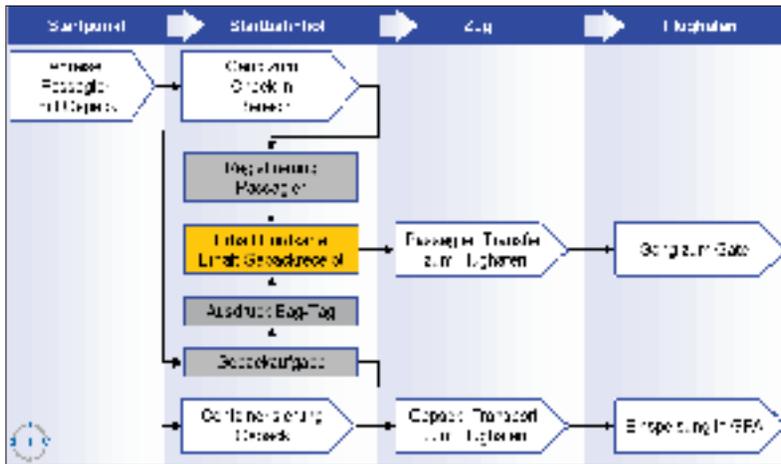


Bild 2:
AIRail Service am Bahnhof
(Abflug)

AIRail Service at the Railway Station (Departure)

dessen Realisierung allerdings nicht im Regelbetrieb der Bahn umsetzbar ist. Grundsätzlich ist der Gepäcktransport im Bahnbetrieb mit erheblichem logistischen Aufwand verbunden und somit kaum realisierbar. Daher wurden Varianten mit getrenntem Personen- und Gepäcktransport untersucht.

Das Aufstellen von Check-in-Automaten an Bahnhöfen bietet dem Reisenden zwar eine frühe Buchungssicherheit, allerdings muss zur Gepäckaufgabe am Flughafen nochmals der Schalter aufgesucht werden. Insgesamt ergibt sich hieraus ein Reisezeitnachteil. Bei einem Check-in light hingegen erhält der Reisende am Bahnhof die Bordkarte, Gate-Informationen sowie den Bag-Tag. Letzteren befestigt er selbst am Gepäck, das er eigenhändig zum Flughafen befördert. Dort gibt der Reisende das Gepäck an einer exklusiven Gepäckannahme ab. Der Gepäckreceipt wird ausgegeben, das Gepäck eingecheckt. Eine Umsetzung dieser Variante ist auch am Sitzplatz im Zug denkbar.

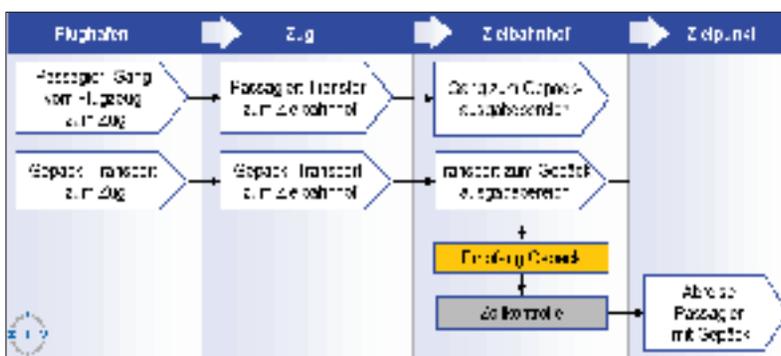
Mit der Analyse und Entwicklung der Check-in-Varianten kann ein breites Spektrum möglicher Produktgestaltungen aufgezeigt werden. Zugleich wird deutlich, dass die Realisierung oftmals mit hohem Investitionsbedarf einhergeht. Insbesondere Eingriffe in den Regelbetrieb der Bahn sind sehr aufwändig und nur bedingt realisierbar.

In Abhängigkeit von der Produktgestaltung sind vor allem folgende technischen und logistischen Aspekte zu berücksichtigen:

- Schaffung eines integrierten Buchungssystems für Flug- und Bahnreisen.
- Einrichtung von Check-in-Schaltern oder Automaten an Bahnhöfen oder im Zug, ggf. mobil im Zug.
- Gewährleistung eines manipulationssicheren Gepäcktransports von/zum Zug sowie während des Bahntransports.

Bild 3:
AIRail Service am Bahnhof
(Ankunft)

AIRail Service at the Railway Station (Arrival)



- Nutzung des Zugangebots in Abhängigkeit der DB-Trassen- und Umlaufplanung.
- Direktverbindungen als Voraussetzung für passagierbegleitenden Gepäcktransport.
- Gepäckbe- und -entladevorgang an den Bahnhöfen und am Flughafenfernbahnhof während der durch die Bahn vorgegebenen Zugaufenthaltszeiten.
- Gewährleistung eines störungsfreien Online-Datentransfers aus dem Zug zu den Datensystemen am Flughafen.
- Einrichtung von Zollkontrollen an den Zielbahnhöfen.
- Verlängerung der Gepäckförderanlage (GFA) in Nähe des Flughafenbahnhofs.
- Einrichtung von exklusiven Gepäckannahmestellen am Flughafen, Regelungen zwischen Flughafen und Airlines bzgl. der Gestaltung des Bag-Tag.

Zur Weiterentwicklung von Intermodal-Kooperationen

Die effiziente Umsetzung von Intermodalprodukten erfordert die Kooperation verschiedener Verkehrsträger. Die Kernkompetenzen der Partner sollten sich voneinander abgrenzen und gleichzeitig bei der Gestaltung des gemeinsamen Projekts ergänzen.

Tabelle 1 zeigt exemplarisch an Hand von zwei diskutierten Varianten mit Check-in außerhalb des Flughafens eine mögliche Zuordnung von zu schaffenden Voraussetzungen und Verantwortlichkeiten. Die Zuordnung orientiert sich an den jeweiligen Kernkompetenzen der Partner. Es wird ersichtlich, dass bei einer Realisierung eines Check-in light die Partner Verantwortlichkeiten übernehmen würden, die im Wesentlichen ihren Kernkompetenzen entsprechen. Hingegen würde bei der Umsetzung des AIRail Service im Zug die Bahngesellschaft mit Entwicklungs- und Personalfragen konfrontiert, die nicht dem regulären Bahnbetrieb entsprechen und somit nicht dem eigentlichen Kerngeschäft zuzuordnen sind. Für die Bahn entstünden erhebliche Kosten, die lediglich einem Teil des Fahrgastpotentials zu Gute kommen. Zudem würden die zu schaffenden Voraussetzungen die effiziente Zugumlaufplanung einschränken. Für Flughafenbetreiber und Fluggesellschaften hingegen würden Investitionen in Bereichen anfallen, die dem Kerngeschäft entsprechen. Dem erkennbar unausgeglichene Nutzen/Aufwandsverhältnis muss eine bei der Projektrealisierung vereinbarte Investitions- und Erlösaufteilung Rechnung tragen. Außerdem muss das Projekt die strategischen Ziele der einzelnen Partner unterstützen.

Eine umfassende Analyse der strategischen Positionen der einzelnen Partner [2] [4] hat gezeigt, dass die mit der Umsetzung von Intermodalprodukten verbundenen Zielvorstellungen und weiterführenden Produktstrategien nur teilweise kongruent sind. Ein dauerhafter Projekterfolg und eine stabile „Win-all“-Situation kann nicht vorausgesetzt werden, sondern muss in einem gemeinschaftlichen Ansatz gewollt und vorangebracht werden. Besonderes Augenmerk ist hierbei auf den Aspekt der Wirtschaftlichkeit zu lenken.

Fazit

Zahlreiche Diskussionen über wünschenswerte Verbesserungen bei der Verknüpfung von Schienen- und Luftverkehr bestätigen die hohe Bedeutung der Intermodalität für die zukünftige Entwicklung des Luftverkehrs. Dabei muss beachtet werden, dass Intermodalität an Flughäfen

- mehr als die Bereitstellung von Infrastruktur ist. Intermodalität bedeutet die Vernetzung einer Vielzahl von Einzeldienstleistungen entlang der gesamten Reisekette.
- aus Kundensicht einen wesentlichen Beitrag zum Abbau der Reisewiderstände leisten kann. Hochwertige Produkte sind aber mit erheblichem Aufwand verbunden.
- unter wettbewerbsstrategischen Gesichtspunkten für die Flughafenbetreiber, Flugesellschaften,

Bahnen und Aufgabenträger des ÖPNV von hohem Interesse sein kann. Hierfür muss Intermodalität aber in den unternehmensinternen Strategien und Zielvereinbarungen verankert sein.

- nur dann dauerhaft erfolgreich und effizient realisierbar ist, wenn eine kompetenzorientierte Partnerschaft mit einer „Win-all“-Situation zu Grunde liegt. Erwartungen und Widerstände der einzelnen Partner müssen analysiert und teilweise überwunden werden. Jeder Partner muss eine positive Projekttrendite erwirtschaften können.
- insbesondere im Hochgeschwindigkeitsverkehr eine Tendenz zur Zentralisierung auf die Hubflughäfen unterstützt. Mit Blick auf die Sicherung der Marktposition sind aber auch an Nicht-Hub-Flughäfen Investitionen in ‚intelligente‘ Intermodalösungen zu erwägen.

Tabelle 1:
Aufgaben bei der Realisierung eines *Check-in light* am Sitzplatz und eines *AI Rail Service* im Zug
Tasks for the Realisation of a Check-in Light at Seat and for the AI Rail Service on Train

	Flughafenbetreiber	Airline	Bahnunternehmen
Mobiles Check-in Gerät	●	●	●
Bag-Tag Handling	●	●	●
Gepäckannahmeschalter on-airport	●	●	●
Check-in Facilities im Zug	●	●	●
Facilities Gepäcktransport im Zug	●	●	●
Check-out Facilities im Zug	●	●	●
Direktverbindungen	●	●	●
Datenübertragung Zug – Flughafen	●	●	●
Integr. Buchungssystem Bahn/Flug	●	●	●
Ausbau GFA/Gepäcktransport on-airport	●	●	●

Legende: ● zu schaffende Voraussetzung für ● Check-in light am Sitzplatz
● AIRail Service im Zug

Literatur

- [1] Fakiner, H., Heym, A., 1999, *European Traveler Care Service – Eurotracs*. Frankfurt.
- [2] Pousttchi, P., 2001, *Kompetenzorientiertes strategisches Management intermodaler Verkehrsdienstleistungen durch Kooperationen*. Dissertation. Lehrstuhl für allgemeine BWL und Marketing an der Universität Mainz.
- [3] Scherz, S., Fakiner, 2003, *Intermodalität am Flughafen Frankfurt*. Internationales Verkehrswesen, 55, 618 - 624.
- [4] Scherz, S., Schäfer, P., 2002, *Studie zur Förderung der Intermodalität am Flughafen Frankfurt*. ZIV/DE-Consult, Darmstadt.

Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik (FGVV) Zentrum für integrierte Verkehrssysteme GmbH (ZIV)

Das FGVV ist Teil des Instituts für Verkehr im Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie. Forschungsschwerpunkte liegen im Verkehrsmanagement, wofür methodische Grundlagen zur systematischen Planung erarbeitet sowie spezifische Maßnahmen untersucht und weiterentwickelt werden. Dies schließt den Einsatz neuer Technologien in der Verkehrstelematik ein. Die Lichtsignalsteuerung für den Straßenverkehr bildet traditionell einen Schwerpunkt des Fachgebiets. Ein wichtiges Querschnittsthema ist das Qualitätsmanagement im Verkehr. Weitere Forschungen betreffen die integrierte Planung von Infrastruktur und Betrieb einerseits sowie von Flächennutzung und Verkehr andererseits und den Einsatz von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden im Verkehr.

Ein besonderes Anliegen am FGVV ist es, die Interdisziplinarität im Verkehrswesen zu fördern. Wesentlicher Ausdruck hiervon sind der interdisziplinäre Studiengang Master of Science „Traffic and Transport“ (www.tu-darmstadt.de/traffic-and-transport) und die Geschäftsführung des interdisziplinären Forschungsschwerpunkts „Integrierte Verkehrssysteme“ (fsiv)

(www.tu-darmstadt.de/verkehrsforschung).

1998 wurde in enger Bindung an das FGVV das ZIV gegründet (www.ziv.de). Gesellschafter dieses privatwirtschaftlichen Instituts an der TU Darmstadt sind die DB Regio AG, die Rhein-Main-Verkehrsverbund GmbH, die Fraport AG sowie der FIV – Förderverein für integrierte Verkehrssysteme e.V. Das ZIV erbringt Beratungs- und Dienstleistungen im Verkehr, wobei die landseitige Anbindung von Flughäfen und Fragen der Intermodalität einen Schwerpunkt bilden.

Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze (FGVV & ZIV)
Tel.: 06151/16-2025
E-Mail: boltze@verkehr.tu-darmstadt.de

Dipl.-Ing. Susanne Scherz (ZIV)
Tel.: 06151/27028-0 • E-Mail: scherz@ziv.de
Technische Universität Darmstadt
Verkehrsplanung und Verkehrstechnik
Petersenstraße 30 • 64287 Darmstadt
www.tu-darmstadt.de/verkehr

Die Raumdimension des Luftverkehrs

Martina Löw

Moderne Gesellschaften zeichnen sich typischer Weise durch ein hohes Maß an individueller Mobilität aus. Dabei nimmt das Reisen den zentralen Stellenwert ein. In den Medien und der Fachliteratur wird als Folge dieser modernen Mobilitätsanforderung häufig der „Bedeutungsverlust von Distanz“ oder allgemeiner „ein Auflösen des physischen Raumes“ angenommen. Solche Diagnosen verkürzen Raum auf eine geographische Einheit oder banalisieren ihn als Territorium. Im vorliegenden Aufsatz wird die Frage verfolgt, welche Perspektiven sich auf Luftverkehr bieten, wenn Raum als relationales Konstrukt begriffen wird. Dazu werden Ergebnisse moderner Raumtheorie am Beispiel der Biographie Josef Tals vorgestellt.

Spatial dimensions of air traffic. Modern societies are typified by high levels of individual mobility. Moving from one place to another and back is one central aspect involved here. In the media and the relevant literature we often find authors assuming, as a consequence of this modern need for mobility, that "distance is losing its meaning" or, more generally, that we are faced with "a dissolution of physical space". Diagnoses of this kind reduce space to a geographic unit or, more banally, view it in territorial terms. In this paper I will look into the perspectives of spatial mobility that are opened up by viewing space as a relational construct. I will discuss the findings of modern space theory by the example of Josef Tal's biography.



Fliegen ist zur Selbstverständlichkeit geworden. Durch Flugtickets ins Ausland unter 10 Euro, Fluggutscheine, die für 49,90 Euro incl. Steuern im Supermarkt an der Kasse noch spontan in den Wagen wandern können oder durch Reiseführer, die unter dem verführerischen Titel „WeekendLovers“ die Wochenend-Flugreisen vorstrukturieren, wird die Erfahrung des Fliegens zum Allgemeingut. Seit 1970 hat sich die Anzahl der Flüge verfünffacht; allein 2004 hoben 135,8 Mio. Menschen von deutschen Flughäfen ab [1]. Freizeitverkehr verursacht mittlerweile die Hälfte des gesamten Personenverkehrs. Das heißt, verglichen mit früheren Generationen kennen heute viel mehr Menschen sehr verschiedene, weit auseinander liegende Orte. Das „Dazwischen“ jedoch, die Orte entlang der Reiseroute, bleiben vielen fremd. Die Welt erscheint als zerstreute Inseln, die sich nur durch kognitive Landkarten zusammenfügen.

In den Medien wird deshalb von der „Auflösung des Raums“ gesprochen. Die Zeitung „Die ZEIT“ veröffentlicht zum Beispiel regelmäßig Artikel in dem Tenor, dass der Mensch das „aus seiner Raumdimension gefallene Wesen“ [2] sei, der Schriftsteller und Regisseur Heiner Müller erklärt Alexander Kluge gegenüber im Fernsehen wie in der daraus folgenden Publikation, dass das Schlimme sei, „daß es nur noch Zeit oder Geschwindigkeit oder Verlauf von Zeit gibt, aber keinen Raum mehr“ [3]. Der französische Architekt und Philosoph Paul Virilio vertritt die viel zitierte These, dass von Menschen „nicht mehr der Raum, sondern die Zeit (...) bevölkert“ [4] werde.

Tatsächlich ist es nicht der Raum, der „verschwindet“, sondern die Organisation des Nebeneinander ist grundsätzlich verschieden, ob ein Brief Wochen braucht, um von Europa nach USA zu gelangen, oder ob eine E-Mail in immer kürzeren Zeitspannen übermittelt wird, ob eine Fahrt mit der Kutsche Wochen in Anspruch nimmt oder in einer Stunde zu bewältigen ist. Die sozialwissenschaftliche Forschung steht deshalb vor der Herausforderung, ein Raumverständnis zu etablieren, das die Vernetzung von Orten zu Räumen als Syntheseoperationen ebenso ernst nimmt wie die vielfältigen Platzierungspraktiken. Wenig hilfreich ist es, zunächst einen Territorialraum zu konstruieren, dessen Auflösung dann konstatiert werden muss. Vielmehr muss Raum selbst dynamisiert werden, um Mobilität zu verstehen. Dies soll im Folgenden an einem Beispiel erläutert werden, das zeigt, wie Raum auch ohne Distanzveränderung relational gebildet wird. Die grundlegenden Konstitutionsprinzipien des Spacing und der Syntheseleistung lassen sich – wenn sie selbst für den Fall „vor Ort“ gelten – problemlos auf Distanzen übertragen.

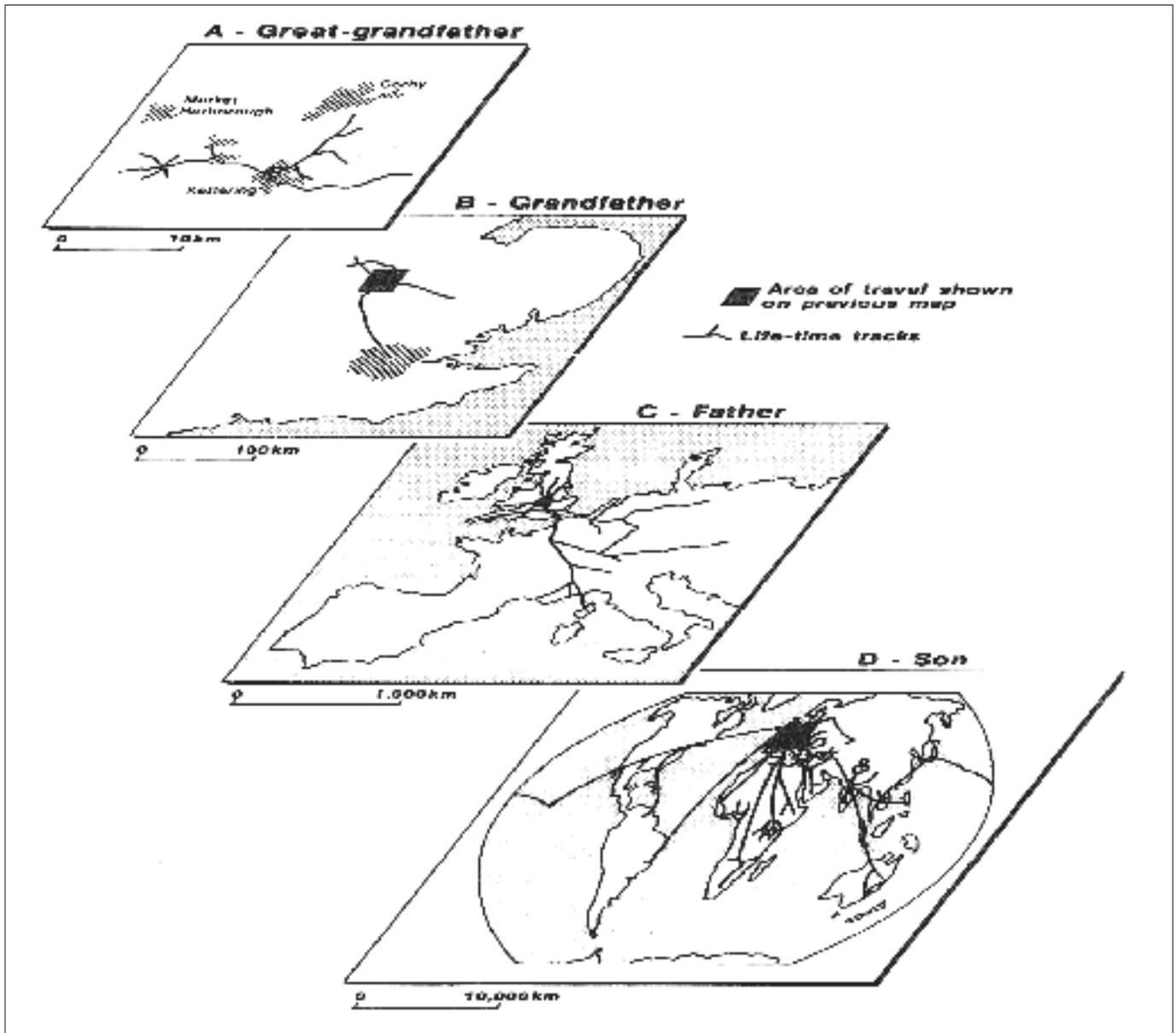
Relationale Räume

Josef Tal, Pianist, Komponist und Hochschullehrer an der Hebräischen Universität in Jerusalem verlässt 1934 Berlin, um nach Palästina zu emigrieren. In seiner Biographie „Der Sohn des Rabbiners“ (1987) schildert er seinen Weg vom Kind in einer jüdisch-orthodoxen Familie in Berlin Anfang des Jahrhunderts bis zum bedeutenden Komponisten der Gegenwart in Israel: „Noch in der britischen Mandatszeit, vor Ausbruch des Zweiten Weltkrieges, konnte ich unter der Führung zweier hoher Regierungsbeamter

die Klagemauer im Herzen der arabischen Altstadt sehen. Man ging durch ein engmaschiges Netz verwinkelter, enger Gäßchen und stand dann plötzlich vor einer steilen Wand riesiger Quadersteine. Hoch oben blieb ein schmaler Streifen blauen Himmels zwischen dem engen Gemäuer des Gäßchens. Die Enge ließ die Quadersteine noch viel größer und mächtiger vor dem kleinen Menschen erstehen. Davor konnte man nur zur Allmacht beten, die unerreichbar über dem unermesslichen Gestein schwebte. Nach dem Sechstagekrieg von 1968 wurde das Gäßchengewirr vor der Klagemauer freigelegt. Heute nähert man sich der Mauer über ein weites, großes Gelände, das Tausenden von Besuchern Platz bietet, um zu beten und auch religiöse Feste zu feiern. Natürlich sind es dieselben Quadersteine von ehedem, aber ihre Sprache hat sich durch die neue Umgebung verändert. Der weite Raum, der sie aus den engen Gäßchen befreit hat, führt ihr klagendes Echo in die Breite und nicht in die Höhe und gibt so dem Gebet einen anderen Sinn“ [5]. Tal schildert die Bildung eines Raums und dessen Veränderung im Verlauf der Zeit. Der Raum, um den es sich zunächst handelt, setzt sich aus der Verbindung von engen Gassen, der steilen Wand riesiger Quadersteine und einem schmalen Streifen blauen Himmels zusammen. Dem entgegen konstituiert sich der moderne Raum aus der Klagemauer und dem Fundament des Platzes sowie der vielen Menschen auf dem Platz. All diesen „Körpern“ gemeinsam ist, dass sie Produkte gegenwärtigen und vor allem vergangenen materiellen und symbolischen Handelns, kurz soziale Güter sind. Aber auch Menschen, in Tals Ausführungen des zeitgenössischen Raums der Klagemauer die Touristen bzw. Besucher, werden in die Konstitution von Räumen integriert.

Raum kann demnach – so eine erste Zuspitzung – als eine relationale (An)Ordnung von Lebewesen und sozialen Gütern verstanden werden [6]. Menschen als Bestandteile einer Raumkonstruktion weisen die Besonderheit auf, dass sie sich selbst platzieren und Platzierungen verlassen. Darüber hinaus beeinflussen sie mit Mimik, Gestik, Sprache etc. die Raumkonstruktionen. Wengleich Menschen in ihren Bewegungs- und Entscheidungsmöglichkeiten aktiver sind als soziale Güter, so wäre es dennoch eine verkürzte Annahme, würde man soziale Güter als passive Objekte den Menschen gegenüberstellen. Auch soziale Güter entfalten eine Außenwirkung zum Beispiel in Gerüchen und Geräuschen und beeinflussen in dieser Weise die Möglichkeiten der Raumkonstruktionen.

Betrachtet man Raum als relationale (An-)Ordnung sozialer Güter und Menschen, so muss das Angeordnete und das Anordnende systematisch unterschieden werden. Nicht nur als Bausteine sind Menschen in die Konstitution einbezogen, sondern im alltäglichen Handeln, in der Planung, der Kunst oder Wissenschaft werden in der Regel Ensembles sozialer Güter als ein Element wahrgenommen oder definiert und mit anderen Elementen verknüpft. Räume entstehen also erstens dadurch, dass sie aktiv durch Menschen verknüpft werden. Dabei verknüpfen Menschen nicht nur Dinge, sondern auch (selbst aktiv in das Geschehen eingreifende) andere Menschen oder Menschengruppen. Somit gehen zweitens mit der Entstehung von Räumen meistens Platzierungen einher. Dies geschieht unter vorstrukturierten Bedingungen.



Distanzen

Distances

Bradley, D.J.: The Scope of Travel Medicine. In: R. Steffen u.a. (Hg.), Travel Medicine. Berlin (1988)

Spacing und Syntheseleistung

Zu unterscheiden sind demnach zwei verschiedene Prozesse der Raumkonstitution. Erstens konstituiert sich Raum durch das Platzieren von sozialen Gütern und Menschen bzw. das Positionieren primär symbolischer Markierungen, um Ensembles von Gütern und Menschen als solche kenntlich zu machen (zum Beispiel Orteingangs- und -ausgangsschilder). Dieser Vorgang wird im folgenden Spacing genannt. Spacing bezeichnet also das Errichten, Bauen oder Positionieren. Als Beispiele können hier das Aufstellen von Waren im Supermarkt, das Sich-Positionieren von Menschen gegenüber anderen Menschen, das Bauen von Flughäfen und Hotels, das Vermessen von Landesgrenzen, das Vernetzen von Computern zu Räumen genannt werden. Es ist ein Positionieren in Relation zu anderen Platzierungen. Spacing bezeichnet bei beweglichen Gütern oder bei Menschen sowohl den Moment der Platzierung als auch die Bewegung zur nächsten Platzierung. Zweitens bedarf es zur Konstitution von Raum aber auch einer Syntheseleistung, das heißt, über Wahrnehmungs-, Vorstellungs-

oder Erinnerungsprozesse werden Güter und Menschen zu Räumen zusammengefasst.

Dieser Aspekt der Raumkonstitution, die Syntheseleistung, ermöglicht es, dass Ensembles sozialer Güter oder Menschen wie ein Element wahrgenommen, erinnert oder abstrahiert werden, und dementsprechend als ein „Baustein“ in die Konstruktion von Raum einbezogen werden. Josef Tal synthetisiert, während er durch die Jerusalemer Altstadt geht, im Handlungsvollzug enge Gäßchen, steile Wände, Quadersteine und einen schmalen Streifen blauen Himmels zu einem Raum. Seine Schritte nehmen Bezug auf die zum Raum verknüpften Objekte. Schließlich plaziert er sich vor der Klagemauer, dem wesentlichen Element dieser Raumkonstruktion, zum Beten. Die Quadersteine der Klagemauer bilden zwar das symbolisch prägnanteste Element der Raumkonstruktion, sie wirken jedoch nicht für sich, sondern nur in der vorgefundenen (An-)Ordnung. Tal erzählt, wie sich das Beten infolge der Sprengungen verändert. Ab da konstituiert sich der Raum über die Verknüpfung von Klagemauer, Fundament und Menschen.



