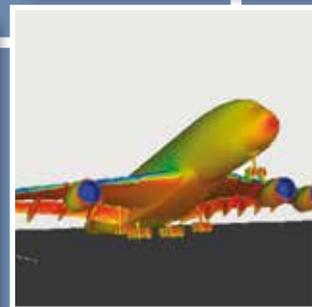
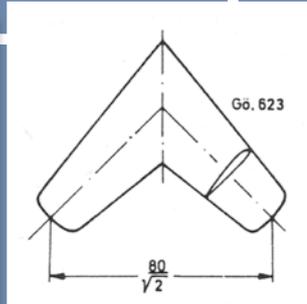
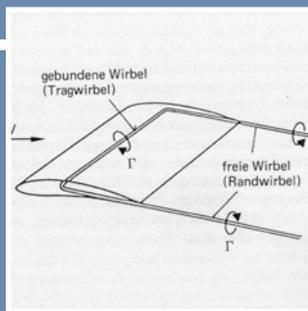




Langfristige Entwicklung der zivilen Luftfahrtbranche

Ökonomie und Ökologie im Einklang

*Eine Denkschrift der Aeronautischen Senioren München
November 2012*



Langfristige Entwicklung der zivilen Luftfahrtbranche

Ökonomie und Ökologie im Einklang

*Eine Denkschrift der Aeronautischen Senioren München
München*

November 2012

Vorwort

Die deutsche Luftfahrtbranche, unter der hier die Flugzeugindustrie, die hochschulfreie Luftfahrtforschung und die Hochschullehre und -forschung verstanden werden, ist potent und erfolgreich. Die Firmen (Zelle, Antrieb, Subsysteme) sind vor allem im europäischen Rahmen tätig, ihr Markt indessen ist ein weltweiter. Enge Beziehungen gibt es zwischen allen europäischen Luftfahrtforschungsanstalten. Forschungs- und Entwicklungsarbeiten werden von allen Partnern im nationalen deutschen und im internationalen, vor allem europäischen Rahmen durchgeführt.

Die Aeronautischen Senioren München (ASM) möchten mit dieser Denkschrift Anregungen und Empfehlungen für aus ihrer Sicht nötige Entwicklungen geben, die die Branche als solche ökonomisch stärken, aber auch den immer stärker werdenden ökologischen Zwängen und der weltweiten Konkurrenzsituation Rechnung tragen sollen.

Die ASM sind eine lose Vereinigung ehemaliger Ingenieure, Forscher, Hochschullehrer und Piloten der Branche und der Fluggerätebetreiber. Sie sehen sich als unabhängige Experten, die weite Gebiete der Branche abdecken.

Die Anregungen und Empfehlungen beziehen sich im wesentlichen auf zivile Transportflugzeuge für Personen und Fracht, sowie auf Hubschrauber und Kurz- und Senkrechtstarter. Sportflugzeuge, Flugzeuge der Allgemeinen Luftfahrt und Militärflugzeuge stehen nicht im Mittelpunkt der Betrachtungen.

Die Denkschrift richtet sich an die Industrie, die Luftfahrtforschung, die Hochschulen, die Förderinstitutionen sowie an alle politischen Institutionen (Parlamentarier, Parteien, Ministerien), die sich mit Fragen der Luftfahrtbranche befassen.

Die Denkschrift entstand in den Jahren 2011 und 2012 aus einer Reihe von Vorträgen und Diskussionsrunden der ASM. Im Folgenden wird eine Kurzfassung gegeben und dann ab Seite 7 die eigentliche Denkschrift.

Weitere Informationen zur Denkschrift sowie eine elektronische Version können beim Ansprechpartner Prof. Dr. E.H. Hirschel (Tel.: 08106-20179, e-mail: e.h.hirschel@t-online.de) angefordert oder von www.ehhirschel.de heruntergeladen werden.

München, im November 2012

Kurzfassung der Denkschrift

Die deutsche Luftfahrtbranche ist eine potente und erfolgreiche Branche. Die Aeronautischen Senioren München (ASM) geben mit dieser Denkschrift Anregungen und Empfehlungen für aus ihrer Sicht nötige Entwicklungen, die die Branche als solche in Hinsicht auf die künftigen ökonomischen und ökologischen Zwänge stärken sollen. Die Anregungen und Empfehlungen beziehen sich im wesentlichen auf zivile Transportflugzeuge für Personen und Fracht. Sie gelten aber auch für jedes andere Fluggerät. Beim militärischen Flugzeugbau wird die Erhaltung überkritischer Entwurfsfähigkeit als dringend notwendig angesehen. Empfohlen wird überdies, technologische Keimzellen für Hyperschall-Fluggeräte zu schaffen.

Der quantitative Vergleich des Verkehrsträgers Luftverkehr mit den Verkehrsträgern Schienenverkehr und Straßenverkehr ergibt interessante Ergebnisse in Hinsicht auf Bodenverbrauch, Primärenergiebedarf, Kostenstrukturen und Umweltprobleme. Der Luftverkehr ist bei weitem nicht so negativ zu sehen, wie er meistens dargestellt wird. Im Gegenteil, er hat eine Reihe von Vorteilen gegenüber den anderen Verkehrsträgern, die aber heute nicht genügend kommuniziert werden. Dennoch gibt es eine Reihe sehr großer Herausforderungen, denen sich die Branche weiterhin stellen muss.