Michael Stock

Praktikant, Speedmaster 102-Montage

„Praktikum in einer anderen Dimension: 125 × 620 m.“

Als Praktikant oder Diplomand, als Trainee oder als Direkteinsteiger bieten wir Ihnen erstklassige Startbedingungen. Schließlich ist die Heidelberg-Gruppe weltweit die Nummer eins, wenn es um Lösungen für die gesamte Printmedien-Industrie geht. Als Technologiekonzern suchen wir vor allem Mitarbeiter mit technischem, informationstechnischem oder wirtschaftlichem Hintergrund. Bei uns können Sie sich nicht nur in Ihrem Fach, sondern auch persönlich weiterentwickeln und in selbstständiger Arbeit von Anfang an etwas bewegen. Das erfordert viel Engagement von Ihnen sowie Ihren ganzen Einsatz. Sie haben es in der Hand, denn wir suchen Menschen mit Initiative.

Heidelberger Druckmaschinen AG
Kurfürstenanlage 52-60 • 69115 Heidelberg • Deutschland • www.heidelberg.com

HEIDELBERG

In gleicher Weise synthetisieren Menschen auch unter Bedingungen schneller Geschwindigkeiten Räume. Die vertrauten Orte der Heimatstadt werden mit Flughäfen, Hotels, Sehenswürdigkeiten etc. verknüpft und als Gesamtraum erfahrbar. Mit der Zeit werden Elemente vergessen. Manchmal kann man nicht mehr eindeutig zwischen Erinnerung und Fotografiertem unterscheiden. Neue Objekte werden hinzugefügt. Auch kann die relevante Raumkonstruktion situativ, d.h. nach eigener Platzierung, sich ändern, aber stets bilden Menschen Räume im Handeln aus. Der Luftverkehr zerstört nicht den Raum, er individualisiert ihn. Abhängig von Moden, Berufssparten und sozialen Gruppen entstehen Räume als Resultat von spezifischen Verknüpfungen und Platzierungen jenseits territorialer Grenzen. Zur Herstellung dieser Räume stellen Menschen ihre Körper in Flugzeugen ruhig. Sie verschließen die Augen vor den Zwischenräumen und hoffen – wie Josef Tal – durch Platzierungen vor Fremden, Altem und Heiligem ein Echo auf die eigenen Fragen zu finden.

Literatur

- [1] EU-Nachrichten Nr. 13, S. 3, 7.4.2005: Dicke Luft durch Flieger
- [2] Guggenberger, Bernd: Unterwegs im Nirgendwo, In: Die Zeit (11.11.1994), S. 43
- [3] Kluge, A. / Müller, H.: „Ich schulde der Welt einen Toten.“ Gespräche. Hamburg (1995), S. 80
- [4] Virilio, P.: Der kritische Raum. In: Tumult (7/83), S. 16
- [5] Tal, J.: Der Sohn des Rabbiners. Ein Weg von Berlin nach Jerusalem. München (1987), S. 87
- [6] Löw, M.: Raumsoziologie. Frankfurt (2001)

Arbeitsbereich Stadt, Raum und Ort, Institut für Soziologie

Der Arbeitsbereich Stadt, Raum und Ort ist einer von drei Profilschwerpunkten des Instituts für Soziologie. Forschungsschwerpunkte sind:

- Globalisierung und Lokalisierung
- Raumtheorie
- Raum und soziale Ungleichheit/Geschlechterverhältnisse
- Wirklichkeit der Städte
- Stadtstrukturen, Bauformen und Leitbilder

Leitende ProfessorInnen:

Prof. Dr. Martina Löw, Stadtsoziologie, Raumtheorie
Prof. Dr. Helmuth Berking, Politische Soziologie, Globalisierungstheorie

Derzeit arbeiten ein Privatdozent und sechs wissenschaftliche MitarbeiterIn im Arbeitsbereich. Darüber hinaus werden aktuelle stadt- und raumsoziologische Fragen in 20 Promotions- und Habilitationsvorhaben verfolgt. Der Schwerpunkt in der Drittmittelforschung (DFG, Land Hessen) liegt z.Z. im Bereich der Gemeindestudien.

Prof. Dr. Martina Löw koordiniert als Sprecherin den TUD-Profilschwerpunkt „Stadtforschung“. Der Anwendungsbezug der Forschung zeigt sich in der kontinuierlichen Kooperationen mit der Immobilienwirtschaft.

Kontaktadresse:

Prof. Dr. Martina Löw
Residenzschloss • 64283 Darmstadt
loew@ifs.tu-darmstadt.de • www.raumsoziologie.de



Optimale kooperative Steuerung von Mehrflugzeugsystemen

Markus Glocker/Alexander Martin/Oskar von Stryk

Die Untersuchung und Optimierung von Koordination und Flugtrajektorien zur Erhöhung von Kapazität und Sicherheit im Luftverkehr unter Berücksichtigung von Freiflugphasen und neuen Möglichkeiten der Flugregelung führt bei realitätsnaher Modellierung der Flugzeugdynamik auf eine gänzlich neue Klasse von diskret-kontinuierlichen dynamischen Optimierungsproblemen. Damit können die simultane Optimierung von Flugtrajektorien und Landereihenfolge bei Flughäfen ebenso beschrieben werden wie die Koordination und Trajektorienoptimierung einer Flotte unbemannter Flugsysteme zur Verkehrsüberwachung oder Aufklärung bei Katastrophen. Erste Ansätze für numerische Berechnungsverfahren werden diskutiert und an Beispielen illustriert.

Optimal cooperative control of multiple aerial vehicles. *The investigation and optimization of coordination and flight trajectories for improving capacity and safety in air traffic which takes free flight phases and new possibilities of flight control into account results in a completely new class of discrete-continuous dynamic optimization problems considering realistic models of the flight dynamics. This approach enables the simultaneous optimisation of flight trajectories and aircraft landing sequence at airports as well as the coordination and trajectory optimisation of a fleet of unmanned aerial vehicles deployed for traffic surveillance or exploration of a disaster scenario. First approaches for numerical methods are discussed and computational results are presented.*

Einführung

Durch das starke Anwachsen des zivilen Luftverkehrs sowie des damit verbundenen Risikos von Kollisionen stößt das gegenwärtige Flugsicherungssystem zunehmend an die Grenzen seiner Leistungsfähigkeit. Neue methodische Ansätze im Bereich der Luftverkehrsregelung sind erforderlich, um Kapazität und Sicherheit des Luftverkehrsraums gleichermaßen trotz des wachsenden Luftverkehrsaufkommens zu verbessern. Technologische Entwicklungen im Bereich der Onboard-Flugzeugsensorik werden es ermöglichen, Fragen der Navigation und der Flugsicherheit zwischen der bisherigen, zentralen Regelung durch die Flugsicherung und möglichen, künftigen dezentralen Regelungen durch die beteiligten Luftfahrzeuge neu zu verteilen.

Eng verwandte Fragestellungen der Koordination und Flugtrajektorienplanung treten bei kooperierenden, autonomen Luftfahrzeugen (unmanned aerial vehicles, UAVs) auf. Mögliche, zukünftige Einsatzgebiete für eine Flotte kooperierender UAVs, die im ISTAG Report 2004 als eine der „Grand Challenges“ für die Entwicklung der Informationsgesellschaft in Europa benannt wurden, sind Einsätze zur Überwachung und Aufklärung bei Umweltkatastrophen und -verunreinigungen, Verkehrsüberwachung und -management (Abb. 1), zur Unterstützung von menschlichen Koordinatoren oder als autonome Transportvehikel für leichte Gefahrgüter.

Für beide Szenarien ist eine systematische und simultane Optimierung von Kooperation und Flugtrajektorien bei realistischer Modellierung der Systemdynamik der einzelnen Luftfahrzeuge wünschenswert, aber bislang erst in Ansätzen möglich.

Modellierung

Die Modellierung der Systemdynamik eines einzelnen Flugzeugs führt mit Methoden der Flugmechanik je nach Modellierungstiefe auf ein nichtlineares System gewöhnlicher Differentialgleichungen für dessen Zustand (d.h. Position, Orientierung, Geschwindigkeit, Massenänderung u.a.) und hängt u.a. von aerodynamischen Größen wie Auftrieb und Widerstand sowie den Steuervariablen des Flugzeugs wie Triebwerksschub, Auftriebsbeiwert (Höhenruder) und Schräglage (Quer- und Seitenruder) ab (Abb. 2). Exemplarische Szenarien im Bereich des Passagierflugverkehrs liegen im Bereich der Flugwegeoptimierung (Area Control) und der Anflugsreihungsoptimierung eines Flughafens (Approach Control). Die Berücksichtigung von Reihenfolgen und Anzahl mehrerer Flugzeuge führt zu einer Modellierung mit diskreten, ganzzahligen Variablen. Dabei sind verschiedene Flugzeugtypen und aktuelle Flugzeugzustände in der Modellierung ebenso zu berücksichtigen wie unterschiedliche Optimierungskriterien der Luftverkehrsgesellschaften (Kosten, Pünktlichkeit, Komfort) sowie die Vermeidung von Konfliktsituationen (Kollisionsgefahr). Darüber hinaus ist die Berücksichtigung weiterer Kriterien, z.B. bei der Bestimmung einer optimalen Landereihenfolge und zugehörigen Flugtrajektorien, der Auslastung des Flughafens, von Kerosinverbrauch und Lärmentwicklungen bei der Planung von Interesse.



Abbildung 1:
Luftaufnahme eines Verkehrsknotenpunkts
(Quelle: COMETS Project
web site, www.comets-uavs.org)

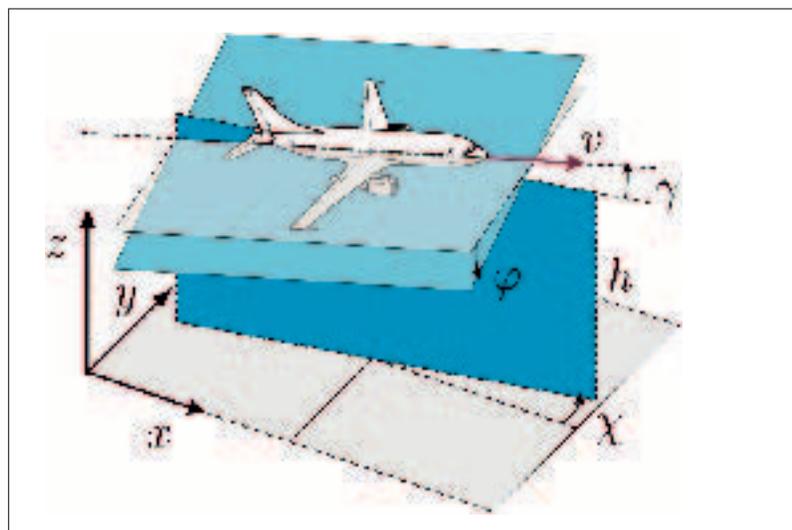
Aerial observation of a traffic junction.

Der Einsatz einer Flotte von UAVs zur Verkehrsüberwachung oder zur Aufklärung bei Umweltkatastrophen erfordert z.B. für ein zeit- oder energieminimales Anfliegen einer Menge von Kontrollpositionen, die optimalen Flugtrajektorien zusammen mit der Reihenfolge und Aufteilung der Positionen auf die beteiligten UAVs zu bestimmen. Darüber hinaus müssen in beiden Szenarien jeweils Sicherheitsaspekte in Form weiterer Nebenbedingungen berücksichtigt werden, beispielsweise permanente Mindestabstände zur Kollisionsvermeidung, die bei der Analyse optimaler Landereihenfolgen auch durch vom Flugzeugtyp abhängige Luftverwirbelungen bestimmt werden. Bei voller Modellierungstiefe der individuellen Flugzeugdynamik führt die resultierende Optimierungsaufgabe für die diskreten, ganzzahligen (z.B. Reihenfolgen) sowie die kontinuierlichen Flugzeugsteuervariablen auf ein gemischt ganzzahlig-nichtlineares, dynamisches Optimierungsproblem (mixed-integer optimal control problem, MIOCP). Je nach Vereinfachung der Flugzeugdynamik resultieren gemischt ganzzahlig nichtlineare oder lineare Optimierungsprobleme (mixed-integer linear program, MI(L)P).

Optimierung

Die Anwendung von MIP-Berechnungsverfahren auf entsprechend modellierte Problemstellungen wurde in den letzten Jahren verstärkt untersucht. Im Bereich des Luftverkehrsmanagements wird damit vor allem die Problematik kollisionsfreier Bahnen betrachtet.

Abbildung 2:
Flugdynamische Zustandsvariablen
State variables of flight dynamics.



Meist wird entsprechend der aktuellen Luftraumstruktur mit mehreren Verkehrsschichten die stark vereinfachende Annahme gemacht, dass nur Flugbahnen in einer Ebene (d.h. ohne Auftrieb) betrachtet werden müssen. Eine derartige Betrachtung mit stark vereinfachter, linearer Flugzeugdynamik kann als gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem (MILP) formuliert werden [1,2], wobei von Seiten der Systemdynamik wenig Unterschiede zu einer entsprechend linearisierten, ebenen Radfahrzeugdynamik bestehen [1,3]. Auf diese Weise konnten Optimierungsprobleme mit bis zu 17 Flugzeugen untersucht werden [1]. Unter Verwendung verbesserter Approximationen der nichtlinearen Systemdynamik wurden jüngst in [4] bis zu 8 Flugzeuge im dreidimensionalen Raum berücksichtigt. Bei der Optimierung der Landereihenfolge sind bisher noch keine Arbeiten mit Berücksichtigung nichtlinearer flugdynamischer Eigenschaften bekannt. In [5] wird diese Fragestellung als MILP formuliert und an Beispielen mit bis zu 123 Flugzeugen unter Verwendung heuristischer und exakter Verfahren der diskreten Optimierung berechnet. Die kooperative Bahnplanung für mehrere UAVs mit Anfliegen mehrerer Kontrollpunkte wurde in [6] als ein diskretes Optimierungsproblem für mehrere Handlungsreisende (multi traveling salesmen problem, m-TSP) formuliert und gelöst.

Bei solchen Rundreiseproblemen, die wohl die bekanntesten kombinatorischen Optimierungsprobleme darstellen, werden meist Städtetouren betrachtet, wobei die Kosten der Verbindung zwischen je zwei Städten durch deren Entfernung gegeben sind. Die

bisher größte bewiesene optimale Rundreise besucht 24.978 Städte in Schweden. Sie wurde mit der Lin-Kernighan-Methode [7] berechnet und unter Verwendung von Branch-and-Cut-Techniken bewiesen [8].

Die Betrachtung der kombinatorischen Optimierungsprobleme (z.B. für Reihenfolgen) in enger Kopplung mit einer realistischen Modellierung der nichtlinearen Flugzeugdynamik führt auf MIOCPs. Von den Autoren wurden als Benchmarkprobleme für diese völlig neue Klasse von Optimierungsaufgaben Problemstellungen für einzelne und mehrere motorisierte Handlungsreisende vorgestellt [9].

Die ersten Ansätze zur Lösung von MIOCPs beruhen auf einer geeigneten Verknüpfung numerischer Verfahren zur Lösung gewöhnlicher Optimalsteuerungsprobleme mit solchen zur Lösung kombinatorischer Optimierungsprobleme [9]. Ein untersuchter Lösungsansatz verbindet ein Branch-and-Bound-Verfahren, das in einer äußeren Iteration den Raum der diskreten Möglichkeiten durchsucht, mit einem auf Approximation von Steuer- und Zustandsvariablen mit polynomialen Ansatzfunktionen auf einem Zeitgitter und strukturausnützendem, nichtlinearer Optimierung beruhenden Verfahren zur Berechnung optimaler Steuerprozesse in einer inneren Iteration. Ein zweiter Ansatz beruht auf einer geeigneten Linearisierung von Nichtlinearitäten im Optimalsteuerungsproblem mittels linearer Ansatzfunktionen und einer neuen Transformation des MIOCP auf eine Klasse von MILP [10], die mit sogenannten Branch-and-Cut Verfahren global gelöst werden können.

Ergebnisse

Mit den neuen Ansätzen wurden bislang Rundreiseprobleme in der Ebene für motorisierte Handlungsreisende mit einfacher, aber nichtlinearer Fahrzeugdynamik betrachtet. Dabei konnten optimale Reihenfolgen und optimale Trajektorien für ein oder zwei Fahrzeuge und bis zu 7 Städten berechnet werden. Dies stellt in dieser Problemklasse die bislang komplexesten, gelösten MIOCP dar. Dafür wird auf guten PCs 5 h an Rechenzeit benötigt. Diese kann mit dem zweiten Ansatz [10] für eine Approximation der Lösung auf knapp 4 h reduziert werden. In Abb. 3 ist beispielhaft eine Lösung für 2 motorisierte Handlungsreisende und 6 Städte angegeben.

Bei der Landereihenfolgeoptimierung unter Berücksichtigung der beschriebenen, realitätsnahen Flugdynamikmodelle konnten bislang Problemstellungen mit bis zu 5 Flugzeugen untersucht werden. Die benötigte Rechenzeit liegt ebenfalls noch im Bereich mehrerer Stunden. Die berechneten Trajektorien sind in Abbildung 4 dargestellt.

Zusammenfassung und Ausblick

Eine neue Vorgehensweise zur Untersuchung der optimalen Kooperation und Trajektorienplanung für Mehrflugzeugsysteme mit Anwendung u.a. bei der Landereihenfolgeoptimierung von Passagierflugzeugen sowie kooperierenden, unbemannten Flugsystemen bei Überwachungsaufgaben wurde vorgestellt. Zur numerischen Lösung der resultierenden neuen Klasse MIOCP von Optimierungsproblemen wurden erste Ansätze diskutiert. Diese ermöglichen beispiels-

Abbildung 3:
Optimale Kooperation und Trajektorien für zwei motorisierte Handlungsreisende und 6 Städte

Optimal cooperation and trajectories for two motorized traveling salesmen and 6 cities.

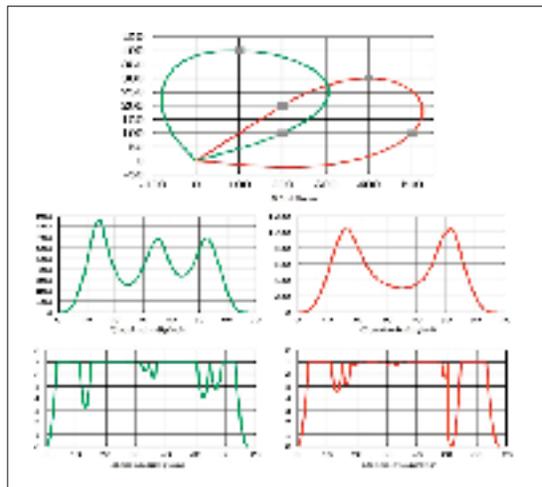
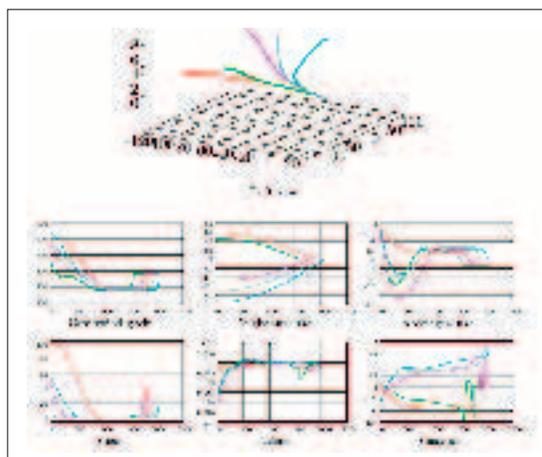


Abbildung 4:
Optimale Landereihenfolge und Flugtrajektorien für 5 Flugzeuge

Optimal sequencing and flight trajectories for 5 aircrafts.



Die Arbeitsgruppe Diskrete Optimierung an der TU Darmstadt

Die Arbeitsgruppe Diskrete Optimierung mit 15 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern ist im Fachbereich Mathematik an der TU Darmstadt angesiedelt. In der Forschung beschäftigt sich die Gruppe mit der Entwicklung von Methoden zur Lösung schwieriger diskreter Optimierungsprobleme aus Industrie und Wirtschaft. Schwerpunkte der Arbeiten sind:

- die mathematische Modellierung der praktischen Fragestellung,
- die theoretische Analyse (vorwiegend mit Methoden aus den Bereichen der Graphentheorie, der Polyedrischen Kombinatorik und der Theorie zur ganz-zahligen Programmierung),
- die Entwicklung und die Implementierung effizienter Algorithmen und deren Umsetzung in die Praxis.

Dieser interdisziplinäre Charakter spiegelt sich auch in den Anwendungsgebieten wieder, in denen die Arbeitsgruppe Erfahrung hat, beispielsweise bei der Standortplanung in der Telekommunikation, der Frequenzzuweisung im Mobilfunk, bei Netzwerkdimensionierungsproblemen, im Supply Chain Management, bei Planungsfragen im Öffentlichen Personennahverkehr oder bei Energiemanagementfragen.

Fachgebietsleiter:

Prof. Dr. rer. nat. Alexander Martin

TU Darmstadt, Fachgebiet Diskrete Optimierung

Schlossgartenstraße 7 • 64289 Darmstadt • Tel: 0 61 51/16-3394

e-mail: martin@mathematik.tu-darmstadt.de • www.opt.tu-darmstadt.de

Das Fachgebiet Simulation und Systemoptimierung an der TU Darmstadt

Die Forschungsschwerpunkte des Fachgebiets mit derzeit zwölf wissenschaftlichen Mitarbeitern und Doktoranden umfassen Simulationstechnik, Optimierung, optimale Steuerung und Robotik. Zur simulationsbasierten Optimierung und Steuerung nichtlinearer dynamischer Prozesse wie Kraftfahrzeuge und vielgelenkige Roboter werden besonders effiziente, numerische Verfahren entwickelt, die weltweit hohe Akzeptanz und Verbreitung gefunden haben (z.B. wurde das am Fachgebiet entwickelte direkte Kollokationsverfahren zur Berechnung optimaler Steuerungen weltweit von mehr als 70 Forschungseinrichtungen in 25 Ländern lizenziert).

Aktuelle Drittmittelprojekte umfassen die robuste, diskret-kontinuierliche Parameteroptimierung bei Strömungssimulationen, die Vorwärtsdynamiksimulation und -optimierung menschlicher Bewegungen, die Entwicklung von bionischen Roboterarmen und -beinen sowie die Entwicklung autonomer, kooperierender mobiler, vor allem laufender, Robotersysteme. Seit 2001 wurde ein sehr erfolgreiches Team von autonomen vierbeinigen Robotern in dynamischer Umgebung am Szenario des Roboterfußballs entwickelt (Darmstadt Dribbling Dackels), das seit 2004 durch ein Team kleiner, humanoider Roboter ergänzt wird. In diesem Zusammenhang werden kooperative Lokalisierungs- und Navigationsmethoden sowie modulare und flexible Software- und Steuerungsarchitekturen entwickelt, die mittelfristig in die Entwicklung heterogener Teams laufender und fahrender, autonomer Roboter münden, die zur gemeinsamen Erledigung von Aufgaben jenseits des Roboterfußballs eng kooperieren.

Fachgebietsleiter: Prof. Dr.rer.nat. Oskar von Stryk

Tel.: 0 61 51/16-2513 • E-Mail: stryk@sim.tu-darmstadt.de

Ansprechpartner: Dipl.-Math. Markus Glocker

Tel.: 0 61 51/16-5212 • E-Mail: glocker@sim.tu-darmstadt.de

Anschrift: TU Darmstadt • Fachgebiet Simulation und Systemoptimierung
Hochschulstr. 10 • 64289 Darmstadt • www.sim.informatik.tu-darmstadt.de

weise eine gute Abschätzung, wie weit heutige Luftverkehrsregelungen von optimalen Regelungen entfernt sind. Darauf aufbauend ist eine Weiterentwicklung der Methoden im Hinblick auf Schnellzeit- bzw. Echtzeit-Optimierungen und deren Einsatz im Planungs- bis hin im laufenden Betrieb wünschenswert. Dazu sind aus Sicht der Optimierungsverfahren grundlegende neue Erkenntnisse bei der Modellierung und optimalen Steuerung kooperativer, hybrider (diskret-kontinuierlicher) dynamischer Systeme sowie bei numerischen Verfahren zur Berechnung von Lösungen notwendig. Diese Ziele können langfristig nur durch eine enge Zusammenarbeit von Experten der diskreten und der System-Optimierung sowie der Flugdynamik und -regelung erreicht werden, für die das Forschungszentrum Computational Engineering der Technischen Universität Darmstadt eine sehr gute Ausgangsbasis bietet.

Literatur

- [1] L. Pallottino, E. Feron, and A. Bicchi. Conflict resolution problems for air traffic management systems solved with mixed integer programming. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 3(1):3-11, March 2002.
- [2] A. Richards and J. P. How. Aircraft trajectory planning with collision avoidance using mixed integer linear programming. In *Proc. American Control Conference*, 2002.
- [3] M.G. Earl and R. D'Andrea. Iterative MILP Methods for Vehicle Control Problems. In *IEEE Conference on Decision and Control*, pages 4369-4374, 2004.
- [4] A. U. Raghunathan, V. Gopal, D. Subramanian, L. T. Biegler, and T. Samad. Dynamic optimization for 3d conflict resolution for multiple aircraft. *AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 27(4):586-594, 2004.
- [5] T. Fahle, R. Feldmann, S. Götz, S. Grothklops, and B. Monien. The aircraft sequencing problem. In L. Wegner R. Klein, H.-W. Six, editor, *Lecture Notes in Computer Science: Computer Science in Perspective: Essays Dedicated to Thomas Ottmann*, pages 152-166. Springer-Verlag, July 2003.
- [6] T. Lemaire, R. Alami, S. Lacroix: A distributed tasks allocation scheme in multi-UAV context. *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, New Orleans, LA (USA), April 2004.
- [7] K. Helsgaun. An effective implementation of the Lin-Kernighan travelling salesman heuristic. *DATALOGISKE SKRIFTER (Writings on Computer Science)* 81, Roskilde University, 1998.
- [8] D. Applegate, R. Bixby, V. Chvatal, and W. Cook. Concorde tsp solver. Website <http://www.tsp.gatech.edu/concorde.html>, January 2005.
- [9] O. von Stryk, M. Glocker. Numerical mixed-integer optimal control and motorized traveling salesman problems. *APII - JESA (Journal européen des systèmes automatisés - European Journal of Control)*, 35(4):519-533, 2001.
- [10] M. Glocker. A decomposition approach for optimal control problems with integer inner point state constraints. In *Proc. Appl. Math. Mech. (PAMM)*, volume 4, pages 608-609, December 2004.

Umweltfreundlichere Triebwerke – Verdichter als Schlüsselkomponente

Heinz-Peter Schiffer/Jörg Bergner

Die kontinuierliche Reduktion des Brennstoffverbrauchs bei Flugtriebwerken ist aus ökonomischen und ökologischen Gründen eines der wichtigsten Ziele, die in der Triebwerksindustrie im Rahmen von Technologieentwicklungsprogrammen verfolgt werden, unterstützt durch Forschungseinrichtungen an den Universitäten. Neben der geeigneten Wahl der Kreisprozessparameter erreicht man eine Reduktion des Treibstoffverbrauchs vor allem durch verbesserte Komponentenwirkungsgrade und erhöhte Leistungsdichte, was am Beispiel des Verdichters gezeigt wird.

Achieving environmental friendly aero-engines by compressor technology improvements. Since the introduction of jet engines in civil aviation reduction of specific fuel consumption and environmental pollution was always one of the main objectives in the aero-engine industry. The continuous increase of the overall engine pressure ratio and turbine inlet temperature has considerably contributed to the reduction of fuel consumption. Another measure is the reduction of module weight. Selecting the compressor, weight reduction can be achieved by an increase of power density per compressor stage. However, at the same time operating ability has to be guaranteed over a wide range of operating points which requires an in depth knowledge of the aerodynamic phenomena in the compressor.

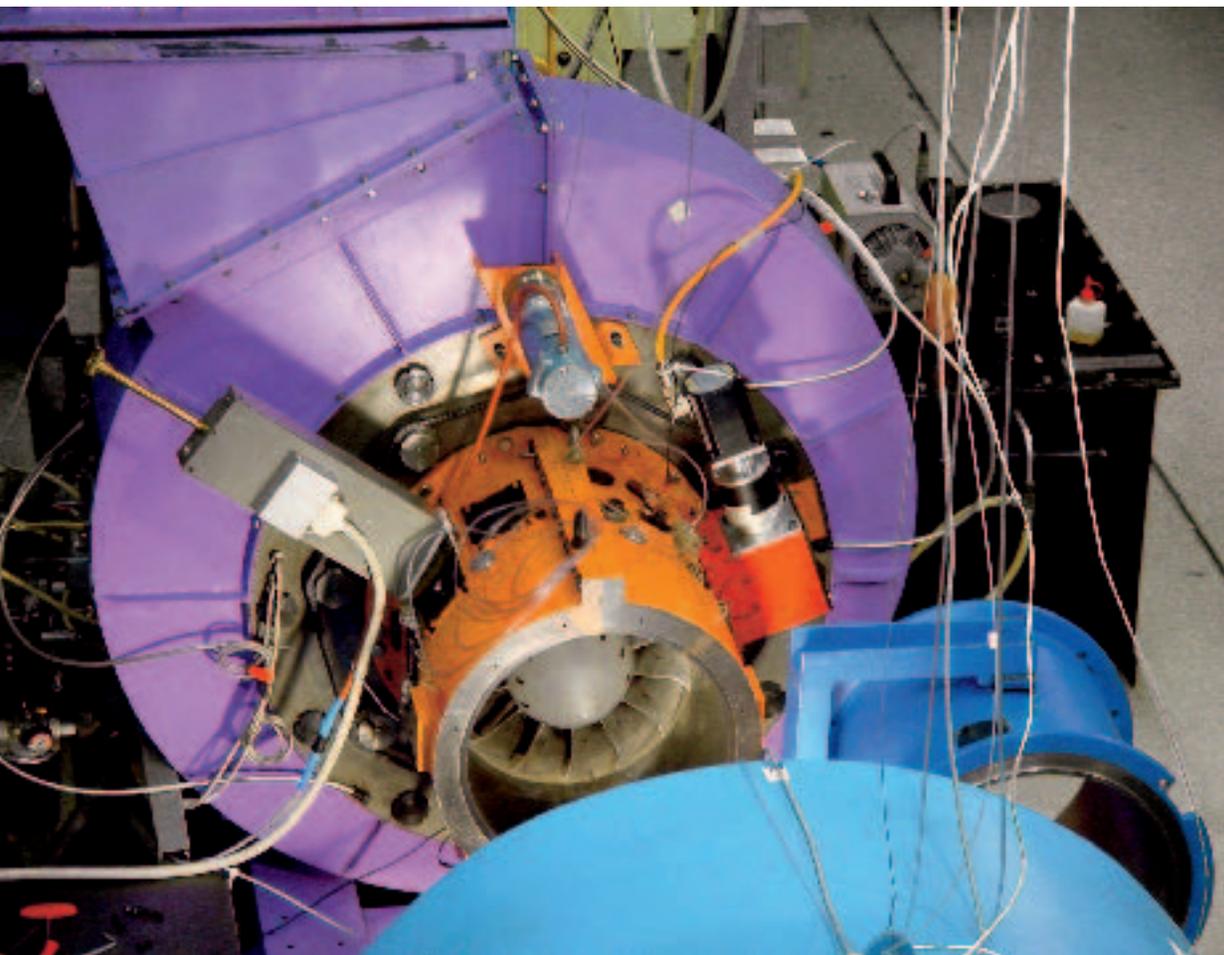


Abbildung 2:
Der Transonik-Verdichter
der TU-Darmstadt
Darmstadt Transonic
Compressor

Bei der Beurteilung der Umweltfreundlichkeit von Flugzeugen richtet sich das Augenmerk eines Außenstehenden üblicherweise zuallererst auf den Treibstoffverbrauch und den Schadstoffausstoß der Flugtriebwerke. Und dies mit Recht, findet doch dort die mit zahlreichen Verlusten verbundene Umwandlung der im Treibstoff chemisch gebundenen Energie in den zur Fortbewegung des Flugzeuges notwendigen Schub statt.

Da mit einer Reduzierung des schubspezifischen Treibstoffverbrauches (SFC) typischerweise auch ein verminderter Schadstoffausstoß einhergeht, stehen die Bemühungen um weitere Steigerungen des Thermischen- und des Vortriebswirkungsgrades schon immer im Mittelpunkt der Technologieentwicklung für zukünftige Flugantriebe. Seit der Einführung von Strahltriebwerken in der zivilen Luftfahrt konnte auf Grund dieser Bemühungen der schubspezifische Verbrauch halbiert werden.

Bessere Wirkungsgrade

Wie eine Betrachtung des Triebwerkskreisprozesses zeigt, ist es zur Verbesserung des Thermischen Wirkungsgrades sinnvoll, primär das Gesamtdruckverhältnis des Triebwerks zu erhöhen, welches seit 1950 um den Faktor acht gestiegen ist. Die Erhöhung der Turbineneintrittstemperatur trägt ebenfalls zu einer Verbesserung des Thermischen Wirkungsgrades bei, bewirkt aber vorrangig ein verbessertes Verhältnis zwischen Schub und Triebwerksgewicht. Heutige Turbineneintrittstemperaturen liegen mehrere hundert Grad Kelvin über der Schmelztemperatur verfügbarer Schaufelwerkstoffe. Die Entwicklung fortschrittlicher Schaufelkühlkonzepte und hochwarmfester Schaufelwerkstoffe haben diese hohen Turbineneintrittstemperaturen erst ermöglicht. Neben diesen Kreisprozessmaßnahmen sind es vor allem die Wirkungsgrade der einzelnen Triebwerkskomponenten, insbesondere von Verdichter und Turbine, die durch eine Verbesserung maßgeblich den Thermischen Wirkungsgrad erhöhen.

Der Vortriebswirkungsgrad wurde ganz wesentlich durch die Einführung von Zweikreistriebwerken und der stetigen Erhöhung des Nebenstromverhältnisses verbessert. Die damit verbundenen niedrigen Strahlgeschwindigkeiten sind nicht nur für die Energiebilanz sondern auch für eine geringe Lärmentwicklung eines Triebwerks günstig.

Neben all diesen Maßnahmen, die auf direktem Weg das SFC-Niveau erhöhen, soll dieser Beitrag den Blick auf eine Komponente des Strahltriebwerks lenken, bei der die aktuellen Entwicklungsarbeiten vornehmlich auf die Verbesserung des Schub/Gewichtsverhältnisses abzielen.

Die Relevanz dieser Triebwerkskenngröße für den Treibstoffverbrauch eines Flugzeuges wird deutlich, wenn man das Kräftegleichgewicht im stationären Geradeausflug betrachtet. Für ein bei gleicher Nutzlast reduziertes Fluggewicht benötigt man weniger Auftrieb, der Tragflügel kann kleiner und damit auch leichter ausfallen, als Resultat verringern sich einzelne Anteile am Gesamtwiderstand des Flugzeuges. Zum Ausgleich des Widerstandes wird weniger Schub benötigt und somit fällt der auf die Nutzlast des Flugzeuges bezogene Treibstoffverbrauch niedriger aus.

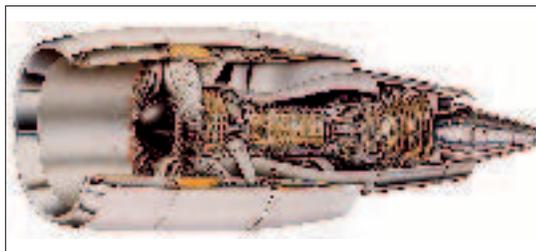


Abbildung 1:
Schnitt durch ein CF6-80
Triebwerk
Cross section of a CF6-80
Engine

Es gilt die Regel, dass jedes Kilogramm Gewicht, das am Triebwerk eingespart werden kann, eine Reduktion des Flugzeuggewichts um ca. 6 - 8kg mit sich bringt. Dem in Abb. 1 dargestellten Schnitt durch ein weit verbreitetes Triebwerk lässt sich das Größenverhältnis der Triebwerksmodule zueinander entnehmen. Es fällt auf, dass die dem Verdichter zuzuordnenden Bauteile einen weitaus größeren Raum einnehmen als die stromab der Brennkammer liegenden Turbinenmodule. Besonders deutlich wird dies, wenn man das Verhältnis der Stufenzahlen der Hochdruckmodule betrachtet. Der Leistungsumsatz, den die 14 Hochdruckverdichterstufen (HDV) zusammen am Fluid verrichten, wird in zwei Hochdruckturbinenstufen (HDT) dem Fluid wieder entzogen. Entsprechend hoch fällt mit rund 40% der Anteil der Verdichterkomponenten am Gesamtgewicht des Triebwerks aus.

Für die angestrebte Reduktion der Stufenzahlen ist die Maximierung der Leistungsdichte sehr wichtig. Der wesentliche Parameter, mit dem weitere Steigerungen erreicht werden können, ist eine höhere Umfangsgeschwindigkeit der Rotorschauflern. Ohne geeignete Entwurfskonzepte ziehen diese Steigerungen aber eine größere Neigung zu instabilem Betrieb nach sich.

Erweiterter Arbeitsbereich

Neben den offensichtlichen Anforderungen nach hoher Leistungsdichte und hoher Effizienz kommt immer stärker auch die Forderung nach zuverlässigem Betrieb über einen sehr weiten Arbeitsbereich als Entwicklungskriterium hinzu.

Der Axialverdichter soll nicht nur in der Umgebung seines Auslegungspunktes optimal arbeiten, sondern auch bei erheblich veränderten Massenströmen einen sicheren Betrieb der Maschine ermöglichen. Der Betrieb eines Axialverdichters ist bei konstanter Drehzahl auf einen bestimmten Massenstrombereich – im Folgenden auch als Arbeitsbereich bezeichnet – eingeschränkt. Ausgehend vom Auslegungspunkt sinkt der Druckaufbau bei zunehmendem Massenstrom mehr oder weniger stark ab und der Betrieb ist wegen des ebenfalls sinkenden Wirkungsgrades nicht weiter sinnvoll. Bei der Verringerung des Massenstroms steigt der Druckaufbau zunächst an, beim Unterschreiten eines kritischen Massenstroms tritt dann ein instabiles Verhalten auf, das durch schlagartigen Verlust des Druckaufbaus charakterisiert ist und je nach Randbedingung des Triebwerks zu Schwingungen im Massenstrom führen kann. Die Folge eines solchen so genannten Pumpens ist, abgesehen von schlagartigem Verlust des Triebwerksschubs, in der Regel eine starke Beschädigung oder sogar die völlige Zerstörung der Maschine.

Es wird daher bei der Auslegung eines Verdichters darauf geachtet, dass für jeden Betriebspunkt und



Abbildung 3: Die Darmstädter Rotorfamilie Family of Darmstadt Rotors

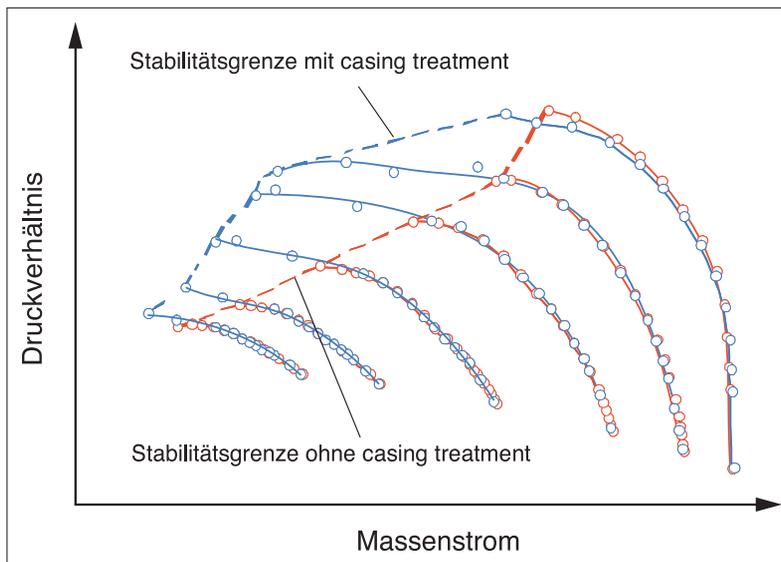


Abbildung 4: Vergrößerung des Arbeitsbereichs einer transsonischen Verdichterstufe durch eine Gehäusewandstrukturierung

Surge margin improvement of a transonic compressor stage by a third generation casing treatment [3]

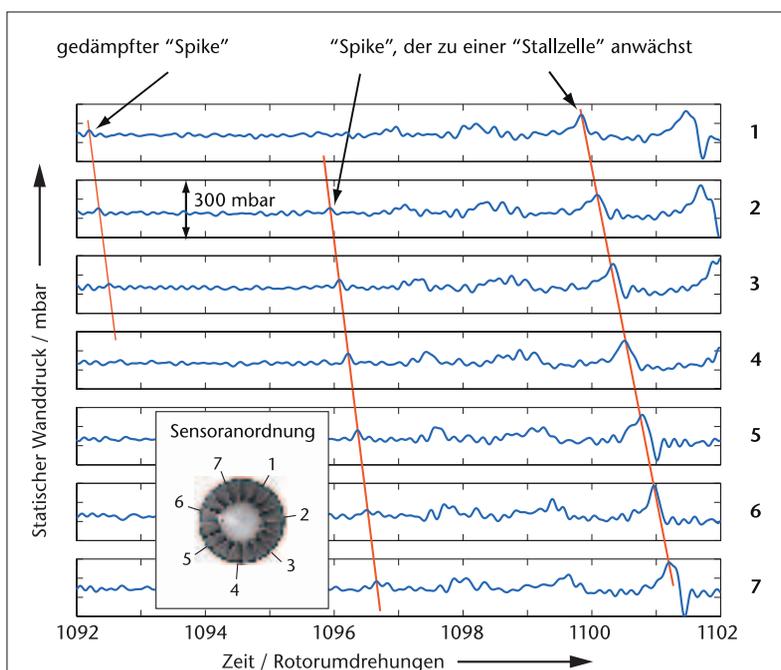


Abbildung 5: Signalanalyse von Wanddrucksignalen beim Stalleintritt mit vorausgehenden „Spikes“
Low-pass filtered wall-pressure signals at spike-type stall inception [5]

jeden transienten Vorgang im Triebwerk ein ausreichender Abstand zur Stabilitätsgrenze gewahrt bleibt. Die kritischen Fälle hierbei sind starke Beschleunigungen, wie sie beim Start und im Steigflug auftreten, oder Störungen im Triebwerkeinlauf z.B. durch Fehlanströmung des Triebwerks.

Im späteren Einsatz eines Triebwerks im Linienflugverkehr sollen Pumpvorgänge unter allen Umständen vermieden werden. Fällt während des Startvorgangs ein Triebwerk bei einem zweistrahligen Flugzeug aus, resultieren hieraus gleichzeitig zwei Dinge. Zum ersten muss der notwendige Schub durch das verbleibende Triebwerk aufgebracht werden. Der Pilot fordert durch den Schubhebel die maximale Drehzahl an. Zum zweiten erzeugt das verbleibende Triebwerk ein erhebliches Giermoment, das vom Piloten mit dem Seitenruder abgefangen werden muss. Gerade bei niedrigen Fluggeschwindigkeiten, wie im Falle des Starts, ist dies nur mit großer Mühe möglich, insbesondere wenn ein ungünstiger Seitenwind hinzukommt. Eine Fehlanströmung ist zumindest für einen kurzen Zeitraum unvermeidlich. Genau in diesem Moment wäre ein Pumpvorgang im verbliebenen Triebwerk das katastrophalste, was man sich vorstellen kann.

Bislang muss der sichere Abstand zur Stabilitätsgrenze mit einem Verzicht auf die maximale Ausnutzung der aerodynamischen Belastbarkeit der Beschaufelung erkauft werden, denn kurz vor Erreichen der Stabilitätsgrenze ist die Leistungsdichte des Verdichters in der Regel am höchsten. An diesen Punkt knüpfen zahlreiche Forschungsvorhaben am „Transsonischen Verdichterprüfstand“ des Fachgebietes Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe an. Dabei handelt es sich um einen hochbelasteten, einstufigen Axialverdichterprüfstand (Abb. 2), der Anfang der 1990er Jahre in enger Zusammenarbeit mit dem deutschen Triebwerksbauer MTU Aero Engines entworfen und in Betrieb genommen wurde. Mit der Verfügbarkeit leistungsfähiger numerischer Verfahren (3D RANS CFD-Verfahren) und den experimentellen Möglichkeiten des Transsonischen Verdichterprüfstandes wurde die systematische Untersuchung von dreidimensionalen Schaufelgeometrien (Abb. 3) ermöglicht, die neben einem verbesserten Stufenwirkungsgrad auch zu einer deutlichen Vergrößerung des Arbeitsbereiches geführt haben [2].

Gelingt es, zuverlässige Indikatoren für die Annäherung an die Stabilitätsgrenze zu identifizieren, kann der notwendige Pumpgrenzabstand reduziert und so die theoretisch verfügbare, aerodynamische Belastbarkeit weiter ausgenutzt werden. Alternativ wird versucht, die aerodynamische Stabilität der Strömung zu verbessern. Dabei lassen sich wiederum passive Maßnahmen, wie z.B. Modifikationen der Gehäusewand (Casing-Treatments), und aktive Systeme, wie z.B. einstellbare Vorleiträder oder kontrollierte Strömungseinblasungen, unterscheiden. Mit modernen Casing Treatments können die bisher mit der Vergrößerung des Betriebsbereiches (Abb. 4) einhergehenden Wirkungsgradeinbußen im Auslegungspunkt vermieden werden.

Grundlegend für jegliche Bemühungen ist es jedoch, ein detaillierteres Verständnis der Strömungsvorgänge, die maßgeblich den stabilen Arbeitsbereich begrenzen, zu gewinnen.

Untersuchungen [4] an Unterschall- und transsonischen Verdichtern führten zur Charakterisierung zweier Störungen des Strömungsfeldes, die der Entstehung von Rotating Stall vorausgehen. „Spikes“ sind lokal begrenzte, dreidimensionale Störungen, die im Blattspitzenbereich auftreten und zu Beginn mit annähernd Rotorfrequenz umlaufen. Innerhalb weniger Rotorumdrehungen nimmt jedoch ihre räumliche Ausdehnung zu und ihre Umlaufgeschwindigkeit ab. Schließlich geht die Störung in eine „Stall-Zelle“ über, die dann als Rotating Stall nur noch mit ungefähr halber Rotorfrequenz umläuft (Abb. 5). Bei manchen Verdichtern treten anstatt Spikes „Modale Wellen“ auf. Dabei handelt es sich um umfangssymmetrische, modale Oszillationen des gesamten Strömungsfeldes. Sie beginnen deutlich langsamer, mit ca. 20-30% Rotorfrequenz und beschleunigen bis zum Beginn des Rotating Stall auf ungefähr 50% Rotorfrequenz (Abb. 6).

Aufgrund der hochkomplexen Strömung im Laufrad eines transsonischen Verdichters mit gemischten Unter- und Überschallfeldern, Verdichtungsstößen sowie einem Interaktionsgebiet zwischen Spaltwirbel und Verdichtungsstoß gestaltet sich die numerische Simulation der zudem instationären Strömung in der Nähe der Stabilitätsgrenze sehr schwierig. Messungen des Strömungsfeldes in einem mit 20000 U/min drehenden Laufrad mit der erforderlichen zeitlichen und räumlichen Auflösung stellt die Experimentatoren vor ähnlich große Herausforderungen. Etabliert

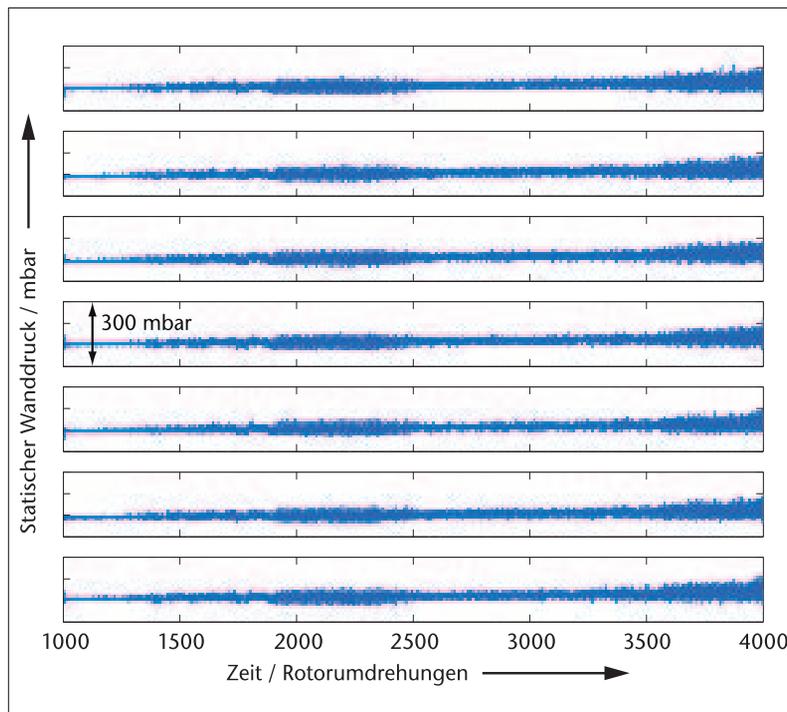


Abbildung 6: Signalanalyse von Wanddrucksignalen beim Stalleintritt mit vorausgehenden „Modalen Wellen“
 Low-pass filtered wall-pressure signals at modal-type stall inception [5]



Eine starke Gemeinschaft setzt auf engagierte Partner, die jeden Tag von neuem ihre ganze Energie der Region zugute kommen lassen.
 Auch für das Kraftwerk Biblis bedeutet Energie mehr als Stromerzeugung.
Dafür engagieren wir uns.

RWE Power



Die Kernenergie deckt bundesweit etwa 30% der Stromerzeugung. Mit ihrem hohen Sicherheitsstandard und dem hervorragend ausgebildeten Personal gelten die deutschen Anlagen als international vorbildlich.

Das Kraftwerk Biblis liegt 13 Kilometer nördlich der Stadt Worms auf der hessischen Rheinseite. Die Anlage umfasst zwei Kraftwerksblöcke, so genannte Druckwasserreaktoren, mit einer elektrischen Gesamtleistung von circa 2.500 Megawatt. Rund 650 Mitarbeiter gewährleisten mit ihrer hohen Kompetenz und ihrem großen Engagement seit 30 Jahren einen sicheren und zuverlässigen Betrieb der Anlage.

Die beiden Kraftwerksblöcke in Biblis erzeugen bei voller Leistung pro Jahr so viel Strom, wie fünf Millionen Haushalte in Deutschland verbrauchen. Gleichzeitig vermeidet das Kraftwerk - gegenüber der Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen - den Ausstoß von rund 15 Millionen Tonnen Kohlendioxid.

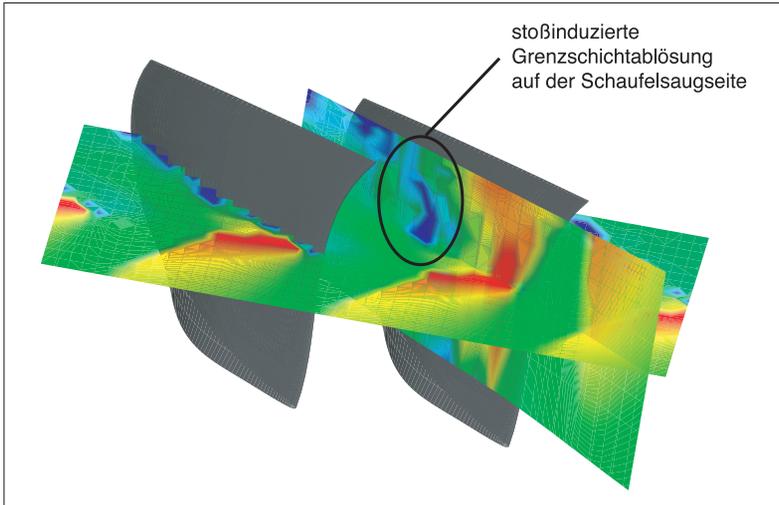


Abbildung 7:
Verteilung der Machzahl
im Relativsystem vermessen
mit einem 3D Laser-2-Fokus
Verfahren

Distribution of relative
Machnumber obtained by
3D laser-2-focus velocime-
try [6]

haben sich daher z.B. Laser-2-Fokus Messungen des Geschwindigkeitsfeldes, die jedoch nur zeitlich gemittelte Werte sowie deren Schwankungsgrößen liefern (Abb. 7), oder Messungen der Wanddruckverteilung (Abb. 8).

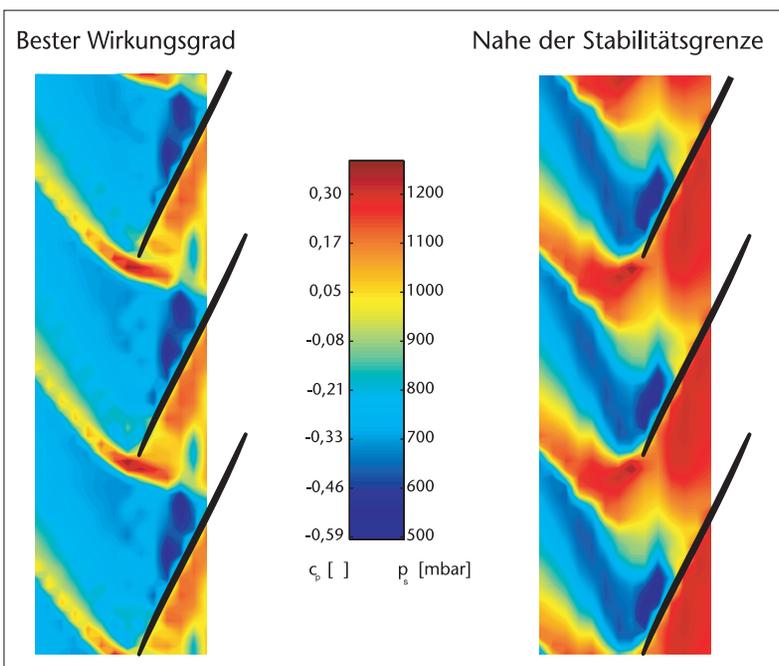
Innerhalb der nächsten 15 Jahre soll sich das Luftverkehrsaufkommen und die Anzahl der Verkehrsflugzeuge verdoppeln. Diese Prognose macht verständlich, warum sich die Umweltauflagen, die von der Luftfahrtindustrie zu erfüllen sind, immer weiter verschärfen. Ein im Jahr 2001 von europäischen Luftfahrtfirmen veröffentlichter Bericht [8] definiert wichtige Ziele für das Jahr 2020:

- Reduktion des Brennstoffverbrauchs und der CO₂ Emission um 50%
- Reduktion der wahrnehmbaren Lärms um 50%
- Reduktion der Stickoxide um 80%

Diese Zielsetzungen sind nur durch gemeinsame Anstrengungen von Industrie und Forschungseinrichtungen an den Universitäten zu erreichen, so dass dem Transsonischen Verdichterprüfstand des Fachgebiets GLR bestimmt auch in der Zukunft eine zentrale Rolle bei der Neuentwicklung wegweisender Verdichtertechnologien zukommen wird.