Die Betrachtung einiger grundlegender Zusammenhänge in Hinsicht auf Studien von unkonventionellen Flugzeugkonfigurationen führt zur Feststellung, dass die heutige Konfiguration eines Flugzeuges vom Airbus-Typ wahrscheinlich die optimale ist (allerdings unterschiedlich für Kurz-/Mittel- und Langstreckenflugzeuge). Diese Konfiguration gilt es weiter zu entwickeln unter Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Aspekte. Das schließt nicht aus, dass Elemente unkonventioneller Konfigurationen in neue Konfigurationen Eingang finden.

Für die Produktdefinition ist es in Zukunft erforderlich, ökologische Wirkungsgrade zu entwickeln. Sehr große Potentiale, die bei weitem nicht ausgeschöpft sind, gibt es bei der Definitions- und der Entwicklungsmethodik. Das Hauptproblem wird in der heute quantitativ und qualitativ unzureichenden Beschreibung der physikalischen Eigenschaften und Funktionen des Flugzeuges in seinen frühen Definitionsphasen gesehen. Das ist deshalb kritisch, weil in diesen Phasen die späteren Betriebs- und Lebenszykluskosten bereits weitgehend festgelegt werden.

Hier können neue, auf Informationstechnologien gestützte Vorgehensweisen Abhilfe schaffen, ebenso wie der Einsatz hochwertiger mathematisch/numerischer Entwurfsmethoden ("Virtuelles Produkt"), die eine ganzheitliche Beschreibung des Produktes ermöglichen. Letzteres gilt insgesamt für die Definitions- und Entwicklungsmethodik. Diese orientiert sich im wesentlichen immer noch an Cayleys Entwurfsparadigma, das eine nur lose Kopplung der Subsysteme mit ihren Funktionen annimmt. Da die Kopplungen aber immer stärker werden, sind die genannten Vorgehensweisen erforderlich, die dem Rechnung tragen.

Deutschland hat derzeit nahezu keine industriellen Fähigkeit mehr, die erforderlich ist, Großflugzeuge zu entwickeln. Die Beteiligung an den Produkten der EADS ist partiell. Es wird empfohlen, in Deutschland die Definition und die Entwicklung etwa eines A320-Nachfolgers mit der genannten neuen fortschrittlichen Vorgehensweise durchzuführen. Für Airbus/EADS hätte das positive Effekte, nämlich für Deutschland wirtschaftspolitisch aber auch forschungs- und hochschulpolitisch wünschenswerte Impulse sowie interne, innovationsfördernde Konkurrenz. Dazu käme die Schaffung eines Elementes langfristiger Zukunftssicherung sowie der Anreiz für exzellente deutsche Nachwuchs-Ingenieure, in die Branche zu kommen und dort zu bleiben.

Weitere Empfehlungen betreffen die Aerodynamik, Werkstoffe und Bauweisen, bei denen insbesondere die Potentiale von Kohlefaserverbundwerkstoffen viel stärker als bisher ausgeschöpft werden müssen, sowie andere Fachdisziplinen. Empfohlen wird auch, das Potential von Großflugzeugen zum Gütertransport sowie von Senkrechtstartern in Hinsicht auf Länder mit schwach ausgebildeter Verkehrsinfrastruktur neu zu betrachten.

Allgemeine Empfehlungen zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der Luftfahrtbranche in Hinsicht auf die künftigen Herausforderungen befassen sich mit den heutigen Organisationsstrukturen in den Unternehmen und in der Forschung und Lehre. Die industriellen Organisationsstrukturen orientieren sich an den Fachdisziplinen (in Form von Kostenstellen). Die Hochschullehre und die hochschulfreie Forschung sind auch Fachdisziplinen-orientiert. Es wird empfohlen, Anreize zu geben, um dort wo es nötig ist, die Disziplinengrenzen zu überwinden. Außerdem sollte, soweit noch nicht geschehen, bei industriellen Leitungsfunktionen deutlich mehr Wert auf fachliche Expertise gelegt werden. Hier wird, zumindest für die Produktdefinition, aber auch für die Entwicklungsphasen ein Umdenken empfohlen.

Insgesamt wird festgestellt, dass die Luftfahrtbranche heute, aufgrund der Airbus-Verkaufserfolge, wirtschaftlich erfolgreich ist. Die heutigen Vorgehensweisen bei der Definition und Entwicklung der Produkte, die Strukturen, Leitungsparadigmen und der Wissenstransfer sind jedoch in Hinsicht auf die künftige Konkurrenzsituation und die ökonomischen und ökologischen Zwänge teilweise in Frage zu stellen und auf jeden Fall zu verbessern.