Abbildung 8:
Ensemble-gemittelte
Wanddruckverteilung

Ensemble-averaged instan-
taneous wall pressure dis-
tribution [7]



Das Fachgebiet Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe

Das Fachgebiet Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe (GLR) ist im Fachbereich Maschinenbau angesiedelt. Es vermittelt Studierenden die Anwendung physikalischer Grundlagen und ingenieurmäßige Vorgehensweise am Beispiel komplexer, technischer Systeme, wie es beispielsweise ein Flugtriebwerk darstellt. In der Forschung geht es vor allem um die aero-/thermodynamische Untersuchung der Strömungsvorgänge in den Kernkomponenten eines Triebwerks, wozu der Verdichter, die Brennkammer und die Turbine zählen. Zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen, die im Labormaßstab geschehen, stehen unter anderem ein Transsonikverdichter, ein Unterschallverdichter und ein Mischkammerprüfstand zur Verfügung. Schaufelkühlmethoden werden mit Hilfe eines rotierenden Prüfstandes zur Simulation von Schaufelkühlkanälen und einem großskaligen Filmkühlprüfstand untersucht. Derzeit wird eine Modellturbine aufgebaut, welche örtlich hochauflösende Strömungsfelduntersuchungen unter dem gleichzeitigen Einfluss von Kühlluftzufuhr ermöglichen soll.

Fachgebietsleiter:

Prof. Dr.-Ing. H.-P. Schiffer • Tel.: 06151/16-2150
Email: schiffer@glr.tu-darmstadt.de

Ansprechpartner:

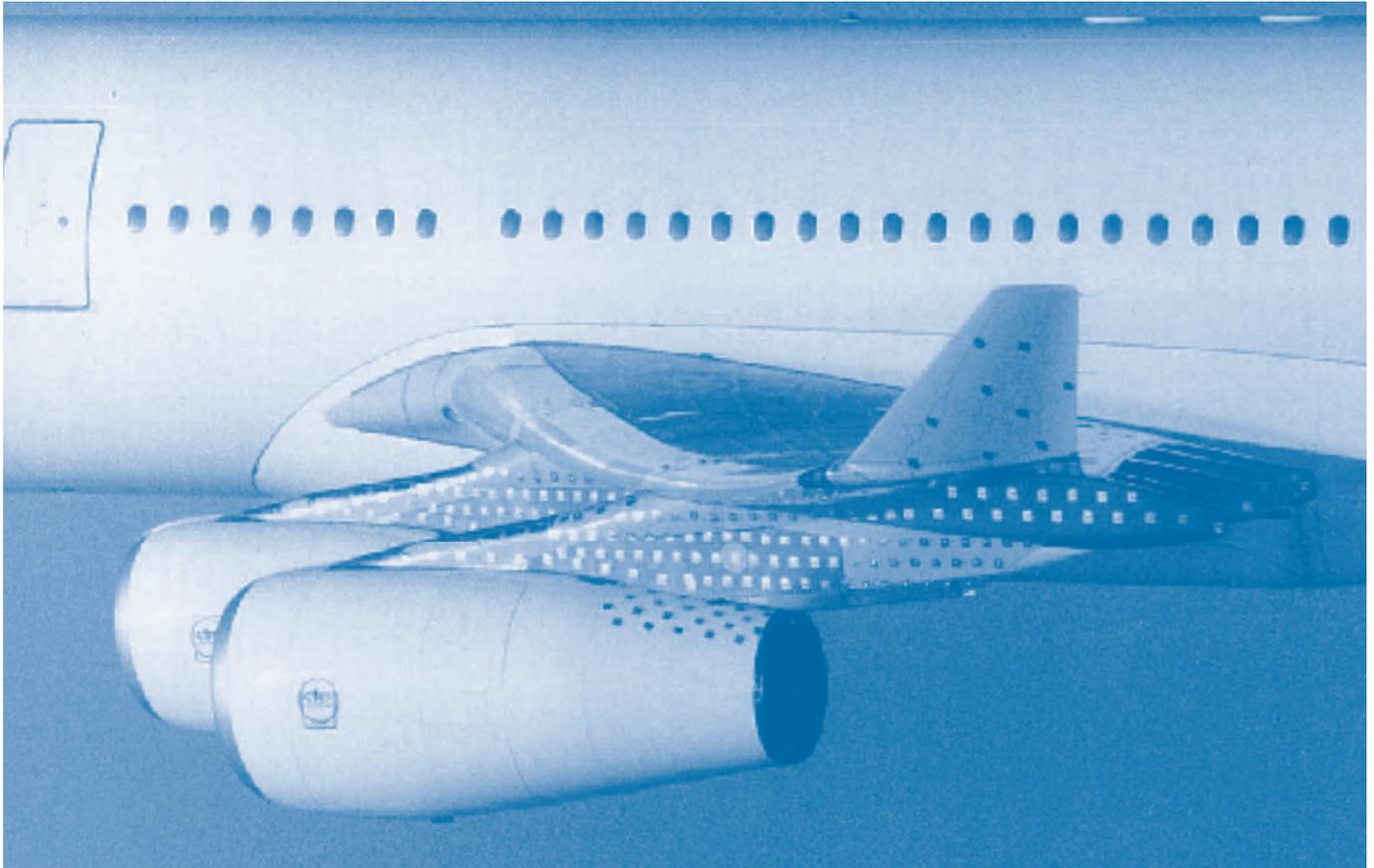
Dipl.-Ing. J. Bergner • Tel.: 06151/16-6727
Email: bergner@glr.tu-darmstadt.de

Anschrift:

Fachgebiet Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe
Petersenstraße 30 • 64287 Darmstadt

Literatur

- [1] Hoeger, M.; Engber, M.; Bergner, J.: "Impact of Transonic Compressor Rotor Leading Edge Shape on the Shock Structure near the Casing" Proc. The 10th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC10-2004-137), Honolulu, Hawaii, 7.-11. Mar. 2004.
- [2] Passrucker, H.; Engber, M.; Kablitz, S.; Hennecke, D.H.: "The Effect of Forward Sweep in a Transonic Compressor Rotor" Proc. 5th European Conference on Turbomachinery (Euroturbo 5), Praha, Czech Republic, 17.-22. Mar. 2003.
- [3] Broichhausen, K. D.; Ziegler, K. U.: "Supersonic and Transonic Compressors: Past, Status and Technology Trends" ASME Turbo Expo 2005, Reno, NV, USA, 6.-9. June 2005.
- [4] Camp, T. R.; Day, I. J.: "A Study of Spike and Modal Stall Phenomena in a Low-Speed Axial Compressor" In: Journal of Turbomachinery, 120. (1998), S. 393-401.
- [5] Bergner, J.; Hennecke, D. K.: "Experimental study of stall-inception of a single-stage transonic compressor" Proc. 16th Symposium Air Breathing Engines, Cleveland, OH, USA, 13. Aug. - 5. Sep. 2003
- [6] Bergner, J.; Kablitz, S.; Hennecke, D. K.; Passrucker, H.; Steinhart, E.: "Influence of Sweep on the 3D Shock Structure in an Axial Transonic Compressor" ASME Turbo Expo 2005, Reno, NV, USA, 6.-9. June 2005.
- [7] Bergner, J.; Hennecke, D.K.; Hah, C.: "Tip-Clearance Variations of an Axial High-Speed Single-Stage Transonic Compressor" Proc. 17th Int. Symposium on Air Breathing Engines, Munich, Germany, 4.-9. Sept. 2005,
- [8] The European Commission for Research – Report of the Group of Personalities: "European Aeronautics: A Vision for 2020, Meeting society's needs and winning global leadership". Office for Official Publications of the European Communities, Jan. 2001, L-2985 Luxembourg, ISBN 92-984-0559-7



Effizientere Verkehrsflugzeuge durch formvariable Landeklappen

Helmut Schürmann/Claus Bauer

Die kontinuierliche Adaption eines Flügelprofils an die jeweilige Flugsituation ist ein altes Ziel der Flugzeugbauer. Genutzt werden soll insbesondere der Vorteil der Gleitzahlverbesserung und die damit verbundene Treibstoffersparnis. Vorgestellt wird ein Konzept, bei dem die Struktur der Landeklappe flexibel gehalten wird, um die gewünschten Krümmungsänderungen vornehmen zu können. Diametrale Steifigkeitsanforderungen stellen die besondere Herausforderung dar. Das Problem lässt sich dank der Verwendung von Faser-Kunststoff-Verbunden lösen.

Increasing in efficiency of transport aircraft by adaptive flaps. A new concept for an adaptive flap structure for future transport aircraft is presented. The concept offers the chance to adjust the wing airfoil geometry to the actual flight conditions and because of that a fuel saving. The adjustment is performed by chordwise and span-wise deflections of the flexible trailing edge. In contrast to existing design approaches the kinematic actuation system is not located within the flap but integrated into the flap support system. The major design task is to meet the stiffness requirements: On the one hand the structure must be deformable to achieve the desired deflection while on the other hand sufficient stiffness is necessary to prevent inadmissible deformations due to the aerodynamic loads. A good solution was found due to the use of advanced composites.

Wie bei den meisten energieintensiven Transportsystemen bemüht sich auch der Flugzeugbau ständig um Effizienzsteigerung. Neben der Wirkungsgradsteigerung der Triebwerke und der Gewichtsreduzierung der Struktur bietet auch die Anpassung der Aerodynamik an die jeweilige Flugsituation Verbesserungspotenzial. Dieses Thema wurde in einem interdisziplinär angelegten Forschungsvorhaben „Adaptiver Flügel“ aufgegriffen. Primäre Ziele des Leitkonzepts „Adaptiver Flügel“ waren der verminderte Kraftstoffverbrauch durch Gleitzahloptimierung sowie eine mögliche Reduzierung des Strukturgewichts durch gezielt beeinflusste Lastkontrolle. Zusammen mit der EADS, Ottobrunn wurde vom Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen der TU Darmstadt ein Teilproblem aufgegriffen und ein Konzept erarbeitet, um durch eine übergangslose, knickfreie Änderung der Profilgeometrie während des Flugs eine Gleitzahloptimierung zu ermöglichen.

Das Hauptaugenmerk zur Profilanpassung lag im hinteren Bereich des Profils an den Spoilern und Klappen des Flügels (Bild 1). Deren grundsätzliche Funktion als Hochauftriebsbeihilfe und Flugsteuerung durfte nicht verändert werden. Zwei Ansätze zur Verbesserung der aerodynamischen Leistungsfähigkeit erschienen den Aerodynamikern besonders Erfolg versprechend: Eine verstellbare Auswölbung („Beule“) auf der Flügeloberfläche und die formvariable Hinterkante der Landeklappe (Bild 2). Die Beule reduziert die Intensität des Verdichtungsstoßes auf der Profilerseite und ermöglicht die Reduktion des Wellenwiderstands. Die Form der Hinterkante variabel zu halten bietet sowohl die Möglichkeit, spannweitig durch konstante oder aber auch differenzierte Wölbung des Flügelquerschnitts den Widerstand zu reduzieren, als auch die Auftriebsbelastungen gezielt zu kontrollieren. Das gemeinsame Forschungsprojekt beschäftigte sich mit der ersteren Zielsetzung, der Formvariabilität der Hinterkante der Landeklappe.

Landeklappe und Stellsystem

Das neue Konzept [1] sieht vor, das Stellsystem für eine flexible Hinterkante in die vorhandene Klappenlagerung zu integrieren. Bild 3 zeigt die konventionelle Ausführung der Landeklappenbetätigung mit Landeklappe in eingefahrener Position. Im neuen Konzept (Bild 4) wird die Landeklappennase über Querkraftaufnahmen verdrehsteif auf einen Zwischenträger montiert. Die Hinterkante hingegen ist formvariabel gehalten und mit der Landeklappennase verbunden. Anstelle des Normalkraftstabs am Ende der derzeitigen Landeklappenbefestigung wird ein hydraulischer Aktuator zur Verstellung der flexiblen Hinterkante eingesetzt. Da das Stellsystem nicht im Inneren der Klappenstruktur untergebracht wird, bietet die Lösung auch eine einfache Zugänglichkeit und eine hohe Wartungsfreundlichkeit. Der Vergleich der beiden Bilder (3 und 4) zeigt, dass gegenüber den derzeitigen Landeklappenlagerungen nur geringfügige Modifikationen zur Integration des externen, kinematischen Stellmechanismus für eine flexible Hinterkante erforderlich sind.

Formvariable Hinterkante

Während die Landeklappenlagerung der konventionellen Ausführung auch beim neuen Konzept beibehalten werden kann, muss der Strukturaufbau der flexiblen Hinterkante vollständig geändert werden. Es ist offensichtlich, dass die derzeitige Klappenstruktur (Bild 5) wegen ihrer steifen Bauweise sich nicht ausreichend verformen lässt. Sie ist dadurch charakterisiert, dass Rippen eine hohe Profilbiegesteifigkeit gewährleisten und in Spannweitenrichtung eine hohe Biegesteifigkeit durch Holme und Stringer erzielt wird. Folgende Änderungen gegenüber dem bekannten Strukturaufbau sind notwendig:

- Wegfall der steifen Rippen; Ersatz durch mehrere formvariable Stege
- Öffnung des Landeklappenprofils an der unteren Deckhaut, um die Krümmung des Profils zu ermöglichen

Die Anforderungen an die Steifigkeit der neuen Hinterkantenstruktur sind kontrovers. Um eine Krümmung der Hinterkante zu ermöglichen, muss die Profilbiegesteifigkeit einerseits verringert werden, andererseits jedoch immer noch groß genug sein, um unzulässige Verformungen durch aerodynamische Kräfte auszuschließen. Darüber hinaus ist eine große Biegesteifigkeit in Spannweitenrichtung zu gewährleisten, um unzulässige Durchbiegung der Struktur zwischen den Landeklappenlagern zu verhindern. Die Erfüllung dieser diametralen Steifigkeitsanforderungen ist nur durch eine Kombination aus

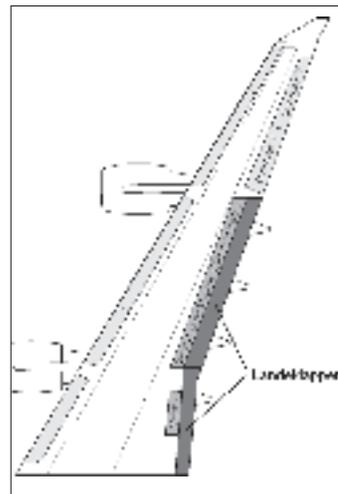


Bild 1: Draufsicht auf einen Flügel des Airbus A340; Position der Landeklappen
Top view of the wing of an Airbus A340, position of the flaps

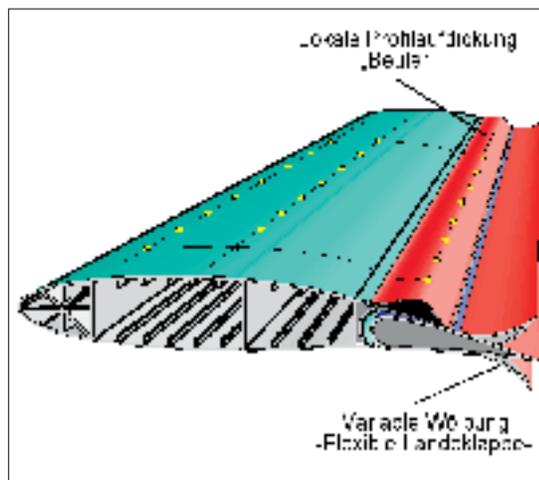


Bild 2: Mögliche Änderungen an der Flügelstruktur zur Gleitzahloptimierung: eine lokale Profilaufdickung und/oder eine flexible Landeklappe
Potentialities to adjust the wing profile in order to optimize the L/D ratio: local bump or flap with flexible trailing edge

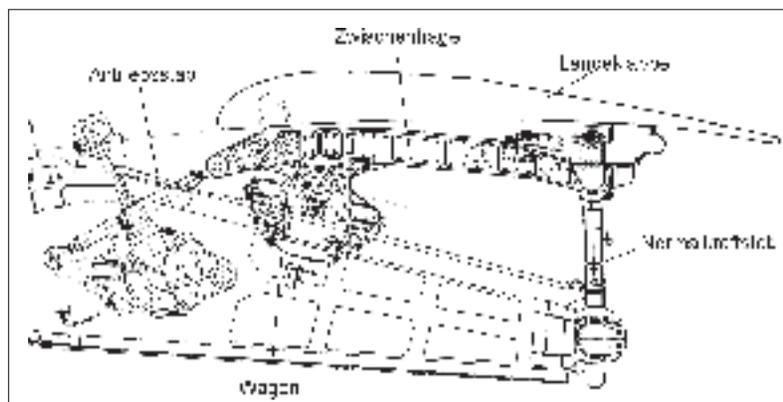


Bild 3: Konventionelle Lagerung der Landeklappe beim Airbus A340
Conventional mounting of the flap (Airbus A340)

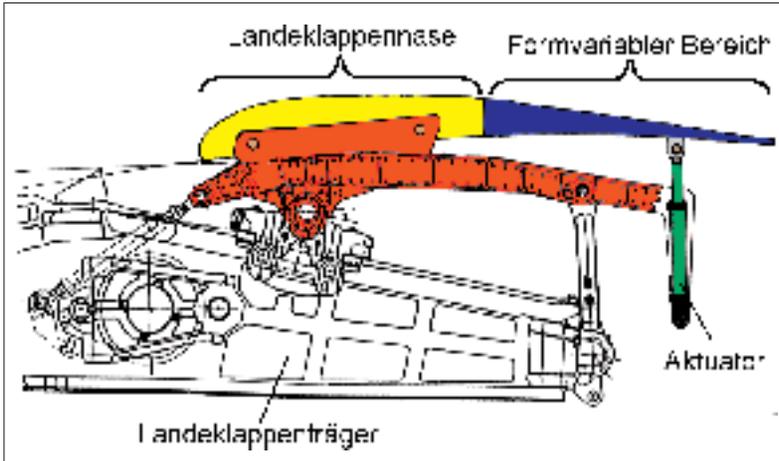


Bild 4:
Neues Konzept: Lagerung der flexiblen Landeklappen und Position des Stellantriebs
The new concept: mounting of the flexible flap and position of the extended kinematic system

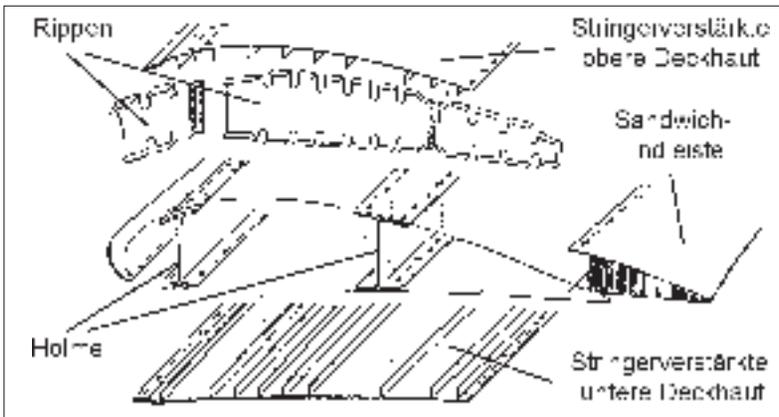


Bild 5:
Struktureller Aufbau der konventionellen Landeklappen
Structure of a conventional flap

Bild 6:
Aufbau des formvariablen Endbereichs des neuen Landeklappenkonzepts
Flexible trailing edge structure of the new flap concept

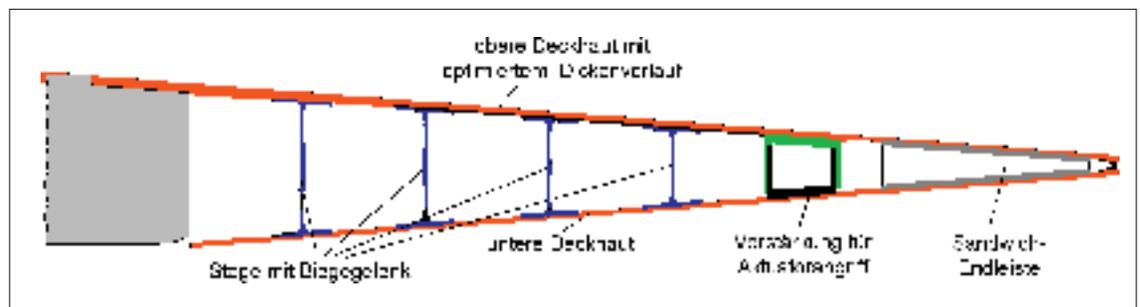
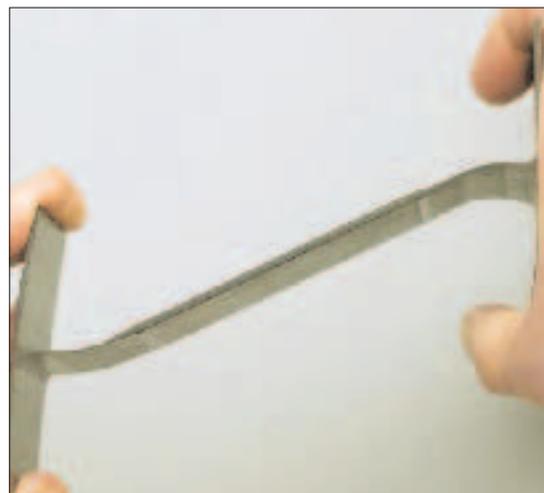


Bild 7:
Mögliche S-Schlag-Deformation der Stege durch integrierte Biegeelenke
Possible S-shape deformation of the web due to the integration of film hinges



- neuartigen konstruktiven Detaillösungen und
- anisotropen Faserverbundwerkstoffen möglich. Bild 6 zeigt die neue Hinterkantenstruktur, die rippenlos ist und nur aus den Deckhäuten und speziellen Stegen besteht. Zentrales Element dieser Konstruktion ist die obere Deckhaut. In Profiltiefenrichtung wurde ihre Steifigkeit gezielt darauf optimiert, den gewünschten Krümmungsverlauf der Landeklappen zu generieren. In Spannweitenrichtung wurde ihre Steifigkeit maximiert. Die unterschiedlichen, richtungsabhängigen Steifigkeiten der oberen Deckhaut lassen sich besonders gut mit Faser-Kunststoff-Verbunden realisieren. Sie bieten eine Reihe von Gestaltungsfreiräumen. Dabei steht die Möglichkeit, die Fasern gezielt zu orientieren, an erster Stelle. Biegesteifigkeiten lassen sich durch die Reihenfolge der Einzelschichten in einem Laminat variieren [2].

Die obere Deckhaut stellt auch die einzige Verbindung zur Landeklappennase her. Die untere Deckhaut ist nicht an der Klappennase angeschlossen, da hier bei der Hinterkantenkrümmung große Verschiebungsunterschiede auftreten.

Von entscheidender Bedeutung für die Funktionsfähigkeit sind die Stege. Um die sich einstellende S-Schlag-Deformation bei Krümmung der Landeklappenstruktur zu ermöglichen sind im oberen und unteren Bereich der Stege Biegeelenke integriert (Bild 7). Eine derartige Integration lässt sich mit Faserverbundwerkstoffen ermüdungsfest ohne weiteres umsetzen.

Analyse der Strukturverformung

Um die Strukturverformung unter aerodynamischen Lasten zu analysieren, wurde ein dreidimensionales FE-Modell erstellt. Dabei wurden zur Vereinfachung

die Pfeilung der Landeklappen und die spanntreue Zuspitzung vernachlässigt, d.h. der flexible Landeklappenbereich wurde als Rechteck abgebildet. Es wurden verschiedene Lastfälle sowie Zu- und Entwölbungen der Landeklappen überprüft. Ziel war es sicherzustellen, dass die Struktursteifigkeiten ausreichen und dementsprechend keine unzulässigen Verformungen auftreten. Bild 8 zeigt beispielhaft ein Ergebnis. Betrachtet wurde die Neutralstellung der Landeklappen bei Reisefluglast. Man erkennt an der überhöhten Verformungsdarstellung, dass in Spannweitenrichtung eine minimale Entwölbung durch die Luftkräfte stattfindet. Darüber hinaus wird eine geringfügige Welligkeit in Profiltiefenrichtung sichtbar. Beide Verformungen sind akzeptabel; die aerodynamische Profiltiefe der verformten Struktur erfüllt die gestellten Anforderungen.

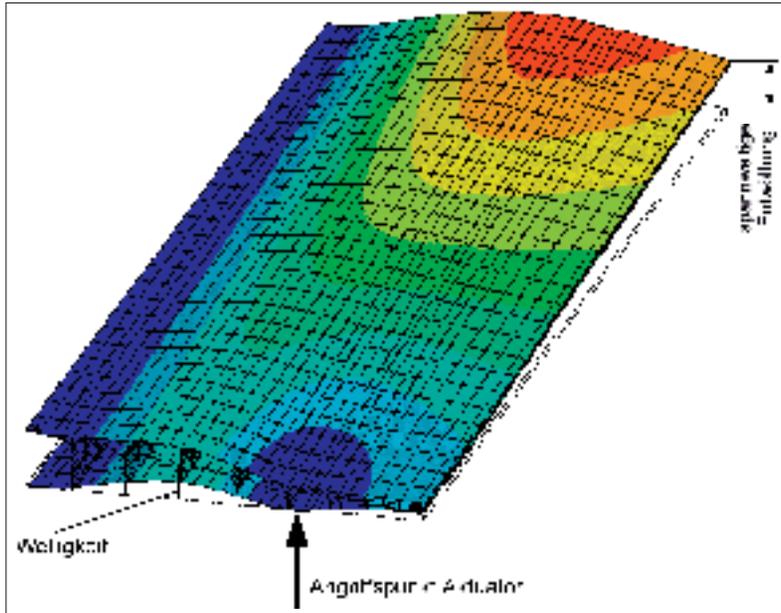


Bild 8:
Um den Faktor 30 überhöht dargestellte Vertikalverschiebungen des Endbereiches der flexiblen Landeklappen (Neutralstellung; Lastfall Reiseflug)
Vertical deformations of the flexible trailing edge in an enlarged scale (neutral position; load case: cruise flight)

Zusammenfassung

Es wurde eine neue konstruktive Lösung für eine flügelvariable Geometrie vorgestellt: das Konzept der rippenlosen Wölbklappe. Charakteristische Merkmale sind die hochgradig anisotrope und passive Struktur und das externe kinematische Stellsystem. Daraus ergeben sich entscheidende Vorteile:

- eine geringe Anzahl der zu wartenden Teile
- ein leichter Zugang für Wartungsarbeiten
- eine verbesserte Zuverlässigkeit durch Reduzierung der Systemkomplexität.

Die wichtigste Aufgabe bei der Konstruktion der flexiblen Hinterkante bestand darin, einen Kompromiss bezüglich der Steifigkeitsanforderungen zu finden. Einerseits musste die Struktur gezielt verformbar sein, andererseits eine ausreichende Steifigkeit aufweisen, um die aerodynamische Profildüte zu gewährleisten. Dieser Kompromiss gelang durch die Verwendung von Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbunden. Die Nachweise mit Hilfe der FE-Analyse waren so ermutigend, dass ein Demonstrator erstellt wurde. Dehnungsmessungen am im Maßstab 1:1 gefertigten flexiblen Landeklappenstück zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit den vorausberechneten Werten.

Literatur

- [1] Bauer, C.: Die rippenlose Wölbklappe. Realisierung eines formvariablen Tragflügelprofils zur aerodynamischen Leistungsoptimierung zukünftiger Verkehrsflugzeuge. Diss. TU Darmstadt, (2000) Shaker Verlag
- [2] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. (2004); Springer Verlag

Das Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen

Das Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen im Fachbereich Maschinenbau besteht seit 1994. Forschungsgegenstand sind die Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) als ideale Leichtbauwerkstoffe. Der Fokus liegt dabei auf dem Konstruieren mit dieser anisotropen Werkstoffklasse. Ziel ist es, Konstruktionsmethoden und Lösungsprinzipien zu entwickeln, die die besonderen Möglichkeiten der Faserverbundwerkstoffe nutzen. Hoch beanspruchte Krafteinleitungen sind ein weiterer Schwerpunkt der Forschung. Bei der Entwicklung von Strukturbauteilen werden alle Stationen einer Produktentwicklung, vom Entwurf über Konstruktion und Dimensionierung, durchlaufen. Zur Prototypenfertigung steht ein

Faserverbund-Technikum zur Verfügung. Für vertiefte experimentelle Untersuchungen gibt es rechnergesteuerte Prüfstände.

Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann
TU Darmstadt • Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen
Petersenstr. 30 • 64287 Darmstadt
Tel. 06151/16-2160
e-mail: helmut.schuermann@klub.tu-darmstadt.de
www.klub.tu-darmstadt.de

Co-Autor:

Dr.-Ing. Claus Bauer, ehemals an der TU Darmstadt, jetzt Lufthansa Technik AG, Hamburg

Kraftwerkstechnik
made by
ALSTOM

ALSTOM Power AG
Boveristr. 22 · 68309 Mannheim
Telefon 0621/329-0 · Telefax 0621/329-8868
www.alstom.de



Halbmodellmesstechnik in Windkanälen

Stephan Eder/Klaus Hufnagel/Cameron Tropea

Das Projekt Halbmodellmesstechnik in Windkanälen befasst sich mit der Untersuchung des Einflusses des so genannten Peniches, eines Abstandhalters zwischen Wand und Modell, auf die Modellumströmung. Sowohl numerisch als auch experimentell werden die Auswirkungen unterschiedlicher Peniche-Geometrien untersucht. Ziel des Projektes ist es, eine geeignete Peniche-Geometrie zu finden, die die Umströmung des Vollmodells besser auf das Halbmodell abbildet, da hier z.T. noch erhebliche Abweichungen vorhanden sind.

Abb. 3:
Typische Halbmodellordnung im ETW (mit freundlicher Genehmigung der European Transonic Windtunnel GmbH; www.etw.de)
Typical half-model-configuration in the ETW (courtesy of European Transonic Windtunnel GmbH; www.etw.de)

Semi-span or half-model testing is a common method for achieving higher Reynolds numbers in existing wind tunnels while also lowering model and balance costs. The basic principle is to treat the mid-plane of the aircraft as a plane of symmetry and use half of the airplane model. The symmetry plane is replaced by the wind tunnel side-wall or floor. Despite the attractiveness of semi-span testing, there still exist numerous uncertainties about the correct procedure for mounting the model in the wind tunnel. To avoid interaction of the wall boundary layer with the flow around the aircraft model, typically a non-metric standoff is used between the wind tunnel wall and the half-fuselage. This standoff is sometimes also called 'peniche' and the shape and size of the peniche is the topic of the project.

Windkanäle haben einen festen unverzichtbaren Platz in der aerodynamischen Forschung. Ohne sie wäre der moderne Luftverkehr, wie wir ihn heute kennen, gar nicht möglich. Die moderne Luftfahrt und die aerodynamischen Forschung begannen am Ende des 19. Jahrhunderts, ebenso wie der Flugzeugbau auch der Windkanalbau.

Damit sich die Strömung um ein Modell im Windkanal genau so verhält wie die Strömung um das reale Flugzeug sind einige grundlegende Dinge zu beachten. Die beiden wichtigsten sind hierbei die exakte Abbildung der Machzahl und die Abbildung der Reynoldszahl. Die Abbildung der Machzahl stellt in der Regel kein Problem dar. Jedoch ist die Abbildung der Reynoldszahl in einem Windkanal schwer zu realisieren.

Sehr schnell wurde das große Problem der Windkanäle deutlich: Das Erreichen von realen Flugreynoldszahlen war nicht möglich.

Aufgrund des im Vergleich zur Großausführung kleineren Modells wird auch die Reynoldszahl kleiner, wenn die anderen Größen Viskosität und Geschwindigkeit konstant gehalten werden. In konventionellen Windkanälen ist die Viskosität nicht zu ändern. Ein einfaches Erhöhen der Geschwindigkeit ist auch nicht möglich, da ansonsten die Abbildung der Machzahl nicht mehr gewährleistet ist.

Da es über lange Zeit nicht möglich war, in Windkanälen reale Flugreynoldszahlen zu erreichen, kam es im Laufe der Flugzeugentwicklung zu Fehlern, deren Korrekturen zum Teil enorme Kosten verursacht haben.

In neuerer Zeit ist es aber möglich, durch die Einführung der Kryotechnik die Reynoldszahl in Windkanälen erheblich zu steigern und Werte zu erreichen, die bei modernen Großflugzeugen wie dem A-380 auftreten. Hierbei wird das Strömungsmedium Luft durch sehr kalten Stickstoff ersetzt. Durch diese Maßnahme ändert sich die Viskosität des Fluids und die Reynoldszahl steigt.

Zusammen mit der Halbmodellmesstechnik, die auch in konventionellen Windkanälen eingesetzt wird, ist es zum ersten Mal möglich, in einem Windkanal reale Flugreynoldszahlen zu erreichen. Abbildung 1 zeigt die Reynoldszahl in Abhängigkeit von der Machzahl, die im Europäischen Transsonischen Windkanal (ETW) erreicht werden kann.

Bei der Halbmodellmesstechnik wird davon ausgegangen, dass das Flugzeug und dessen Umströmung symmetrisch zur Mittelebene sind. Das Flugzeug wird in seiner Symmetrieebene getrennt und es wird nur eine Hälfte (das Halbmodell) im Windkanal untersucht. Hierfür wird das Halbmodell mit der Teilungsebene zur Kanalwand hin befestigt. Die Wand bildet somit die Symmetrieebene. Abbildung 2 zeigte eine schematische Darstellung einer Halbmodellanordnung. Da sich entlang der Kanalwand jedoch eine Grenzschicht ausbildet wird das Modell so befestigt, dass sich die Teilungsebene des Rumpfes ein Stück entfernt von der Wand befindet. Der hierdurch entstehende Spalt zwischen dem Modell und der Wand wird mit einem Sockel, dem so genannten Peniche aufgefüllt. Das Peniche darf keinen Kontakt zum Rumpf besitzen, da nur die am Flugzeug angreifenden Kräfte gemessen werden sollen. Es bleibt ein schmaler Spalt zwischen Rumpf und Peniche.

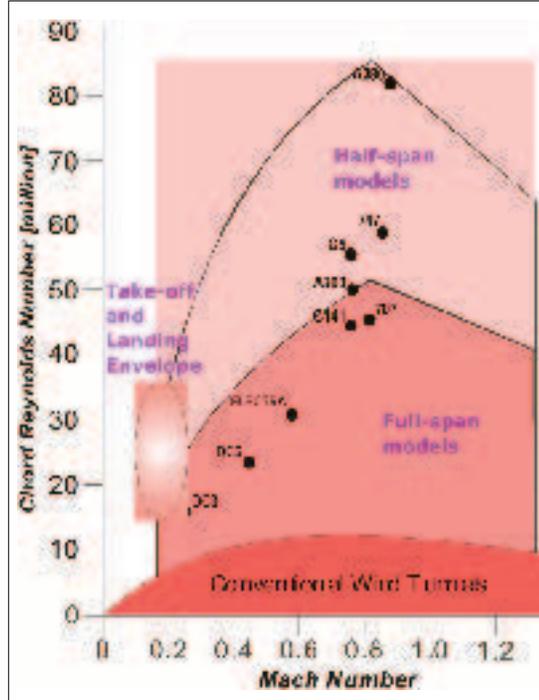


Abbildung 1: Reynoldszahlbereich des ETW für Vollmodell- und Halbmodellmessungen und im Vergleich Reynoldszahlen konventioneller Windkanäle, sowie Reynoldszahlen von Transportflugzeugen (mit freundlicher Genehmigung der European Transonic Windtunnel GmbH; www.etw.de)

Reynolds number of the ETW for full-span- and semi-span-testing and Reynolds number of standard windtunnels, as well as Reynolds number of transport aircraft (courtesy of European Transonic Windtunnel GmbH; www.etw.de)

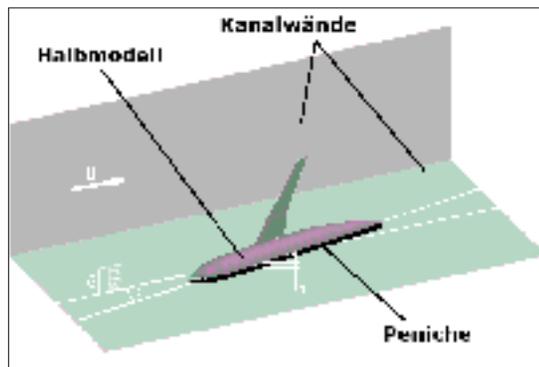


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Halbmodellanordnung (U = Anströmgeschwindigkeit, α = Anstellwinkel, h = Peniche-Höhe, δ = Grenzschichtdicke)

Sketch of a semi-span configuration (U = velocity, α = angle of attack, h = peniche thickness, δ = boundary-layer thickness)

Reynoldszahl:

Die Reynoldszahl gibt das Verhältnis der Trägheitskräften zu den Zähigkeitskräften an, die von einem Strömungsmedium auf einen Körper bei der Umströmung ausgeübt werden. Das Verhältnis hängt dabei von der Geschwindigkeit und der Größe des umströmten Körpers sowie von der Zähigkeit des Strömungsmediums ab.

$$Re = \frac{vl}{\nu} = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Zähigkeit}}$$

l = charakteristische Länge (oft Profiltiefe)

v = Geschwindigkeit

ν = kinematische Viskosität des Mediums

Machzahl:

Bei der Machzahl handelt es sich um das Verhältnis von Trägheitskräften zu Kompressionskräften, die durch das Strömungsmedium auf den umströmten Körper wirken. Dabei hängt die Machzahl von der Strömungsgeschwindigkeit und der Schallgeschwindigkeit ab. Die Schallgeschwindigkeit ist wiederum von den Umgebungsbedingungen abhängig.

$$Ma = \frac{v}{a} = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Kompressionskraft}}$$

a = Schallgeschwindigkeit

v = Geschwindigkeit

$$a = \sqrt{\kappa RT}$$

R = Gaskonstante (bei Luft = 287,1 J/kg⁻¹K⁻¹)

T = Temperatur des Mediums

κ = Adiabatenexponent (bei zweiatomigen Gasen = 1,4)



Der Grund für die Verwendung von Halbmodellen ist die Vergrößerung des Modellmaßstabs bei gleich großer Messstrecke und somit die Vergrößerung der Reynoldszahl. Außerdem ist bei einem Halbmodell die Zugänglichkeit zum Modellinneren besser gewährleistet und die Fertigungskosten sind niedriger. Die Geometrie des Peniches entspricht in der Regel einer geraden Verlängerung der Rumpfkontur zur Wand hin. Man spricht in diesem Fall von einem zwei-dimensionalen Peniche. In Abbildung 3 ist eine typische Halbmodellordnung im ETW zu sehen.

Durch die Grenzschicht der Kanalwand und das Peniche treten jedoch Effekte auf, die die Umströmung des Halbmodells im Vergleich zur Vollmodellumströmung verändern.

Zum Einen beeinflusst das Vorhandensein der Wand bzw. der Grenzschicht die Strömung und zum Anderen bildet sich durch den Druckanstieg und die damit verbundene Ablösung der Strömung von der Wand vor der Rumpfnase ein Wirbel aus. Der Wirbel legt sich in Hufeisenform um den Rumpf herum (Abb. 4). Diese beiden Einflüsse führen dazu, dass die Messergebnisse nicht ohne Weiteres auf ein Vollmodell übertragen werden können.

Es gibt z.Zt. noch keine abgesicherten Erkenntnisse, ob es möglich ist, durch eine Veränderung der Peniche-Geometrie die Strömung so zu beeinflussen,

dass der Strömungsverlauf bei einem Halbmodell mit dem des Vollmodells identisch ist. So wurden z.B. numerische Untersuchungen [1] und Experimente [2] mit so genannten 3D-Penichen durchgeführt. Eine eindeutige Formulierung für die Änderungen der Peniche-Geometrie gibt es jedoch nicht. Leider wurden auch bei einem großen Teil der Untersuchungen innerhalb einer Messkampagne unterschiedliche Modelle in zum Teil unterschiedlichen Kanälen verwendet und miteinander verglichen. Somit kommen zum Einfluss der geänderten Penichegeometrie auch noch der Einfluss der Modellgeometrie und der Einfluss der Windkanäle hinzu.

Bei dem Projekt Halbmodellmesstechnik am Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik soll deswegen ein völlig neues Konzept angewendet werden, um noch offene Fragen in diesem Bereich zu klären.

Abbildung 6:
Numerisch berechnete Konfigurationen
Numerically studied configurations

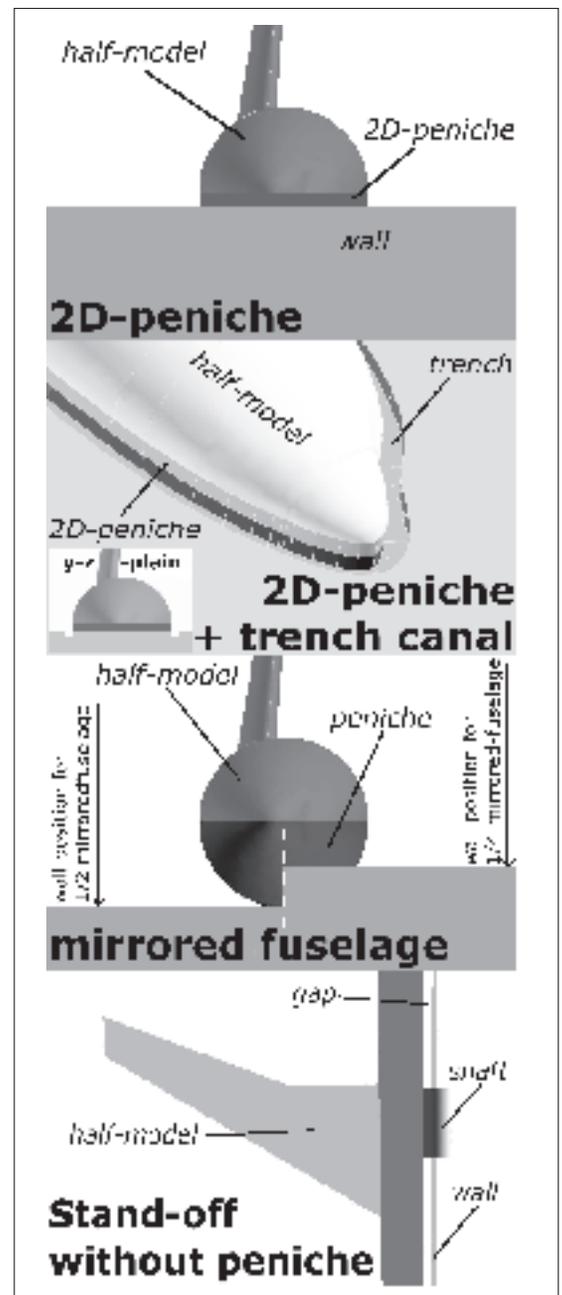


Abbildung 4:
Ablöse- und Wirbelgebiet im Bereich der Rumpfnase (Farbskala:
Druckabweichung [Pa] zum Bezugsdruck)

Separation and vortex in front of the fuselage (colour map: pressure deviation [Pa] from the reference pressure)

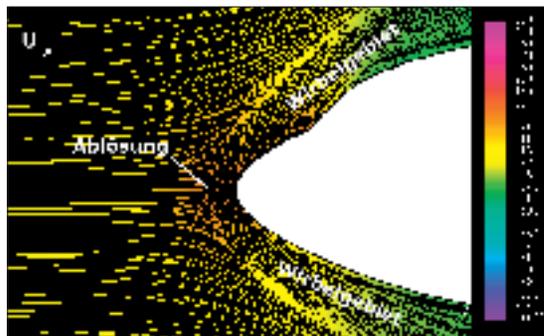
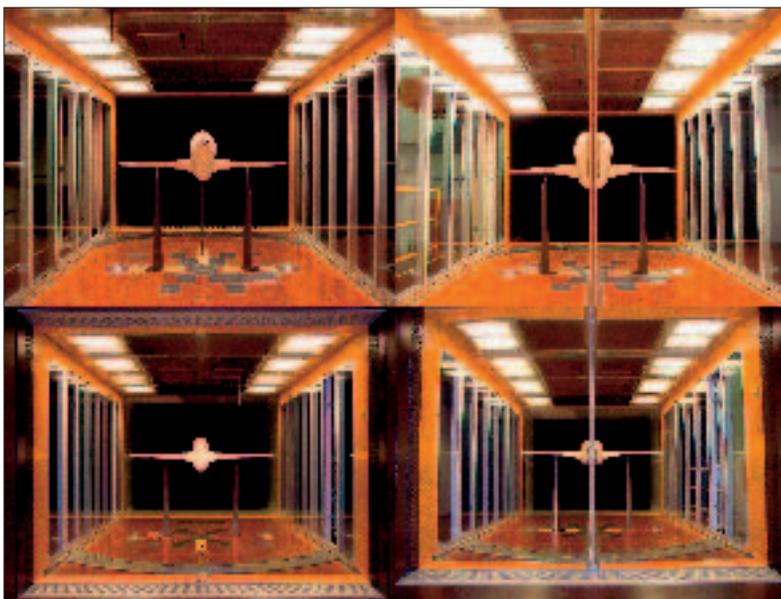


Abbildung 5:
Versuchsaufbau im Unterschallwindkanal des Fachgebiets (links: Vollmodell; rechts: Halbmodelle in der geteilten Messstrecke)

Experimental setup in the low-speed windtunnel of the institute (left: full-span; right: semi-span in the divided test-section)



Das Konzept besteht aus einem Flugzeugmodell das sowohl als Vollmodell als auch als Halbmodell verwendet werden kann. Das Vollmodell ist mit einer Drei-Stiel-Anordnung auf der externen Waage des Windkanals des Fachgebietes befestigt. Für die Halbmodellmessungen wird das Modell in der Mitte geteilt und es wird eine Mittelwand in die Messstrecke des Kanals eingezogen. Es entstehen somit zwei Halbmodelle (Abb. 5). Die beiden Halbmodelle sind innerhalb der Wand miteinander verbunden und ebenfalls mit einer Drei-Stiel-Anordnung auf der externen Waage befestigt. Hierdurch wird gewährleistet, dass sich das gleiche Modell an der gleichen Stelle im gleichen Windkanal befindet. Somit können Kanal- und Geometrieinflüsse ausgeschlossen werden. Dies ist wichtig, denn je geringer die umgebenden Einflüsse sind, desto stärker treten die Einflüsse geänderter Penichegeometrien zum Vorschein. Lediglich die zusätzliche Versperrung durch die Mittelwand hat einen Einfluss, der zu berücksichtigen ist.

Das Projekt, das mit Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft durchgeführt wird, besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen. Zum Einen aus numerischen Voruntersuchungen und zum Anderen aus Messungen im Windkanal.

Die numerischen Voruntersuchungen dienen dazu, eine geeignete Auswahl an Peniche-Geometrien zu finden, die dann im Experiment untersucht werden. Für die Numerik werden die Programme der Firma Fluent verwendet. Das simulierte Rechengebiet umfasst hierbei die Düse, die Messstrecke und den Diffusor. Als Turbulenzmodell wird das k-ε-Modell

mit der Wandfunktion enhanced-wall-treatment verwendet.

Neben dem Vollmodell (Referenz) werden die in Abbildung 6 dargestellten Geometrien simuliert, diese sind zweidimensionale Peniche unterschiedlicher Höhe, zweidimensionale Peniche mit einem umlaufenden Kanal, Peniche, die der Geometrie des Rumpfes entsprechen und Simulationen ohne Peniche mit einem Spalt zwischen Rumpf und Wand.

Die Simulationen haben zwei wesentliche Ergebnisse hervorgebracht, auf denen die Experimente aufbauen. Zum einen hängt die Abweichung der aerodynamischen Beiwerte von der Penichedicke ab. Je dicker das Peniche ist, desto größer sind die Abweichungen zu den Vollmodellergebnissen. Milholen II [3] hat durch numerische Untersuchungen eine ähnliche Abhängigkeit entdeckt. Eine Ursache hierfür liegt in der zusätzlichen Versperrungswirkung des Peniches. Mit dicker werdendem Peniche erhöhen sich die lokalen Anströmgeschwindigkeiten. Das zweite interessante Ergebnis ist, dass es von Vorteil ist, das Peniche weg zu lassen, d.h. zwischen Modell und Wand einen Spalt zu lassen. Die Abweichung zwischen den Ergebnissen ohne Peniche und dem Vollmodell sind z.T. sehr gering, bzw. nicht größer als die des zweidimensionalen Peniches. Ein Vorteil der Konfiguration ohne Peniche ist, dass sich vor der Rumpfnase kein Wirbel mehr ausbildet (Abb. 7).

Das Weglassen des Peniches führt aufgrund der Spalt-einströmung nicht dazu, dass der Staupunkt direkt auf der Nase liegt, jedoch liegt er deutlich näher an der Rumpfnase. Bei beiden Halbmodellkonfiguration (2D-Peniche und Weglassen des Peniches) stimmen die Druckbeiwerte genau in der Symmetrieebene nicht mit denen des Vollmodells überein. Ein Stück außerhalb der Symmetrieebene nähert sich die Druckverteilung der Konfiguration ohne Peniche sehr schnell der Druckverteilung des Vollmodells an (kein störender Einfluss des Wirbels). Ein Vergleich der Druckverteilungen im Nasenbereich etwas außerhalb der Symmetrieebene zeigt, dass die Druckverteilung bei einem 2D-Peniche eine viel größere Abweichung zum Vollmodell hat (Abb. 8).

Aufgrund dieser numerischen Ergebnisse werden bei den Windkanalexperimenten Messungen mit dem Vollmodell (Referenzmessungen), mit zweidimensionalen Penichen und ohne Peniche durchgeführt.

Wie in Abbildung 9 zu sehen ist, zeigen erste Experimente, dass sich die numerischen Ergebnisse bestätigen und sich ein Weglassen des Peniches positiv auf den Auftriebsbeiwert auswirkt. Im Bereich kleiner Anstellwinkel stimmt der Auftriebsbeiwert der Messungen ohne Peniche gut mit dem Auftriebsbeiwert

Beiwerte:

Es ist oft üblich, nicht die tatsächlich angreifenden Kräfte oder Drücke, sondern an ihrer Stelle die dimensionslosen Beiwerte anzugeben.

Auftriebsbeiwert:

$$C_A = \frac{A}{\frac{1}{2}\rho v^2 S}$$

Druckbeiwert:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho v^2 S}$$

A = Auftriebskraft

p = gemessener Druck

p_∞ = statischer Druck der ungestörten Anströmung

S = Bezugsfläche

(bei Flugzeugen die projizierte Flügelfläche)

v = Strömungsgeschwindigkeit

ρ = Dichte des Mediums

2



Abbildung 7:
Stromlinien im Bereich der Rumpfnase; links: 2D-Peniche, rechts: ohne Peniche
Streamlines in front of the fuselage; left: 2d-peniche, right: without peniche

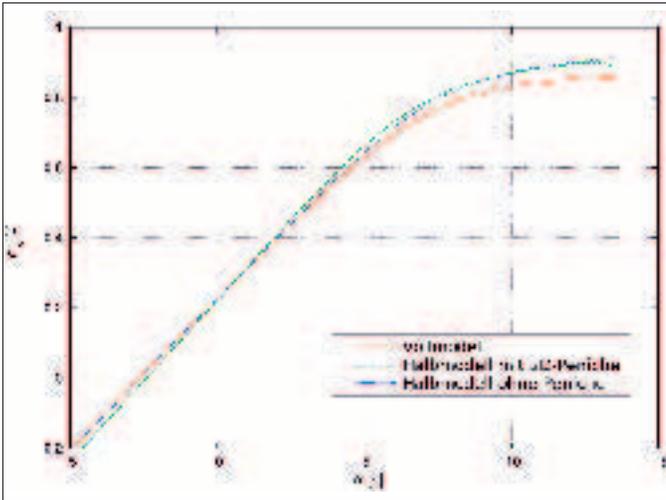


Abbildung 8: Numerisch berechnete Druckverteilung im Bereich der Rumpfnase ($\alpha = 6^\circ$); im Vergleich: Vollmodell, Halbmodell mit 2D-Peniche und Halbmodell ohne Peniche
 Numerical calculated pressure distribution at the front of the fuselage ($\alpha = 6^\circ$); comparison between: full-span, semi-span with 2d-peniche and semi-span without peniche

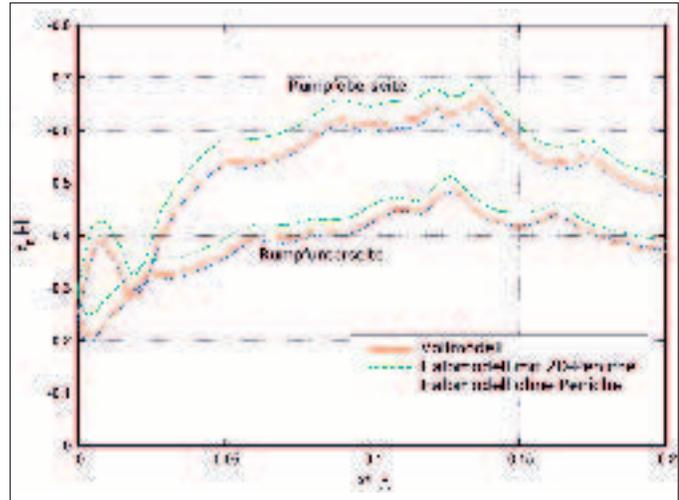


Abbildung 9: Experimentell gemessener Auftriebsbeiwert bei 35ms-1; im Vergleich: Vollmodell, Halbmodell mit 2D-Peniche und Halbmodell ohne Peniche
 Measured lift-coefficient at 35ms-1; comparison between: full-span, semi-span with 2d-peniche and semi-span without peniche



www.hse.ag

Wir machen uns stark für maßgeschneiderte Energielösungen.

Auch Sie können von den intelligenten, technisch ausgereiften Energiedienstleistungen der HEAG Süd Hessische Energie AG profitieren. Von der Beratung, Planung und Realisierung bis zur Betriebsführung und Wartung bündeln wir unsere Energie, damit Sie sich um Ihr Kerngeschäft kümmern und Ihr Budget entlasten können. Mehr Infos unter Tel. 06151 701-6000.



der Vollmodellmessungen überein. Erst im Bereich größerer Anstellwinkel kommt es zu einer stärkeren Abweichung. Weitere Messungen werden Aufschluss darüber geben, wie sich die aerodynamischen Beiwerte in Abhängigkeit von der Breite des Spaltes zwischen Rumpf und Wand verhalten. Ebenso werden noch Korrekturfunktionen gesucht, mit denen die Ergebnisse der Messungen ohne Peniche auf die Vollmodellergebnisse übertragen werden können.

Es scheint sich abzuzeichnen, dass sich das Weglassen des Peniches positiv auf die Messergebnisse auswirkt. Ob die Ergebnisse von Halbmodellmessungen ohne Korrekturfunktionen die gleichen Ergebnisse hervorbringen wie eine Vollmodellmessung, darf zu bezweifeln sein. Aber das Weglassen des Peniches würde die Messergebnisse einander annähern und vor allem den konstruktiven Aufwand erheblich verringern.

Literatur :

- [1] Milholen II, Chokani: Computational analysis of semi-span test techniques, NASA CR 4709, 1996
- [2] Miholen II: A design methodology for semi-span model mounting geometries, AIAA 98-0758, 1998
- [3] Gatlin, Parker, Owens: Advancement of semispan testing at the national transsonic facility, Journal of Aircraft Vol.39, No.2 2002

Das Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik der TU Darmstadt

Das Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik besteht seit 1997 und ging aus den bisherigen Fachgebieten Technische Strömungslehre (Prof. Spurk) und Messtechnik und Aerodynamik (bis 31.3.1998; Prof. Ewald) am Fachbereich Maschinenbau hervor. Schwerpunkte der Forschungsaktivitäten:

- optische Messtechniken für Ein- und Mehrphasen-Strömungssysteme
 - Flugzeug- und Fahrzeugaerodynamik
 - Zerstäubung und Sprühvorgänge
 - Untersuchung komplexer turbulenter Strömungen
- Diese Themen werden je nach Aufgabe theoretisch, numerisch und/oder experimentell bearbeitet. Hierzu stehen neben Simulationsprogrammen auch umfangreiche Versuchseinrichtungen und Messtechniken zur Verfügung, darunter ein 2m x 3m Windkanal,

2 Motorsegler, ein Trisonischer Kanal sowie mehrere Laser-Doppler- und Phasen-Doppler-Messgeräte. Derzeit arbeiten 19 nicht-wissenschaftliche und etwa 30 wissenschaftliche Mitarbeiter am Fachgebiet.

Leiter des Fachgebietes:

Prof. Dr.-Ing. habil. Cameron Tropea

Anschrift des Fachgebietes:

Petersenstraße 30 • 64287 Darmstadt

Telefon: +49 - 6151/16-2854

Fax: +49 - 6151/16-4754

e-mail: ctropea@sla.tu-darmstadt.de

Internet: www.sla.maschinenbau.tu-darmstadt.de

Co-Autoren:

Dipl.-Ing. Stefan Eder, Doktorand

Dr.-Ing. Klaus Hufnagel, Leiter des Windkanals der TU

AVL - The Thrill of Solution

AVL, a company with currently 3300 employees worldwide has always been committed to set new technological standards. State-of-the-art solutions are developed and brought to the market in each of the business areas: Powertrain Engineering, Instrumentation & Test Systems and Advanced Simulation Technologies. The R&D budget of more than 10% of turnover underlines AVL's innovative spirit.

Founded in 1948 and today in private ownership of Prof. Helmut List, AVL has gained world wide recognition in its business areas. Global thinking and local acting - AVL was doing it from the beginning and developed its structure accordingly: 45 affiliates and TechCenters are providing local services, linking the headquarter in Graz, Austria, to the customers and generating an export quota of 96%.

Business Area: Advanced Simulation Technologies

The key to the successful development of new drive technologies is the computer-aided simulation of structural and acoustic behavior, flow and combustion processes. Due to the vast range of variables in modern engine systems and the highly complex interplay of all components, it is no longer possible to identify the parameters influencing durability, vibration behavior and acoustics, fuel consumption and emissions without the aid of sophisticated simulation calculations.

AVL's team of 70 physicists, mathematicians and engineers is capable of satisfying the growing demand of development engineers for precise and reliable data. Thanks to the synergies between AVL's simulation and testing expertise, the forecasts generated by its models are exceptionally reliable, and can be applied to practical problems with a high level of confidence. One of the main factors in meeting the target of halving the overall development lead time for new engines will be speeding up preliminary and ongoing simulation. The close communication between software specialists and engineers at AVL enables computer runtimes to keep coming down, and allows models to be introduced into the development process without delay.

AVL List GmbH
Hans-List-Platz 1 • A-8020 Graz
Phone: +43 316 787-0 • Fax: +43 316 787-400
Email: info@avl.com • www.avl.com



Stellenwert der Ersatzteillogistik in der Luftfahrt

Hans-Christian Pfohl/Michael Trumpfheller



Angesichts der harten Konkurrenz zwischen Fluggesellschaften werden auch die Aktivitäten zur Instandhaltung zunehmend daran gemessen, ob neue Konzepte zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit beitragen. Dieser Bereich ist bisher am geringsten von der „Low-Cost-Entwicklung“ im internationalen Luftverkehr betroffen. Er wird jedoch, vorbehaltlich der Sicherheit der Passagiere, ebenfalls einen Beitrag zur Kostensenkung und Erlössteigerung etwa durch erhöhte Verfügbarkeit leisten müssen.

Spare Parts Logistics in Aviation. *As the competitive pressure in aviation is increasing, all possibilities to increase airlines competitiveness are examined. A field that is not (yet) affected by the "Low-Cost-Development" are the maintenance and overhaul activities. But it is obvious that the suppliers of these functions need to find new ways in order to fulfil the needs of the airlines as their customers. A recent development is the cooperation of competing companies in certain fields in order to achieve the necessary "economies of scale"; e.g. the new company Spairliners formed by Lufthansa Technik and Air France Technologies.*

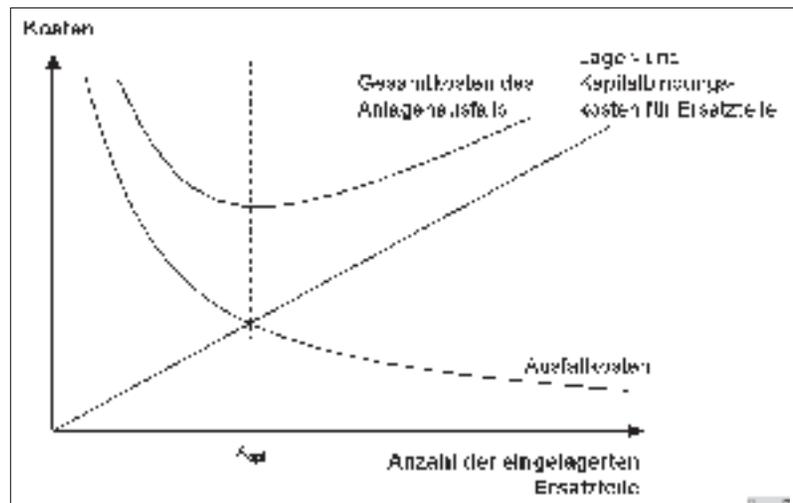
Bild: Fraport AG

Überblick

Instandhaltung und Reparaturen sind von essentieller Bedeutung für den wirtschaftlichen Erfolg einer Fluggesellschaft. Denn Flugzeuge sind nur rentabel, wenn sie sich in der Luft befinden. Vor dem Hintergrund des wettbewerbsintensiven Marktumfelds werden daher auch die Funktionen zur Aufrechterhaltung der Einsatzfähigkeit der Flotte zunehmend hinsichtlich neuer Konzepte und des Beitrags zur Wettbewerbsfähigkeit hinterfragt. Dabei lassen sich in der Industrie mehrere Entwicklungen beobachten. Zum einen wurden in den vergangenen Jahren die Technikaktivitäten zunehmend von den Kernaktivitäten der Fluggesellschaften getrennt. Eigenständige Tochtergesellschaften wie die Lufthansa Technik AG, die Air France Technologies oder die SR Technics (ehemals Swissair) müssen sich auf einem umkämpften Markt sowohl um die Aufträge der Fluggesellschaften im eigenen Haus als auch um Drittkunden bewähren. Dies geht mit einer zunehmenden Konsolidierung einher, da in diesem ersatzteilintensiven Geschäft signifikante Größenvorteile erreicht werden können. Als neueste Entwicklung ist darüber hinaus die Kooperation mit Wettbewerbern zu beobachten, da für neue Flugzeugmuster wie den A380 die Stückzahlen noch nicht für einen eigenständigen Servicepool ausreichen. Gleichzeitig ist zu konstatieren, dass die Kosten für Instandhaltung und Reparaturen (bisher) am geringsten von der „Low-Cost-Entwicklung“ im internationalen Luftverkehr betroffen sind. Unter dem Vorbehalt der Sicherheit der Passagiere wird jedoch auch dieser Bereich, dessen Kosten im Durchschnitt 10% der Betriebskosten von Fluggesellschaften ausmachen, einen Beitrag zur Kostensenkung und Erlössteigerung bspw. durch erhöhte Verfügbarkeit leisten müssen. Neben der bestehenden gesetzlichen Dokumentationspflicht tragen insbesondere der hohe Wert der Ersatzteile und die Teilevielfalt zur Komplexität und den hohen Kosten der Instandhaltung bei.

Hoher Wert der Ersatzteile

Die hohen Anforderungen an Sicherheit und Belastungsfestigkeit von Flugzeugen und der damit einhergehende notwendige Einsatz hochwertiger Werkstoffe und Bauteile in der Luftfahrtindustrie begründen den hohen Wert von Verkehrsflugzeugen und Ersatzteilen. Der Wert des weltweiten Ersatzteilbestandes an Flugzeugkomponenten wird auf 20-30 Milliarden US\$ geschätzt. Ein großer Kostenblock ist mit der Lagerung von Flugzeugersatzteilen verbunden. Die jährlichen Kosten der Lagerhaltung, die sich auf einen Durchschnittswert von ca. 22% des Anschaffungswerts beziffern, können in Kapitalkosten durch Kapitalbindung (50%), in Kosten für die Lagerung, Dokumentation, Versicherung und Steuern (30%) und in Kosten, die durch Überalterung der Ersatzteile, erneute Zertifizierung, Beschädigung und Diebstahl entstehen (20%), differenziert werden. Den Lagerungskosten stehen auf der anderen Seite hohe Folgekosten gegenüber, die der betreibenden Fluggesellschaft durch den Ausfall eines Flugzeugs durch nicht verfügbare Ersatzteile entstehen. Zu den monetären Kosten tritt ein möglicher Verlust an Reputation bei den Kunden hinzu, deren Flug durch die fehlende Teil-



lieferbarkeit unter Umständen nicht durchgeführt werden kann. Aufgrund des hohen Werts der Ersatzteile in der Luftfahrtindustrie ist demnach der Stellenwert des in Abbildung 1 dargestellten in einem Logistiksystem herrschenden Zielkonflikts zwischen Bestands- und Fehlmengenkosten besonders ausgeprägt.

Um einen vorzeitigen Ausfall des Teils zu verhindern, kommt einer entsprechenden Produktgestaltung oder vorbeugenden Instandhaltung ein besonderer Stellenwert zu. Flugzeugersatzteile werden aufgrund der hohen fixen und variablen Ausfallkosten als „Never-Fails“ gekennzeichnet. Daher ist zum einen die Minimierung der Ausfallwahrscheinlichkeit, zum anderen die schnelle Ausfallbeseitigung sehr wichtig.

Flugzeuge stellen die komplexesten Produkte dar, die in Serie produziert werden. Entsprechend dieser Teilevielfalt fällt die Größe der Ersatzteilsortimente von Flugzeugherstellern und Instandhaltungsbetrieben aus. So umfasst beispielsweise der Ersatzteilbestand der Lufthansa Technik AG ca. 420.000 verschiedene Einzelteile, die reparaturfähigen Ersatzteile schlagen in der Bilanz mit 400 Mio. Euro zu Buche.

Aus Tabelle 1, in der die Umfänge der Ersatzteilsortimente nach verschiedenen Branchen differenziert sind, geht hervor, dass lediglich die PKW-Hersteller über zahlenmäßig vergleichbare Ersatzteilsortimente im Vergleich zur Luftfahrtindustrie verfügen. Da die Anforderungen an die Logistik bzw. die logistische Komplexität mit den Umfängen der Ersatzteilsortimente steigen, gestaltet sich auch die Planung der entsprechenden Versorgungssysteme bei der Handhabung von Ersatzteilen in der Luftfahrtindustrie schwieriger als in den übrigen Branchen.

Poolbildung für die Ersatzteilversorgung

Für die Versorgung ihrer Flotten mit Ersatzteilen bestehen für die Luftverkehrsgesellschaften (LVG) zahlreiche Möglichkeiten. Im Idealfall lagert eine LVG eine ausreichende Menge an Ersatzteilen an ihrer Homebase, von welcher aus sich geographisch anliegende Stationen dieser LVG in Abhängigkeit von Flugplänen bzw. Landtransportmöglichkeiten relativ einfach versorgen lassen.

Für LVG, bei denen sich aufgrund eines weit reichenden globalen Streckennetzes und einer verhältnismäßig großen Anzahl von Flugzeugen eine solche Flotten-

Abbildung 1: Wirkung der Ersatzteilversorgung auf die Gesamtkosten des Anlagenausfalls (Quelle: In Anlehnung an Pfohl/Ester/Jarick (1995), S. 7)

Impact of spare parts supply on the total cost of a system failure (With reference to Pfohl/Ester/Jarick (1995), S. 7)

Tabelle 1:
Umfang der Ersatzteilsortimente verschiedener Branchen (Quelle: In Anlehnung an Ihde et. al. (1999), S. 37)

Size of spare parts assortment in different industries (With reference to Ihde et. al. (1999), S. 37)

	PKW	Kfz-Zulieferer	NFZ	Weiß Ware	Braune Ware	Büro-, luK -Systeme	Medizin-technik, etc.
Mittelwert	119.513	14.085	50.786.	24.164	33.643	16.545	29.751
Maximum	400.000	110.000	200.000	100.000	100.000	110.000	100.000

versorgung jedoch nur bedingt eignet, ist es zweckmäßig, einen bestimmten Bestand an kritischen Ersatzteilen auf verschiedenen Stationen zu lagern und diese mit einer hohen Frequenz anzufliegen. Die Lagerung der sehr teuren luftfahrtindustriellen Ersatzteile an allen Stationen würde aber selbst für finanzstarke LVG eine sehr hohe Kostenbelastung und folglich Benachteiligung im internationalen Wettbewerb bedeuten. Um die Lager- und Kapitalbindungskosten der Ersatzteile in einem adäquaten Rahmen halten und dennoch die Ersatzteilversorgung gewährleisten zu können, partizipieren LVG an einem Ersatzteillager, der ihnen eine gemeinsame Nutzung von Flugzeugersatzteilen, Wartungs- und Bodengeräten erlaubt. Den LVG bietet sich zum einen die Möglichkeit eines Zusammenschlusses unter der gemeinsamen Bewirtschaftung eines Pools, zum anderen die Beteiligung an einem kommerziellen Pool an. Das Pooling-Konzept für Flugzeugersatzteile wurde erstmalig nach Ende des zweiten Weltkrieges von KLM, Sabena und Swissair eingesetzt, um Ersatzteile für die DC-3 und die Convair 240/340 auszutauschen. Ein zweites globales Pool-Abkommen zwischen den Gesellschaften SAS, Alitalia, Air France, Air India, Qantas, Japan Airlines und Lufthansa führte 1960 zur Gründung des International Airlines Technical Pool (IATP) in Luzern. Obwohl der IATP keine langfristige Lösung zur Versorgung der LVG mit Ersatzteilen darstellt, soll er dazu beitragen, dass den Fluggesellschaften, deren Flugzeuge aufgrund einer Flugunfähigkeit in eine Aircraft On Ground (AOG) -Situation geraten sind, der Heimflug zu ihrer Homebase ermöglicht wird. Von der Konstruktion des IATP lassen sich kommerzielle Pool-Abkommen differenzieren, die in der Regel von Wartungs- und Instandhaltungsbetrieben der größten LVG wie beispielsweise Lufthansa Technik AG, SR Technics oder SAS betrieben werden. Der Pool ist ein

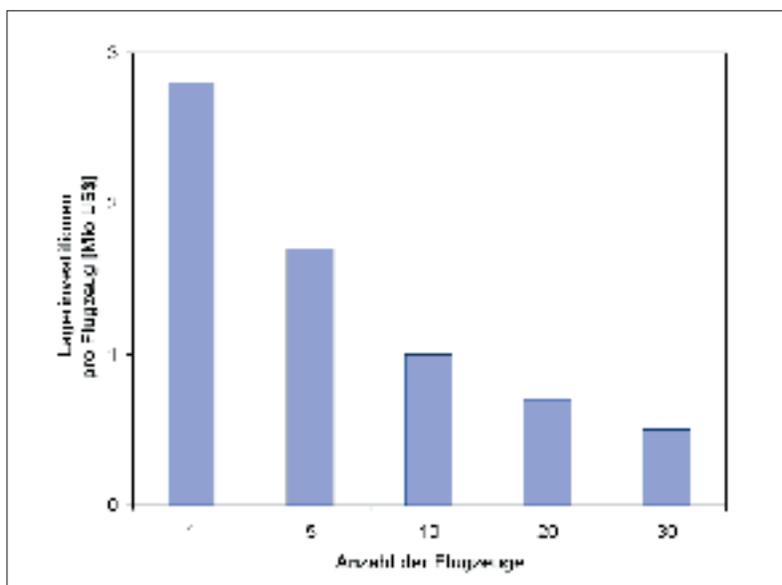
geschlossener Materialkreislauf, bei dem Geräte des gleichen Typs beliebig zwischen Flugzeugen der jeweiligen Flotten ausgetauscht werden können. Durch die Teilnahme an einem solchen kommerziellen Pool reduzieren sich die Kosten der einzelnen Pool-Kunden erheblich, da diesen keine Fixkosten für eine Lagerunterhaltung entstehen und lediglich eine individuell vereinbarte Nutzungsgebühr zu entrichten ist. Die verschiedenen Pool-Anbieter schöpfen ihren Wettbewerbsvorteil aus unterschiedlichen Quellen. Große LVG verfügen nicht nur über die notwendigen Werkstätten und Mitarbeiter, um Fluggeräte ihrer eigenen Flotte instandhalten zu können, sondern zudem über die technische Unterstützung der Komponentenhersteller, weil sie deren Neuprodukte und Ersatzteile kaufen. Da für die eigenen Flotten bereits ein Basisvolumen an Ersatzteilen für verschiedene Flugzeugmuster vorhanden ist, sind die Investitionen in Ersatzteile für weitere Flugzeuge des gleichen Baumusters erheblich geringer als die Investition in den Grundstock an Ersatzteilen. Zudem sind insbesondere größere LVG dazu in der Lage, aufgrund von Größenvorteilen (economies of scale) und Programmvorteilen (economies of scope) besondere Wettbewerbsvorteile zu realisieren. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 2 exemplarisch illustriert. Nahezu alle potentiellen Kunden sehen es darüber hinaus als Vorteil an, wenn ein Anbieter von Wartungs- und Instandhaltungsleistungen auch eigene Erfahrungen im Flugbetrieb hat. Die Partizipation an einem Pool ist besonders vorteilhaft für kleine bzw. junge LVG, denen oft für den Erwerb des Mindestbestandes an benötigten Ersatzteilen die finanziellen Ressourcen fehlen oder es an spezifischem Know-how für ein effizientes Bestandsmanagement mangelt. Darüber hinaus tendieren auch etablierte LVG häufig zum Outsourcing der Wartung und Überholung von Flugzeugkomponenten, um sich ganz auf ihre Kernkompetenz Flugbetrieb konzentrieren zu können.

Ein Beispiel für eine neue Entwicklung im Bereich der Instandhaltung ist die Spairliners GmbH ein Joint Venture von Air France Industries und der Lufthansa Technik. Dieses Unternehmen soll neben der Geräteversorgung für die insgesamt 25 Airbus A380 der Air France und Lufthansa auch an Dritte mit einem Serviceangebot von Überholung, Reparatur, Ersatzteilmanagement, sowie der damit verbundenen Logistik herantreten. Auch hier sollen also mit der Poollösung Kostenvorteile für die teilnehmenden Unternehmen realisiert werden. Gleichzeitig wird durch die garantierte Verfügbarkeit auch die Nutzungsdauer der Maschinen optimiert.

Auch wenn also die jeweiligen Muttergesellschaften um die Passagiere konkurrieren, ist für die technikbezogenen Tochterunternehmen bei den kleinen Stückzahlen die Kooperation der beste Weg, um die Kosten für die Instandhaltung dieses neuen Flugzeugmusters zu minimieren.

Abbildung 2:
Exemplarische Darstellung der Größen- und Programmvorteile bei der Poolbildung

Exemplary economies of scale and economies of scope with pooling



Beitrag gespart und Versicherungsschutz erweitert.



AOK AktivPlus 120 Mehr Leistung – weniger zahlen.

Sie möchten mehr wissen?
Nur zu! Wir beraten Sie gerne persönlich:

AOK Studenten-Service
Christian Blatt
Neckarstrasse 9, 64278 Darmstadt

Mo. bis Mi. 8.30-16.30 Uhr
Donnerstag 8.30-18.00 Uhr
Freitag 8.30-16.30 Uhr

Oder rufen Sie an:
06151-393 458

Das Fachgebiet Unternehmensführung und Logistik

Das Fachgebiet Unternehmensführung und Logistik betreibt nicht nur Grundlagenforschung, sondern unterstützt mit den Ergebnissen der angewandten Forschung Problemlösungsprozesse in der Unternehmenspraxis. Damit stellt sich das Fachgebiet bewusst in das Spannungsfeld von Theorie und Praxis und vermittelt dies auch in der Lehre. Das Fachgebiet sieht sich als Plattform für theoriegeleitete und anwendungsorientierte Forschung zu Problemen der Unternehmensführung und der Logistik sowie der Verkehrswirtschaft.

Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Christian Pfohl ist seit 1982 Leiter des Fachgebiets. Seit 1997 ist er Professor am Chinesisch-Deutschen Hochschulkolleg (CDHK) an der Tongji-Universität, Shanghai. Er ist Mitglied des Vorstandes der European Logistics Association (ELA) und Leiter des Ausschusses für Forschung und Entwicklung der ELA. Er ist Vorsitzender des Wissenschaftlichen Beirates der Bundesvereinigung Logistik (BVL).

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Michael Trumpfheller ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet. Seine Forschungsschwerpunkte sind strategisches Flughafenmanagement, Airline Management sowie das Management von Unternehmensnetzwerken in der Logistik.

Fachgebiet Unternehmensführung & Logistik

Technische Universität Darmstadt
Hochschulstr. 1 • 64289 Darmstadt
Tel.: 06151/16-2123 • <http://www.fgul.de>

Literatur

- [1] de Schmidt, A. (2005): Retrofit am offenen Herzen. In: Logistik Heute 27(2005)7/8, S. 14-17.
- [2] Ester, B. (1997): Benchmarks für die Ersatzteillistik: Benchmarkingformen, Vorgehensweise, Prozesse und Kennzahlen. Berlin 1997.
- [3] Ihde, et al. (A 8/1210) (1999): Ersatzteillistik. Schriftenreihe der Bundesvereinigung Logistik e.V. Band 44. München 1999.
- [4] Pilling, M. (2004): Service Challenge. In: Airline Business 20(2004)8, S. 47-52.
- [5] Pfohl, H.-Chr. (2004): Logistiksysteme. Betriebswirtschaftliche Grundlagen. 7., korrig. u. akt. Aufl. Berlin 2004.
- [6] Pfohl, H.-Chr./Ester, B./Jarick, J. (1995): Qualitätsmerkmale der Ersatzteilversorgung. Ergebnisse einer Kunden- und Anbieterbefragung. Arbeitspapiere zur Unternehmensführung und Logistik. Nr. 18. Fachgebiet Unternehmensführung, Institut für Betriebswirtschaftslehre. Technische Universität Darmstadt. Darmstadt 1995.



Revenue Management – Instrumente zur Erlösmaximierung im Luftverkehr

Wolfgang Domschke/Robert Klein/Anita Petrick

Der Luftverkehr gehört zu den sehr fixkostenintensiven Dienstleistungsbranchen. Für solche Branchen hat sich in den zurückliegenden 30 Jahren ein wichtiges Forschungsgebiet unter dem Begriff Revenue Management entwickelt. Es basiert auf dem umfangreichen Einsatz mathematischer Planungsverfahren mit dem Ziel, die zur Deckung der hohen Fixkosten notwendigen Erlöse zu maximieren.

Revenue Management – Maximising revenues in the airline industry. Revenue Management represents a concept which has initially been developed by the airline industry in order to maximize the revenues obtained by selling flights to customers and which has successfully been adopted by other service industries such as hotels, car rentals or cruise companies. The basic idea of Revenue Management consists in performing a price discrimination which groups customers to segments and defines different prices for each of these segments. Due to stochastic demand, the price discrimination has to be complemented by some capacity control restricting the amount of capacity sold to each segment. In this article, we discuss the basic decision problems arising in price discrimination and capacity control.

Bild: Fraport AG

Prolog

Einer der Autoren führte bei seinem Flug zu einer internationalen Tagung von Frankfurt nach Edinburgh das folgende Gespräch mit seinem Sitznachbarn. Dieser erregte sich offensichtlich sehr über den Preis, den er für seinen Flug gezahlt hatte.

„Sie müssen wissen, ich fliege diese Strecke nach Edinburgh hin und zurück regelmäßig und noch nie war es so teuer wie heute.“

„Was haben Sie denn bezahlt?“

„Dieses Mal kostete mich das Ticket insgesamt 680 €, während ich sonst immer für knapp 370 € fliege.“

„Das ist eigenartig. Fliegen Sie denn sonst auch immer mit der Maschine am Montagmorgen?“

„Nein, normalerweise arbeite ich montags noch in Frankfurt und nehme erst einen Flug am Dienstagmorgen. Aber diese Woche musste ich ausnahmsweise einen dringenden Termin am Montag wahrnehmen, von dem ich erst letzte Woche erfahren habe. Spielt das denn eine Rolle?“

„Ja natürlich! Wie sie sehen können, ist diese Maschine hier ausgebucht. Denken Sie, dass Sie letzte Woche noch ein Ticket für 370 € erhalten hätten? Wenn die Fluggesellschaft alle Tickets für diesen Preis verkauft, dann mit Sicherheit nicht. Also ich wäre bereit, einen höheren Preis zu zahlen, um einen wirklich wichtigen Termin wahrzunehmen.“

„Da haben Sie Recht. Wenn ich so nachdenke, fällt mir ein, dass in der Maschine am Dienstagmorgen auch immer wesentlich weniger Passagiere sitzen.“

„Sehen Sie, das ist einer der Gründe dafür, dass Sie dort bisher problemlos ein Ticket für 370 € erhalten haben.“

In diesem Moment meldet sich die junge Dame auf dem Sitz daneben zu Wort: „Entschuldigen Sie, ich verfolge Ihr Gespräch sehr interessiert. Ich besuche Freunde in Edinburgh. Mein Ticket habe ich bereits vor 4 Wochen für 199 € reserviert, um noch den günstigen Studententarif zu erhalten. Dafür, so erklärte man mir im Reisebüro, erhalte ich keine Rückerstattung, falls ich den Flug nicht antrete, und umbuchen kann ich auch nur für einen Aufpreis von 150 €.“

Diese Unterhaltung zeigt beispielhaft einige Aspekte des so genannten Revenue Managements (RM). Die Ursprünge dieses Ansatzes sind im Bereich des Passagierluftverkehrs zu finden. Sie gehen auf die 1970er Jahre zurück, in denen sich RM als Reaktion auf die Deregulierung des amerikanischen Luftverkehrsmarktes entwickelte. Ziel des RM ist es, durch den gezielten Einsatz von Methoden des Marketing und insbesondere des Operations Research Erlöspotenziale, die sich aus unterschiedlichen Preisbereitschaften von Kunden ergeben, möglichst weitgehend auszunutzen. Der Erfolg zeigt sich etwa am Beispiel der Lufthansa AG, die den für das Jahr 1997 erzielten Mehrerlös durch RM auf ca. 1,4 Mrd. DM beziffert [1]. Inzwischen wurde das RM erfolgreich auf andere Dienstleistungsbereiche wie Hotels und Automobilvermietungen aber auch die Bahn übertragen [2].

Zur Realisierung der genannten Erlöspotenziale dienen insbesondere die Instrumente der Preisdifferenzierung und der Kapazitätssteuerung, auf die im Folgenden näher eingegangen wird [3] [4].

Differenzierte Preise

Das erstgenannte Instrument entstand mit der Deregulierung des amerikanischen Flugverkehrs. Sie erlaubte es den Fluggesellschaften, auf nicht ausgelasteten Strecken neben einem Normaltarif günstigere Spartarife für Frühbucher einzurichten. Damit verfolgten sie zunächst das Ziel, zusätzliche Nachfrage zu generieren und die vorhandenen Kapazitäten möglichst vollständig auszunutzen. Dieser Aspekt ist für Fluggesellschaften wie auch für viele andere Dienstleistungsanbieter von besonderer Bedeutung, da mit der Bereitstellung der Kapazität hohe Fixkosten (z.B. Abschreibungen für Flugzeuge) verbunden sind und eine Anpassung der Kapazitäten nur mittel- bis langfristig erfolgen kann. Bald erkannten sie das weitere Potenzial der Preisdifferenzierung, nämlich die Generierung zusätzlichen Ertrages durch Abschöpfung der so genannten Konsumentenrente.

Das folgende Beispiel zeigt dafür wichtige Überlegungen: Angenommen die Preis-Absatz-Funktion für einen Flug besitzt den in Abbildung 1 vereinfacht dargestellten, linearen Verlauf. Die Sitzplatzkapazität des Fluges beträgt 100. Werden alle Plätze zum festen Preis von 490 € verkauft (vgl. Abb. 1a), verfällt zum Abflugzeitpunkt über die Hälfte des Sitzplatzkontingentes, da nur 40 Kunden bereit sind, diesen Preis zu zahlen. Der erwirtschaftete Erlös beträgt in diesem Fall 19.600 €. Um alle Plätze auszulasten, müssten die Tickets zum Preis von 250 € verkauft werden (vgl. Abb. 1b). Diese Strategie führt bereits zu einem höheren Gesamterlös von 25.000 €. Würden jedoch Tickets zu beiden Preisen angeboten, so ließen sich

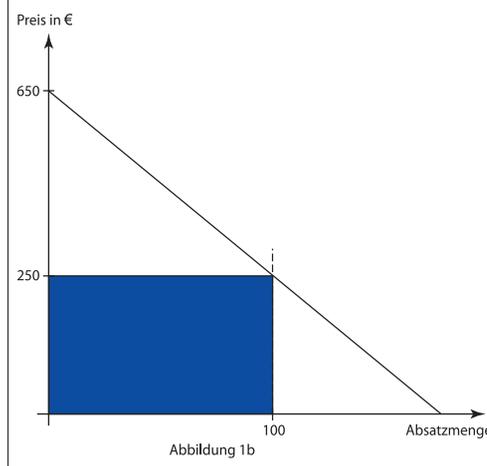
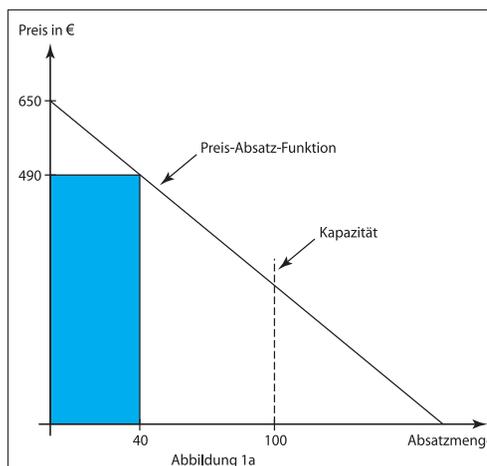


Abbildung 1: Preis-Absatz-Funktion, Erlös beim Preis von 490 € (1a) bzw. 250 € (1b)

Demand function, revenue at a price of 490 € (1a) and 250 € (1b)

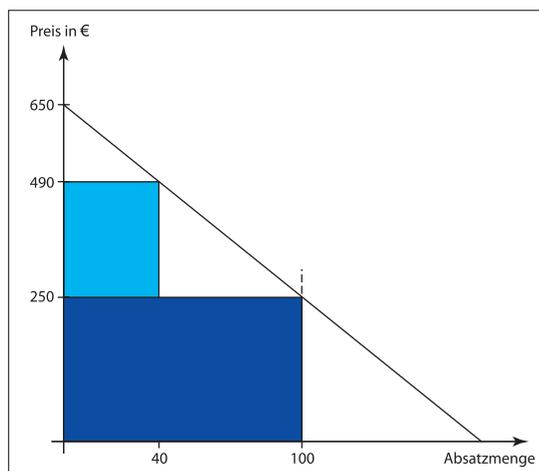


Abbildung 2:

Preis-Absatz-Funktion, Erlös bei Preisdifferenzierung

Demand function, revenue with price discrimination

im günstigsten Fall 40 Tickets zu 490 € und 60 Tickets zu 250 € absetzen, was zu einem Gesamterlös von 34.600 € führt (vgl. Abb. 2). Optimal wäre es, jedem Kunden den Preis anzubieten, der seiner individuellen Zahlungsbereitschaft entspricht. Da diese Vorgehensweise in der Praxis nicht realisierbar ist, unterscheiden Fluggesellschaften mit Hilfe von Buchungsklassen nur eine begrenzte Anzahl von Preisen. Es stellt sich nun die Frage, wie sich eine auf den ersten Blick identische Dienstleistung – die Beförderung auf einem Platz im Flugzeug – zu unterschiedlichen Preisen anbieten lässt. Die zu Beginn des Artikels geschilderte Unterhaltung zeigt dazu einige Möglichkeiten auf. Dabei werden im Rahmen eines so genannten Fencing an verschiedene Buchungsklassen unterschiedliche Restriktionen, wie z.B. Vorausbuchungsfristen, geknüpft, die es verhindern, dass Kunden ohne „Einbußen“ zwischen den Klassen wechseln können. Grundsätzlich gilt, dass Buchungsklassen mit langer Vorausbuchungsfrist einen niedrigeren Ticketpreis aufweisen. Dagegen sind Buchungsklassen, die eine eher kurzfristige Buchung erlauben, mit einem höheren Preis verbunden.

Kapazitätssteuerung

Als Folge einer entsprechenden Preisdifferenzierung entsteht für die Fluggesellschaften ein zusätzliches Steuerungsproblem. Aufgrund der Buchungsfristen werden Tickets in niederwertigeren Buchungsklassen tendenziell vor Tickets aus höherwertigeren nachgefragt. Daher muss über die Vergabe von Niedrigpreistickets entschieden werden, bevor die genaue Nachfrage nach hochpreisigen Tickets bekannt ist. Dies kann zu einer Umsatzverdrängung führen, d.h. der jetzt zum niedrigen Preis vergebene Sitzplatz steht für eine spätere Anfrage aus einer höherwertigeren Buchungsklasse nicht mehr zur Verfügung. Umgekehrt ergibt sich der Fall des Umsatzverlustes, wenn eine aktuelle Anfrage nicht angenommen wird und

Bild: Fraport AG



die zukünftige Nachfrage nicht groß genug ist, um alle Sitzplätze zu füllen. Auch diese Problematik lässt sich an unserem Beispiel für den Fall verdeutlichen, dass Tickets sowohl für 490 € als auch für 250 € angeboten werden. Gehen wir weiter davon aus, dass zunächst ausschließlich die Nachfrage für Tickets à 250 € eintrifft und jeder Buchungswunsch befriedigt wird, so wäre das Flugzeug bereits vollständig mit Niedrigpreiskunden belegt.

Die Lösung dieses Problems ist Gegenstand der Kapazitätssteuerung. Ihre Aufgabe im Rahmen des RM besteht darin, aus den möglichen Buchungsklassen diejenige auszuwählen, die dem betreffenden Kunden tatsächlich angeboten werden soll. Dabei ist zwischen Ansätzen zu unterscheiden, die eine Steuerung auf Basis einzelner Flüge durchführen und solchen, die die Auswirkungen von Buchungsentscheidungen auf Basis des gesamten Flugnetzes, d.h. sämtlicher, auch aus mehreren Teilstrecken bestehenden Verbindungen, evaluieren. Die Notwendigkeit zur Berücksichtigung des gesamten Flugnetzes ergab sich durch die Einführung so genannter Hub&Spoke-Netze seitens der Fluggesellschaften. Bei solchen Netzen dienen bestimmte Flughäfen als Konzentratoren (Hubs), über die Verbindungen zur Vermeidung schlecht ausgelasteter Direktflüge geleitet werden. Einen solchen Hub betreibt die Lufthansa AG z.B. in Frankfurt am Main.

Als Folge dieser Entwicklung konkurrieren etwa Nachfrager, die lediglich einen Direktflug von Hamburg nach Frankfurt wünschen, mit solchen, die auch noch einen Anschlussflug nach Paris verlangen, um die knappe Kapazität auf der Strecke Hamburg-Frankfurt. Diese Kunden stehen wiederum in zusätzlicher Konkurrenz mit Nachfragern für die Strecke Frankfurt-Paris. Darüber hinaus existieren für sämtliche Verbindungen als Folge der zuvor dargestellten Preisdifferenzierung unterschiedliche Buchungsklassen. Für die Fluggesellschaft besteht nun ein Problem darin, abzuwägen, wie viele Einheiten in welcher Buchungsklasse auf den angebotenen Verbindungen abzusetzen sind, so dass der erzielte Erlös maximiert wird.

Zur Lösung des Problems der Kapazitätssteuerung werden in der Praxis komplexe Prognose- und Optimierungsverfahren eingesetzt. Allerdings existiert dabei eine beachtliche Vielzahl an Verfahrensansätzen.

Um zu klären, welche dieser Ansätze zur Problemlösung besonders geeignet sind, wurde am Fachgebiet Operations Research der TU Darmstadt eine umfangreiche Simulationsumgebung entwickelt, die eine integrative Betrachtung der unterschiedlichen Ansätze erlaubt [5]. Darüber hinaus wurden neue Ansätze zur Kapazitätssteuerung implementiert, die auf dem noch jungen Gebiet der simulationsbasierten Optimierung beruhen. Die aktuellen Forschungsbemühungen am Fachgebiet konzentrieren sich auf die Erweiterung existierender Verfahren auf so genannte flexible Produkte. Ein solches Produkt liegt vor, wenn ein Kunde zum Kaufzeitpunkt z.B. lediglich den gewünschten Flugtag angeben kann, die Festlegung der genauen Flugzeit jedoch der Fluggesellschaft überlässt. Solche Produkte kommen in den USA auf stark frequentierten Verbindungen zum Einsatz und erlauben den Fluggesellschaften eine Ausweitung des Instrumentes der Preisdifferenzierung.

Das Fachgebiet Operations Research an der TU Darmstadt

Die Disziplin Operations Research wendet mathematische Methoden vorwiegend auf wirtschaftswissenschaftliche, aber auch auf ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen an. Darunter fallen z.B. Algorithmen zur Wegeoptimierung, welche erfolgreich zur Routenplanung in Navigationssystemen eingesetzt werden, oder auch Packprobleme, wie sie im Rahmen der Planung von Frachttransporten entstehen. Das Fachgebiet Operations Research beschäftigt sich vorwiegend mit betriebswirtschaftlichen Problemen in der Logistik und Dienstleistungsbranche. Dazu zählen die effiziente Gestaltung von Luftverkehrsnetzen, die operative Planung in intermodalen Verkehrssystemen sowie das Revenue Management.

Kontakt:

Fachgebiet Operations Research
Fachbereich Rechts- und Wirtschaftswissenschaften
Hochschulstraße 1 • 64289 Darmstadt
Telefon: 06151/16-3663
www.bwl.tu-darmstadt.de/bwl3

Fachgebietsleiter:

Prof. Dr. Wolfgang Domschke

Ansprechpartner:

Dr. Robert Klein • E-Mail: rklein@bwl.tu-darmstadt.de
Anita Petrick • E-Mail: petrick@bwl.tu-darmstadt.de

Literatur

- [1] Klophaus, R. (1998): Revenue Management: Wie die Airline Ertragswachstum schafft. Absatzwirtschaft, Ausgabe September / Oktober, S. 146-152.
- [2] Kimms, A. und R. Klein (2005): Revenue Management im Branchenvergleich. Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Special Issue 1, S. 1-30.
- [3] Klein, R. (2001): Revenue Management: Quantitative Methoden zur Erlösmaximierung in der Dienstleistungsproduktion. Betriebswirtschaftliche Forschung und Praxis 53, S. 245-259.
- [4] Klein, R. und A. Petrick (2003): Revenue Management – Eine weitere Erfolgsstory des Operations Research. OR News, Heft 1, S. 5-9.
- [5] Klein, R. (2005): Revenue Management: Grundlagen und Methoden der Kapazitätssteuerung. Habilitationsschrift, TU Darmstadt.



Forschungsschwerpunkt Integrierte Verkehrssysteme

Der Forschungsschwerpunkt Integrierte Verkehrssysteme (fsiv) ist der Zusammenschluss der Professoren an der TU Darmstadt, die sich in unterschiedlichen Fachbereichen mit Verkehrssystemen beschäftigen. Beteiligt sind auch das European Center for Aviation Development – ECAD GmbH, das Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit sowie das ZIV – Zentrum für integrierte Verkehrssysteme GmbH an der TU Darmstadt. Abgerundet wird dieses Profil durch zahlreiche Kooperationen mit Universitäten und der Wirtschaft sowie Verbindungen zu den Aufgabenträgern im Verkehr.

Lebensqualität und Standortqualität hängen wesentlich von der leistungsfähigen, sicheren, umweltverträglichen und wirtschaftlichen Gestaltung der Verkehrssysteme ab. Die Integration ist eine wichtige Leitlinie zur notwendigen Innovation unserer Verkehrssysteme. Voranschreitende grundlegende Veränderungen im Verkehrswesen (z.B. Privatisierung,

neue Technologien) sowie die zukünftig erforderlichen komplexen und vernetzten Systeme sind nicht mehr von einer Fachdisziplin allein zu entwickeln, sondern erfordern eine intensive interdisziplinäre Zusammenarbeit. Betroffen sind beispielsweise Disziplinen des Bauingenieurwesens und der Geodäsie, der Rechts- und Wirtschaftswissenschaften und des Maschinenbaus, aber auch Mathematik, Elektrotechnik und Informationstechnik, Soziologie sowie Raumplanung und Städtebau.

Kontakt:

Technische Universität Darmstadt
Forschungsschwerpunkt Integrierte Verkehrssysteme
Dipl.-Ing. Wolfgang Kittler
Petersenstraße 30, 64287 Darmstadt
Tel.: 06151/16-3626
E-Mail: info@verkehrsforschung.tu-darmstadt.de
www.tu-darmstadt.de/verkehrsforschung

Chauffeur oder Airman? Pilotenbilder und Technikerfahrung 1908 bis 1914

Christian Kehrt



Chauffeur or Airman? Images of pilots and their technological ex- perience, 1908 - 1914

Flying is closely related
to story telling, anec-
dotes and myths. Heroic

narratives of flight were used to give
sense to people on a political but also on a
personal level. The images of the heroic air-
man are investigated by a closer look at the
technical requirements and experience of
the first pilots. So far historians have not
considered pilots as important technical
agents in the "co-construction of technology
and users" (Bijker/Pinch). The cultural history
of flight asks for the meaning and mythol-
ogy of flight and looks at the concrete experi-
ence and practice of individual agents. Why
did people take the risk to die in a flight ac-
cident and how could technical developments
and individual skills help to reduce the grow-
ing number of dead or severely injured
pilots? Can the early history of flight be told
by focusing on the image of the airman con-
trolling an unstable airplane or was it rather
the "chauffeur's" attitude that influenced
the construction of a more stable airplane?

Der Technikmythos
der „Eroberung der Luft“ und die
damit verbundenen Heldentaten der Flug-
pioniere werden im historischen Kontext ver-
ortet und in Bezug zu den technischen
Anforderungen und Erfahrungen der Piloten
gesetzt. Dabei geht es um die zentrale Pro-
blematik der Flugsicherheit. Bislang hat die
historische Forschung die Rolle der Piloten
als technische Akteure vernachlässigt. Setzte
sich ein passiver, auf Sicherheit und Stabilität
bedachter „Chauffeurhabitus“ durch oder
legte man größeren Wert auf das aktive
Kontrollverhalten der Piloten als „Airman“?

Flugzeugführer-Ausweis
Nr. 9 für den Aviatiker
Dipl.-Ing. Robert Thelen
vom 11. Mai 1910

Pilot's licence Nr. 9,
Dipl. Ing. Robert Thelen,
11th May 1910

Bild: © Deutsches
Technikmuseum Berlin

Moderne Helden

Die Idealisierung der Piloten als moderne Helden lässt sich an den zahlreichen photographischen Porträts, Zeichnungen und Karikaturen der Flugpioniere erkennen. Nach seinen Erfolgen in Frankreich im Jahr 1908 wurde Wilbur Wright zum Gegenstand visuell vermittelter Idealisierungen. Seine männlichen Gesichtszüge, das hervorstehende Kinn und der feste Blick wurden ebenso betont wie sein Hang zur Askese und Praxisorientiertheit, die sich an seinen ölverschmierten Händen und dem einfachen Lebensstil zeigten: „Mit einem ungemeinen Gefühl der Sicherheit und Beruhigung verfolgte man den wunderbaren Flug. Das Gesicht des Lenkers war unbeweglich, wie aus Stein gehauen. Man fühlte, der Mann ist eisenfest und eisenstark, in ihm ist die Energie, die Ausdauer und Sicherheit verkörpert.“ [1]. Die modernen Attribute des Stahls und Eisens symbolisierten die männlichen Eigenschaften der Härte und Standhaftigkeit in schwierigen Situationen. Die Betonung des heroischen, aktiv zupackenden und Risiko bejahenden Typus des modernen Fliegers hatte durchaus handlungsrelevante Hintergründe. In einer Phase, in der die Flugzeugtechnik noch nicht ausgereift war und Risiko zu jedem Flug gehörte, bedurfte es auf der symbolischen Ebene einer sinnstiftenden Abfederung und Affirmation des tatsächlich gegebenen Risikos. Fliegen wurde, trotz der unausgereiften Technik und zahlreichen Unfälle, in der Presse und Fliegerliteratur als subjektives Befreiungserlebnis inszeniert: „Der Alp, der auf mir gelegen, war mit einem Schlage gewichen, ich atmete freier, atmete ihn mit vollen ruhigen Zügen den herrlichen Traum des ersten Fluges. Es war wie ein allgemeines Erheben in mir, als löste ich mich los von allen Leiden dieser Erde, höher und immer höher, als flöge ich hinein in eine Ewigkeit, losgelöst, befreit von allem, was da fesselte, frei von Leid, unbegrenzt in Raum und Zeit. Es war wie ein sinnesberauschendes Märchen, dieser erste Flug.“ [2].

Technisches Risiko

Die so genannte „Eroberung der Luft“ eröffnete mit Hilfe der Technik einen neuen Möglichkeitshorizont, der die Akteure mit zukunftsverheißenden Handlungschancen, aber auch bis dato unbekanntem und oftmals tödlichen Risiken konfrontierte. Die Flugpraxis war von zahlreichen Kontingenzen wie Wind, Wetter und technische Defekte geprägt, so dass die Piloten selten Zeit und Gelegenheit hatten, den Flug als ästhetisches Erlebnis zu genießen. Die Sicherheitsproblematik wird durch Unfall- und Todesstatistiken, die Diskussionen um den Fallschirm sowie das Bemühen um eine eigenstabile Flugzeugkonstruktion belegt. Aufgrund des zu hohen Risikos lehnten es Versicherungsanstalten bis ins Jahr 1912 ab, die Piloten zu versichern. Es kam häufig zu Unfällen bei der Landung aber auch infolge Benzinmangels, Motordefekten oder Bedienungsfehlern der Piloten. In der Zeit bis zum Ersten Weltkrieg starben 70 deutsche Flugzeugführer, davon 41 Militärpiloten [3]. Hinweise auf alltägliche Motordefekte und Notlandungen geben die von jedem Piloten geführten Flugbücher. Ernst Canter beispielsweise notierte in seinem Flugbuch mehrere riskante Situationen: „8.11.11: Vergaserbrand;

23.7.1912: Apparat gänzlich zertrümmert; 19.8.1912: Notlandung wegen Benzinmangels, Bruch; 9.1.1913: Wetter dunstig, in 150 m nicht mehr zu sehen, Motor ruckt; 9.1.1913: Motor zieht nicht; 18.1.1913: Winterübung Flugplatz Hasenheidenberg, bei Landung stand die Taube Kopf, weil sich ein Rad gelöst hatte. Propellerbruch; 20.1.1913: Landung wegen Bruchs; 22.1.1913: Glühzündungen wegen schlechten Öles. Montiere ab.“ [4]. Technische Defekte, Notlandungen und tödliche Abstürze gehörten zum Flugalltag. Da die Piloten freiwillig dieses hohe Risiko eingingen, ist von einer hohen Motivation der Akteure auszugehen [5]. Eine Mischung aus Abenteuerlust, Technikfaszination, Sportbegeisterung sowie die Aussicht auf Ruhm bestimmte die Flugbegeisterung der ersten Pilotengeneration.

Automatische Stabilität

Das Verhältnis des Piloten zu seiner Maschine wird wesentlich über die Flugeigenschaften bestimmt [6]. Das über den Steuerungsmechanismus vermittelte Zusammenspiel der subjektiven Wahrnehmungen mit dem Flugverhalten der Maschine sollte die beim Flug auftretenden Störungen kompensieren und das Risiko der Unfallgefahr reduzieren. Während Otto Lilienthal sein Gleitflugzeug allein durch Gewichtsverlagerung seines Körpers balancierte und die ersten Gleitflieger der Gebrüder Wright im Liegen ausbalanciert wurden, gingen diese dazu über, einen Steuerungsmechanismus zu entwickeln, der im Sitzen bedient werden konnte. Auf ihren Flugexperimenten basierte die sogenannte „Verwindung“ an den Tragflächenenden zur Seitenstabilisierung. Die patentierte Verwindung war ein entscheidender Stabilisierungsmechanismus, der dazu diente, die seitliche Kipp-Bewegung, d.h. das ungewollte Drehen in der Längsachse, auszugleichen. Dem instabilen Wright-Flieger korrespondierte das Bild des kühnen Fliegers als „Airman“, der aufgrund seiner Erfahrung und Geschicklichkeit das Flugzeug kontrollierte. Die beim Fliegen auftretenden Instabilitäten durch Wind, Motor und Eigenschwingungen des Flugzeugrumpfes machten ein ständiges Betätigen der Steuerung nötig.

Abbildung 2:
Werbung der Rumpler-Taube, in: Katalog der Allgemeine Luftfahrzeug-Ausstellung, Berlin 1912, S. 1.

Rumpler advertisement in: Katalog der Allgemeinen Luftfahrzeugausstellung, Berlin 1912, S. 1.

Abbildung 1:
Ingenieur Helmuth Hirth, Werkpilot bei der Flugzeugfirma Rumpler und einer der bekanntesten deutschen Piloten in der Vorkriegszeit.

Engineer Helmuth Hirth, pilot of the Rumpler aircraft company, one of the most famous German pilots in the prewar era.



Abbildung 3:
Die Rumpler Taube war in
der Vorkriegszeit das
populärste deutsche Flug-
zeug.

The Rumpler „Taube“
(Dove) was the most
popular German airplane
in the prewar era.

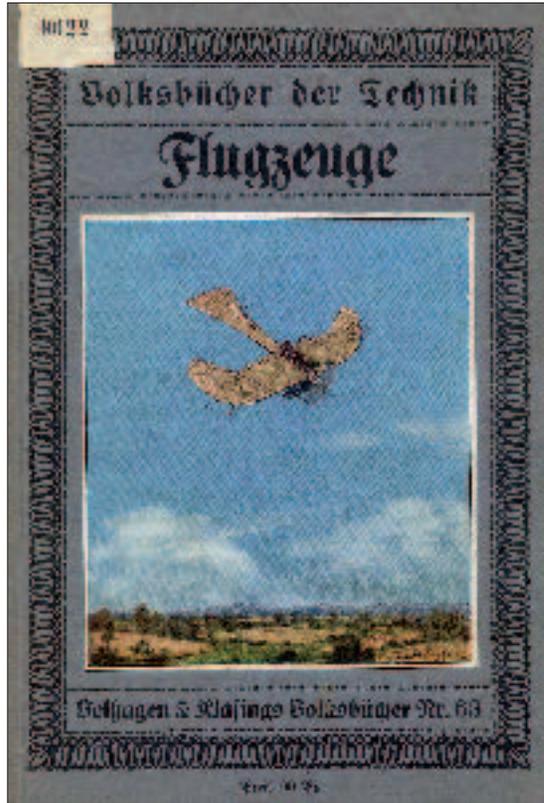


Abbildung 4:
Selbsttätig wirkende Flug-
maschinen-Steuerung von
Franz Drexler, in: Flugsport
1910, S. 12-14, Tafel I.

Automatic steering device,
invented by Franz Drexler
in: Flugsport 1910, S. 12-14,
Tafel 1.

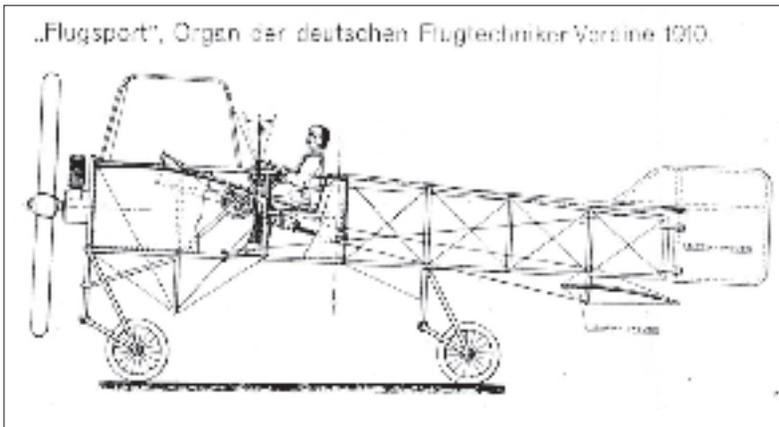
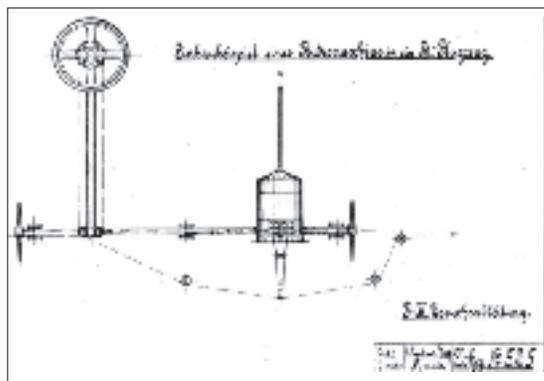


Abbildung 5:
Bayrisches Hauptstaatsar-
chiv, Iluft 44, Franz Drexler,
Hydraulische Hilfssteuer-
ung für Großflugzeuge,
Döberitz, den 31. Mai 1917.

Bayrisches Hauptstaatsar-
chiv, Iluft 44, Franz Drexler,
hydraulic steering support
for giant airplanes,
Döberitz, den 31st May 1917.



Nervliche Anspannung, Reduktion der Aufmerksamkeit und erhöhter Kraftaufwand verminderten die Leistungsfähigkeit der Piloten. Ziel aber war es, die Flugleistungen unabhängig von den individuellen Steuerkünsten und überdurchschnittlichen Leistungen der Akteure zu erreichen. Igo Etrich, der Erfinder des stabilen Tauben-Flugzeugs, hielt 1909 den Wright Doppeldecker für den „derzeit weitaus vollendetsten

Doppeldecker mit willkürlicher Gleichgewichtserhaltung“ [7]. Er kritisierte jedoch, dass dieser instabile Flugzeugtyp eine ununterbrochene Kontrolle und große Geschicklichkeit der Piloten erfordere, die bei Wind an die eines Seiltänzers erinnere [8].

Angesichts der großen Belastungen und Gefahren für den Piloten war ein eigenstabiles Flugzeug eine wesentliche Forderung in der Vorkriegszeit. Anstelle akrobatischer Spitzenleistungen des „Airmans“ wollte man auf dem Wege der Technisierung durch konstruktive Verbesserungen die Leistungsanforderungen und das Risiko für den Piloten reduzieren [9]. Die „Chauffeurhaltung“ versprach mehr Sicherheit. Während also die Piloten im öffentlichen Diskurs als risikofreudige Helden der Moderne stilisiert wurden und viele junge Männer sich aus Flugbegeisterung freiwillig für diesen gefährlichen Beruf meldeten, fand die sicherheitstechnische Frage der Stabilisierung und Automatisierung des Fliegens zunehmend Beachtung [10]. Die Forderung, den Flug unabhängig vom Geschick der Piloten zu kontrollieren, war zentral in dieser von der Sicherheitsfrage geprägten Vorkriegszeit. Es gab hierfür zwei verschiedene technische Möglichkeiten: „Die Anhänger der natürlichen Stabilität versuchen dies durch besondere Form und Lage der Flächen, durch besondere Lage von Schwerpunkt und Widerstandsmittelpunkt zu erreichen. Die Verteidiger der automatischen Stabilität wollen die Steuerbewegungen des Piloten durch diejenige einer automatischen Vorrichtung ersetzen.“ [11].

Die Rumpler-Taube

Über gute Flugeigenschaften verfügte die in der Zeit vor dem Krieg in Deutschland dominante „Rumpler-Taube“. „Der Apparat zeichnet sich besonders durch seine beinahe automatische Stabilität, seine außerordentlich gefällige, vogelähnliche Form und seine leichte Bedienung aus.“ [12]. Die Rumpler-Taube galt als „automatisch-stabiles“ Flugzeug, das in Längsrichtung in eine stabile Fluglage zurückkehrte und so den Piloten von nervenaufreibender Steuerarbeit entlastete. Nachteile der Taube waren ihr hohes Eigengewicht und die daraus resultierende lange Start- und Landephase sowie die geringe Transportfähigkeit. Dieser Typ verkörperte damit die vom Militär geforderten Eigenschaften der Stabilität und Betriebssicherheit, sowie die Herstellung durch eine deutsche Firma. Die Taube war das Leitbild, an dem sich die deutschen Flugzeugfirmen orientierten: „Der Etrich-Flieger ist somit zurzeit das formvollendetste und stabilste Flugzeug und so unbedingt sämtlichen anderen Systemen überlegen.“ [13]. In Deutschland entstand ein regelrechter „Taubenkult“, der sich in Liedern oder dem Flugzeugführerabzeichen niederschlug [14].

Die „Flugautomaten“ Franz Drexlers

Der schweizer Ingenieur Franz Drexler unternahm in Zusammenarbeit mit der Firma Anschütz erste Versuche, die Stabilität der Flugzeuge mit Hilfe von kreiselstabilisierten Apparaten zu erhöhen [15]. Sie entstanden vor dem konkreten Problem der hohen Belastung des Piloten in der Flugpraxis. Mit der „hydraulischen Hilfssteuerung“ wollte Drexler die nervenbelastende Steuerarbeit reduzieren, ohne die aktive

Kontrollmöglichkeit des Piloten aufzugeben, denn im „praktischen Betrieb“ sei eine stabile Fluglage selten [16]. Im Unterschied zum 1916 entwickelten „Fluglagenregler“ war die Hilfssteuerung nicht vollautomatisch, sondern diente lediglich der Entlastung des Piloten beim Steuerungsvorgang. Anstelle des Kreisels, der über einen Servomotor direkt auf die Steuer einwirke, bestimmte der Pilot die Flugrichtung selbstständig. Der hydraulische Steuerungsmechanismus bewegte mittels eines kleinen Handhebelchens den Steuerknüppel, so dass nun der Flugzeugführer, „gewissermaßen mit dem kleinen Finger“, selbst den größten Flugzeugtyp steuern konnte. Ziel war es also, den Kraftaufwand des Piloten zu reduzieren, nicht aber seine Steuertätigkeit zu ersetzen. Gedacht war dieser Mechanismus, der ungefähr 20 kg wog, und „bequem zwischen den Füßen des Piloten“ Platz hatte, zum Einbau in schwere Bomben- und „Riesenflugzeuge“, wie sie beispielsweise die Marine bei monotonen Langstreckenflügen auf hoher See verwandte [17].

Fazit

Während im öffentlichen Diskurs das Bild des heldenhaften, männlichen Piloten als „Airman“ dominierte, setzten sich in der Technikentwicklung aus Sicherheitsgründen stabile Flugeigenschaften durch. Der Aufbau einer Fliegertruppe und die damit verbundene Förderung der Luftfahrtindustrie verlangte die Verminderung des Unfallrisikos. Ziel war es, die Flugeleistungen unabhängig von den individuellen Steuereigenschaften überdurchschnittlich begabter Piloten zu machen. Stabilität und Sicherheit, die eher dem Pilotenbild des Chauffeurs entsprachen, hatten in den Anfangsjahren Vorrang vor der Wendigkeit des Flugzeuges. Sie waren die Grundvoraussetzung für die Veralltäglichere der Flugtechnik und galt für Zivilflieger wie für Militärflieger gleichermaßen.

Graduiertenkolleg „Technisierung und Gesellschaft“

Das Graduiertenkolleg „Technisierung und Gesellschaft“ an der TU Darmstadt ist interdisziplinär und umfasst WissenschaftlerInnen aus den Ingenieurs- und Geisteswissenschaften. Aktuelle Informationen und Projektbeschreibungen: www.ifs.tu-darmstadt.de/gradkoll/index.html

Christian Kehrt

Graduiertenkolleg „Technisierung und Gesellschaft“
Karolinenplatz 5 • Fach 1404 • 64289 Darmstadt
Kehrt@gk-fb2.tu-darmstadt.de

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Mikael Hård
Abt. Technikgeschichte • Institut für Geschichte
Technische Universität Darmstadt • Schloss
64283 Darmstadt
hard@ifs.tu-darmstadt.de

Weitere Informationen zum

Fachgebiet Technikgeschichte:

<http://cms.ifs.tu-darmstadt.de/fileadmin/geschichte/technikgeschichte/tg.htm>

Literatur

- [1] Wilburg Wright auf dem Cento Celle in Rom, in: Zeitschrift für Luftschiffahrt, 1909, S. 377.
- [2] Willy Hahn: Aus meinem Fliegerleben, in: Die Flieger. Jahrbuch des Bund Deutscher Flugzeugführer e.V. 1913, Berlin 1914, S. 61.
- [3] Harald Potempa: Die königlich-bayerische Fliegertruppe 1914-1918, Frankfurt 1997, S. 33.
- [4] BAMA [Bundesarchiv/Militärarchiv Freiburg] N 50/1: Nachlass Ernst Canter, Flugtagebuch (handschriftl.).
- [5] Vgl. Niklas Luhmann: Risiko und Gefahr, in: ders. (Hg.): Soziologische Aufklärung, Opladen 1990 (Bd. 5), S. 131-169. Für diesen Hinweis danke ich Andreas Kaminski.
- [6] Walter Vincenti: What Engineers Know and How They Know It. Analytical Studies from Aeronautical History, Baltimore and London: The John Hopkins University Press 1990, S. 52; Malcolm J. Abzug, E. Eugene Larrabee: Airplane Stability and Control. A History of the Technologies that Made Aviation Possible, Cambridge 1997; Xaver Hafer: Die Anfänge der Stabilitätsbetrachtung in der Flugmechanik, in: Zeitschrift für Flugwissenschaft und Weltraumforschung, 1988, 12, S. 37-44; John Anderson: The Airplane. A History of its Technology, Reston Virginia : The American Institute of Aeronautics and Astronautics 2002; ders.: Introduction to Flight, New York 2005 (international, fifth edition,), S. 28.
- [7] Igo Etrich, Betrachtungen über die bekanntesten Fliegersysteme, in: Zeitschrift für Luftschiffahrt, 1909, S. 834.
- [8] Ebd.
- [9] Charles Gibbs-Smith: The Invention of the Aeroplane 1799-1909, New York 1965, S. 96; Walter Vincenti (wie Anmerkung 6), S. 57. Zur Kritik an Vincenti vgl. Mikael Hård: Technology as Practice. Local and Global Closure Processes in Diesel-Engine Design, in: Social Studies of Science, 1994, Vol. 24, S. 552; Trevor Pinch/Nelly Oudshoorn (Hg.): How Users matter. The Co-construction of Users and Technology, London 2003.
- [10] Hermann Blan: Vorrichtung zur Erhaltung der seitlichen Stabilität, in: Flugsport 1910, S. 126; Prof. Ing. Reissner: Über eine neue, notwendige Bedingung für die automatische Seitenstabilität der Drachenflieger, in: Flugsport 1910, S. 633; Vorrichtung zur Aufrechterhaltung der Stabilität von Flugmaschinen, in: Flugsport 1910, S. 452; C. Walther Vogelsang: Die Stabilisierung der Flugzeuge, Berlin 1917 (Volckmanns Bibliothek für Flugwesen Bd. 9), S. 6.
- [11] Robert Gsell. Natürliche und automatische Flugzeugstabilisierung, in: Flugsport 1912, S. 321.
- [12] Die Rumpeler-Taube, in: Flugsport 1911, Nr. 25, S. 880.
- [13] Über die Stabilisierung der Flugmaschine, in: Zeitschrift für Luftschiffahrt, Nr. 22, S. 22.
- [14] Jörg A. Kranzhoff: Edmund Rumpeler - Wegbereiter der industriellen Flugzeugfertigung, Bonn 2004, S. 75-88.
- [15] BH [Bayrisches Hauptstaatsarchiv/Kriegsarchiv], Luft, 44, Franz Drexler, Die hydraulische Hilfssteuerung für Großflugzeuge, Döberitz den 30. Mai 1917; Jobst Broelmann: Intuition und Wissenschaft in der Kreiseltechnik 1750-1930, München Deutsches Museum 2002, S. 299-308.
- [16] BH, Luft, 44, Franz Drexler, Die hydraulische Hilfssteuerung für Grossflugzeuge, Döberitz den 30. Mai 1917.
- [17] Ebd.



Durchblick – Synthetische Sicht für das Cockpit der Zukunft

Uwe Klingauf/Christoph Vernaleken

Das dynamische Wachstum des weltweiten Luftverkehrs stellt das Luftverkehrssystem vor eine große Herausforderung. Während die Zahl der Flugbewegungen kontinuierlich steigt, soll gleichzeitig die Zahl der Flugunfälle weiter reduziert werden. Um dieses Ziel zu erreichen, muss insbesondere die Flugführung und die Mensch-Maschine-Schnittstelle im Cockpit verbessert werden. Das Fachgebiet Flugsysteme und Regelungstechnik entwickelt dafür neuartige Cockpit Displays, die den Piloten intuitiv das optimale Situationsbewusstsein in allen Flugphasen vermitteln. Dazu werden die primären Flugführungsanzeigen mit einer künstlichen Außensicht hinterlegt, die gestützt auf eine an Bord mitgeführte Datenbank Gelände und Flughäfen darstellt.

Visibility OK – synthetic vision for next generation cockpit. Continuously growing worldwide air traffic poses an immense challenge to civil aviation. While the number of flight operations is increasing, the overall number of accidents has to be reduced. In order to reach this ambitious goal, both avionics and the human machine interface (HMI) of the cockpit have to be improved in the onboard domain. The Institute of Flight Systems and Automatic Control is developing cockpit displays which intuitively provide pilots with an optimum situational awareness during all flight phases. The Primary Flight Display (PFD) and the Navigation Display (ND), the two central cockpit displays, are equipped with a so-called "Synthetic Vision System" (SVS), a database-driven representation of terrain and airport features resembling the real outside world.

Flugsimulator der TUD
Flight Simulator of TUD

Entwicklung der Sicherheit im Luftverkehr

Obwohl sich die Anzahl der Flugbewegungen im kommerziellen Luftverkehr in den letzten 30 Jahren nahezu verdreifacht hat, ist die Zahl der fatalen Flugunfälle im gleichen Zeitraum um zwei Drittel zurückgegangen. Nicht zuletzt aufgrund der technischen Ausstattung moderner Flugzeuge, aber auch aufgrund der kompromisslosen Zertifizierungs- und Wartungsvorschriften sowie der guten Pilotenausbildung ist das Flugzeug inzwischen, bezogen auf die zurückgelegten Personenkilometer, das mit Abstand sicherste Verkehrsmittel. Statistisch gesehen passierte 2004 bei westlichen Fluggesellschaften nur noch ein fataler Unfall pro 10 Millionen Flugbewegungen, 1959 waren dies noch 44 [1].

Das bedeutet jedoch nicht, dass die Entwickler sich beruhigt zurücklehnen können. Der Luftverkehr befindet sich, nur kurz unterbrochen durch die Attentate des 11. September 2001, zurück auf einem Wachstumspfad mit derzeit über 6% Zuwachs pro Jahr. Alle Prognosen sagen eine weitere Verdoppelung bis Verdreifachung des weltweiten Luftverkehrs bis 2020 voraus. Um die Sicherheit im Luftverkehr aufrecht zu erhalten und weiter zu erhöhen, sind deshalb erhebliche Anstrengungen notwendig. Darüber hinaus besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um Wirtschaftlichkeit, Effizienz, Komfort und Umweltfreundlichkeit des Luftverkehrs deutlich zu steigern [2].

Nachdem technische Defekte als Unfallursache mehr und mehr in den Hintergrund treten, rücken „Human Factors“ als Unfallursache in den Mittelpunkt des Interesses. So stellen sog. „Controlled Flight Into Terrain“ (CFIT) Unfälle, die immer auf Desorientierung bzw. mangelndes Situationsbewusstsein der Piloten zurückzuführen sind, mit knapp einem Viertel aller tödlichen Flugunfälle noch immer die Unfallursache Nr. 1 im Luftverkehr dar. CFIT steht für Flugunfälle, bei denen Besatzungen technisch völlig intakte Flugzeuge in Unkenntnis des umgebenden Geländes unbeabsichtigt gegen ein Hindernis steuern. Aber auch andere Unfallarten, wie z.B. die Kollision zweier Flugzeuge in der Luft, werden bei zunehmender Verkehrsdichte wahrscheinlicher und sind häufig ebenfalls auf mangelndes Situationsbewusstsein der Piloten bzw. auch der Fluglotsen zurückzuführen, wie das tragische Unglück bei Überlingen am 1. Juli 2002 gezeigt hat. Nicht zuletzt können auch Wetterphänomene, insbesondere Turbulenzen und Gewitterwolken, eine erhebliche Bedrohung für das Flugzeug darstellen.

Moderne Flugzeug-Cockpits

Auch wenn die Cockpits einer Junkers Ju-52 („Tante Ju“) aus dem Jahre 1932 (Bild 1) und eines Airbus A380 (Bild 2) auf den ersten Blick gar nicht einmal so unähnlich sind, so hat die Technik in dieser Zeit doch gewaltige Fortschritte gemacht. An die Stelle mechanischer Zeigerinstrumente sind großformatige Bildschirme gerückt, die die jeweils von den Piloten benötigten Informationen graphisch aufbereitet anzeigen („Glass Cockpit“). Um den genannten externen Gefahren zu begegnen, ist der Einsatz von Wetterradar sowie Warnfunktionen, z.B. zur Kollisionsvermeidung



Bild 1:
Cockpit der Junkers Ju-52
(1932)

Flight Deck of the Junkers
Ju-52 (1932)

mit anderen Flugzeugen (Traffic Collision Avoidance System – TCAS) bzw. mit dem Gelände (Terrain Awareness and Warning System – TAWS), für Verkehrsflugzeuge seit vielen Jahren zwingend vorgeschrieben. Unterstützt durch die weitgehende Automatisierung des Fliegens hat sich die Rolle des Piloten weg von der Steuerung des Flugzeugs hin zu einem „Flugmanager“ gewandelt. Die wesentlichen Aufgaben bestehen heute in der Flugplanung, der Abstimmung mit der Flugsicherung, der Abwicklung standardisierter „Procedures“ und der Überwachung der Systemfunktionen.

Dennoch ist die Bedienung nicht intuitiv, sondern der Pilot muss eine Vielzahl von Informationen wie in einem „Multimediapuzzle“ aufnehmen und diese mental zu einem Gesamtbild der Situation zusammenfügen. Besonders in Stresssituationen, ausgelöst z.B. durch mangelnde Außensicht bei schlechtem Wetter oder unerwartete Ereignisse, kommt es dabei immer wieder zu Fehlinterpretationen, die insbesondere bei einer Verkettung mit weiteren unglücklichen Umständen zur Katastrophe führen können. Hier setzt die Forschung am Fachgebiet Flugsysteme und Regelungstechnik mit der Idee an, dem Piloten alle wichtigen Informationen so intuitiv aufzubereiten und graphisch darzustellen, dass er jederzeit das notwendige Situationsbewusstsein hat.

Synthetische Sichtsysteme

Betrachtet man die Flugunfälle unterteilt nach Flugphasen, so stellt man fest, dass weitaus die meisten Unfälle in Bodennähe passieren (20% beim Start, 51% bei der Landung). Zusammen mit der Erkenntnis über CFIT-Unfälle führt das zu der Einsicht, dass bodennahes Fliegen im Cockpit besser unterstützt werden muss. Ein viel versprechender Ansatz besteht in der Einführung sog. Synthetischer Sichtsysteme. Dabei wird mit Computerhilfe auf Basis der Navigationsdaten und einer mitgeführten Geländedatenbank



Bild 2:
Cockpit des neuen Airbus
A380

Flight Deck of the new
Airbus A380

eine 3-dimensionale synthetische Außensicht generiert und dem Piloten auf einem großformatigen Bildschirm angezeigt (Bild 3). Die Fähigkeit des Menschen, visuelle Informationen sehr schnell aufzunehmen und zu verarbeiten, führt nachweislich zu einer deutlichen Verbesserung des Situationsbewusstseins [3]. So ermöglicht die graphische Art der Darstellung z.B. durch Einfärben gefährlicher Erhebungen eine

intuitive Geländewarnung. Überlagert wird die Anzeige mit allen wichtigen Informationen über den Flugzustand, wie z.B. Höhe, Geschwindigkeit und Kurs [4]. Umfangreiche Simulatorversuche haben die Wirksamkeit des Systems bestätigt, erfahrene Piloten beurteilen das System sehr positiv.

Rollführung

Mit zunehmendem Luftverkehr entwickeln sich die Flughäfen immer mehr zum Nadelöhr im System. Während man in der Luft Raum für zusätzliche Flugzeuge einfach dadurch schaffen kann, dass man die Abstände für die Höhenstaffelung reduziert (was durch präzisere Instrumente ohne weiteres möglich ist) oder neue Luftstraßen definiert, ist der Ausbau von Flughäfen ein sehr teures und kurzfristig kaum zu realisierendes Vorhaben, wie sich am Beispiel Frankfurts zeigt. Erschwerend kommt hinzu, dass einer Airbus-Studie zufolge das Verkehrsaufkommen an den Drehkreuzen des internationalen Luftverkehrs, den sog. „Hubs“, weitaus stärker wachsen wird als an mittleren und kleinen Flughäfen [5]. Dies hat zur Folge, dass die vorhandene Infrastruktur wesentlich stärker genutzt werden muss, was zwangsläufig zu einem erhöhten Risiko von Zusammenstößen am Boden, insbesondere auf Start- und Landebahnen führt, wenn man nicht ausgefeilte Rollführungssysteme mit entsprechenden Warnfunktionen zur effizienten Lenkung des Verkehrs am Flughafen einsetzt.

Die grundlegende Onboard-Komponente dieser Systeme in zukünftigen Cockpits ist die datenbankgestützte, digitale Flughafenkarte, die im Airbus A380 erstmals als integraler Bestandteil des Cockpits realisiert wird. Für sich allein ermöglicht sie der Besatzung eine bessere Orientierung auf wenig bekannten Flugplätzen und bei schlechter Sicht. Ihr volles Potential entfaltet die digitale Flughafenkarte in Verbindung mit einer digitalen Kommunikation mit der Flugsicherung über Datenlink. Dann kann die Route zum Gate oder zur Startbahn auf der Flughafenkarte angezeigt werden, und zukünftig werden dadurch präzise Warnungen möglich, etwa wenn die Besatzung Gefahr läuft, ohne Erlaubnis eine Start- oder Landebahn zu überqueren (Bild 4).

Bild 3:
Primary Flight Display mit
synthetischer Aussensicht
Primary Flight Display with
Synthetic Vision

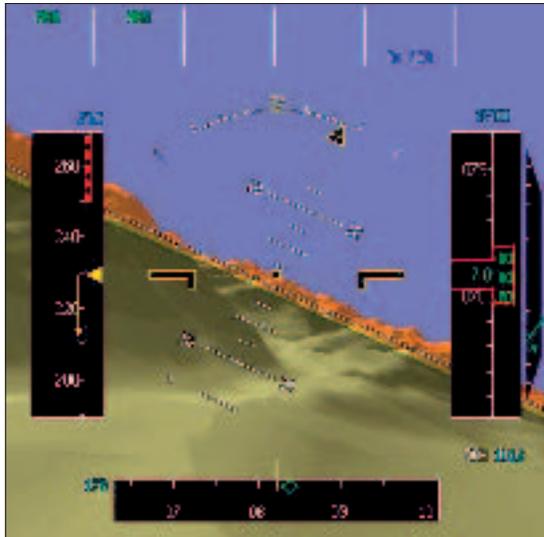


Bild 4:
Rollführungsdisplay mit
Warnung vor unberechtigtem
Rollen auf die
Runaway
Taxi Display with Runway
Incursion Alert

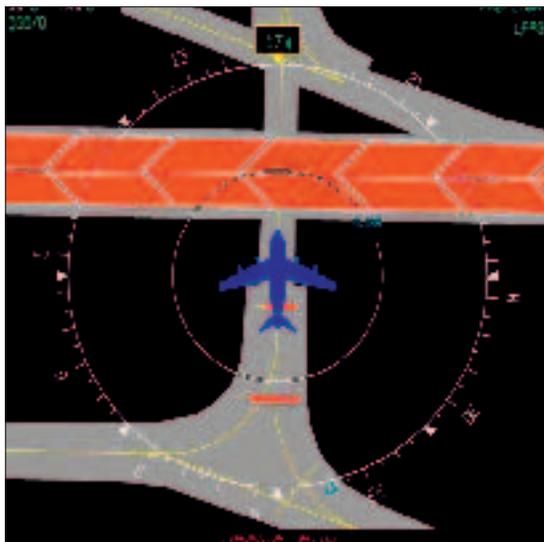
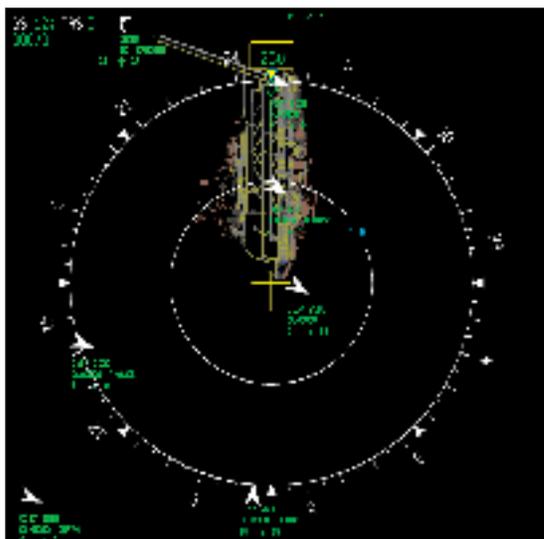


Bild 5:
Display mit Informationen
zur Verkehrslage
Cockpit Display of Traffic
Information



Ausblick

Die Möglichkeit, Flugzeuge untereinander sowie mit der Flugsicherung über Datenlinks zu vernetzen, kann zu einer weiteren Erhöhung der Sicherheit genutzt werden. So wird es möglich, dass Pilot und Fluglotse das gleiche, präzise Bild der umgebenden Verkehrslage haben. Formate für die Darstellung der Verkehrslage im Cockpit sind bereits in Entwicklung (Cockpit Display of Traffic Information – CDTI), siehe Bild 5. Die übermittelten Informationen können dazu beitragen, frühzeitig potentielle Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern zu erkennen und Abhilfemaßnahmen einzuleiten. Langfristig gesehen wird die Automatisierung des Fliegens immer weiter vorschreiten. Das 1-Mann-Cockpit im Business-Jet ist nicht in allzu weiter Ferne, und auch das völlig autonome Flugzeug ist keine Utopie, wie die besonders in der militärischen Luftfahrt boomenden UAV's (Unmanned Aerial Vehicles) zeigen.

Fachgebiet Flugsysteme und Regelungstechnik an der TU Darmstadt

Das Fachgebiet Flugsysteme und Regelungstechnik (FSR) hat derzeit 28 Mitarbeiter und ist im Fachbereich Maschinenbau an der TU Darmstadt angesiedelt. In der Forschung beschäftigt sich das FSR vorwiegend mit der Steigerung der Sicherheit im Luftverkehr. Schwerpunkte der Arbeiten sind:

- Entwicklung synthetischer Sichtsysteme und Untersuchungen zur Mensch-Maschine-Interaktion und Informationsübermittlung im Cockpit
- Entwicklung zukünftiger Konzepte für das Luftverkehrsmanagement zur flexibleren und effizienteren Nutzung des Luftraums
- Evaluierung neuer Entwicklungen im Flugsimulator und in Flugversuchen
- Automatisierung des Fliegens und zivile Nutzung unbemannter Flugobjekte (Unmanned Aerial Vehicles – UAV)

Diese Themen werden in vielfältigen Kooperationen mit in- und ausländischen Forschungseinrichtungen

und Industriepartnern bearbeitet. So ist das Fachgebiet in vier EU-Forschungsprogrammen beteiligt, und es bestehen Kooperationen mit zwei US-amerikanischen Firmen.

Fachgebietsleiter:

Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf

Tel. 0 61 51/16-21 90

e-mail: klingauf@fsr.tu-darmstadt.de

Ansprechpartner:

Dipl.-Phys. Christoph Vernaleken

Tel. 0 61 51/16-67 12

e-mail: vernaleken@fsr.tu-darmstadt.de

TU Darmstadt

Fachgebiet Flugsysteme und Regelungstechnik

Petersenstraße 30 • 64287 Darmstadt

<http://www.fsr.tu-darmstadt.de>

Literatur

- [1] Boeing Commercial Airplanes: Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents, Worldwide Operations 1959-2004, May 2005
- [2] European Commission: European Aeronautics: a Vision for 2020. Brüssel 2001
- [3] Below, C., von Viebahn, H., Hammer, M.: 4D flight guidance displays: an approach to flight safety enhancement, Proc. SPIE: Synthetic Vision for Vehicle Guidance and Control, Vol. 2463, 1995
- [4] Vernaleken, C., v. Eckartsberg, A., Mihalic, L., Jirsch, M., Langer, B., Klingauf, U.: The European research project ISAWARE II: a more intuitive flight deck for future airliners. SPIE Defense and Security Symposium, Orlando 2005
- [5] Airbus: Global Market Forecast 2004 – 2023, December 2004



„Schon Mails gecheckt?“
„Aber sicher!“

Die AntiVir Campus-Lizenz.
Professionelle IT-Sicherheit für Universitäten.

 **AntiVir**[®]
BusinessSolutions

Kommunikation muss
sicher sein – nicht nur
beim Mailen.

AntiVir schützt Netzwerke
von Unternehmen und
Bildungseinrichtungen
zuverlässig vor Viren- und
Malware-Angriffen.

Besonders attraktiv:
Die Konditionen für
Universitäten.

Infos: 07542-500 245 | campus@antivir.de



www.antivir.de