Die Denkschrift

1 Einleitung

Die Denkschrift mit ihren Anregungen und Empfehlungen bezieht sich im wesentlichen auf zivile Transportflugzeuge für Personen und Fracht, sowie auf Hubschrauber und Kurz- und Senkrechtstarter. Sportflugzeuge, Flugzeuge der Allgemeinen Luftfahrt und Militärflugzeuge stehen nicht im Mittelpunkt der Betrachtungen. Für sie sind aber auch alle Anregungen und Empfehlungen gültig.

Die Denkschrift ist in einzelne Abschnitte gegliedert. Im folgenden Abschnitt 2 wird der Stellenwert der Luftfahrtindustrie in Deutschland und in Abschnitt 3 ihr Stand in der internationalen Konkurrenzsituation erörtert. Das Flugzeug im Vergleich zu den bodengebundenen Verkehrsmitteln wird in Abschnitt 4 betrachtet. Abschnitt 5 ist der Darstellung einiger grundlegender Zusammenhänge gewidmet, die in der Diskussion um "unkonventionelle" Konfigurationen zuweilen verdrängt werden.

Der Hintergrund der fachlichen Empfehlungen wird in Abschnitt 6 gegeben in Form der Ökonomie- und Ökologieaspekte der Luftfahrt, der betrachteten Flugbereiche und neuer Ansätze und Technologien. Es folgen dann die eigentlichen fachlichen Empfehlungen in Abschnitt 7. Allgemeine Empfehlungen zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit sind in Abschnitt 8 zu finden. Nach den abschließenden Bemerkungen in Abschnitt 9 sind dann in Abschnitt 10 die Namen der Mitglieder der Aeronautischen Senioren München angegeben, die an dieser Denkschrift mitgewirkt haben. Das Literaturverzeichnis beschließt die Denkschrift.

2 Der Stellenwert der Luftfahrtindustrie in Deutschland

Die deutsche Luftfahrtindustrie mit ihren Produktentwicklungs- und Fertigungsfähigkeiten wird von der Politik nach wie vor als strategische Industrie betrachtet. Dieses zeigte sich vor einiger Zeit nach Meldungen in den Medien, dass Daimler seine EADS-Anteile abgeben will, was bei der Bundesregierung zu Aktivitäten führte, die sicher stellen sollen, dass der deutsche Einfluss bei EADS gewahrt bleibt. Das Argument ist, dass es sich um hochwertige Positionen im Management handelt, aber auch um lukrative Produktionsarbeiten, die man in Deutschland nicht verlieren möchte. Weniger im Blick sind die Innovationsleistungen der Branche und der resultierende Technologietransfer in andere Gebiete, der von sehr großer Bedeutung ist [1]. (Die jüngst gescheiterten Pläne, EADS und BAE zu fusionieren, werden hier nicht erörtert.)

Die strategische Bedeutung der Industrie ist aber auch daran abzulesen, dass sie mit Hilfe von Luftfahrtforschungsprogrammen, weitgehend unbemerkt von der Öffentlichkeit, gefördert wird. Die Zielsetzung dieser Programme ist die Stärkung der technologischen Basis und der wirtschaftlich-technischen Situation.

Wenn die Luftfahrtindustrie strategische Bedeutung für Deutschland hat, muss auch der militärische Teil betrachtet werden, wo die Innovationserfordernisse und -leistungen besonders hoch sind. Hier zeichnet sich allerdings die Gefahr ab, dass der ehemalige militärische Flugzeugbau, jetzt Air-Systems von Cassidian (einer EADS-Tochter), unter Umständen die Entwicklungsfähigkeiten aufgibt und auf eine reine Wartungs- und Produktunterstützungsfunktion reduziert wird. Das stünde aber im Gegensatz zu den Beteuerungen der Politik und sollte dort eine differenzierte Betrachtung hervorrufen.

In diesem Zusammenhang sei eine Studie der Europäischen Air and Space Academy erwähnt, in der die Gefahr gesehen wird, dass Europa in absehbarer Zeit die Fähigkeiten zur Entwicklung von bemannten und/oder unbemannten Kampfflugzeugen verliert, wenn von der Politik nicht entsprechend gegengesteuert wird [2]. Gleiches gilt sicher auch für Hyperschall-Fluggeräte in Hinsicht auf militärische Aufklärungssysteme aber auch auf fortschrittliche Raumtransportsysteme.

Militärische Fluggeräte und Hyperschall-Fluggeräte mit ihren extrem hohen technologischen Herausforderungen und den entsprechenden Innovationspotentialen sollten in Hinsicht auf mögliche künftige strategische Erfordernisse gesehen werden und nicht mit dem Hinweis auf fehlende baldige Wertschöpfung abgetan werden.

3 Die deutsche Luftfahrtbranche in der internationalen Konkurrenzsituation

Die deutsche Luftfahrtindustrie ist größtenteils nicht mehr autonom "deutsch". Sie ist sehr eng mit der anderer europäischer Nationen verknüpft. Das gilt auch für die hochschulfreie Luftfahrtforschung, weniger für die Hochschullehre und -forschung. Wenn also die langfristige Entwicklung der Branche betrachtet werden soll, sind diese Verknüpfungen zu beachten. Fünf große Herausforderungen werden deshalb gesehen:

- Die ökonomischen und die ökologischen Zwänge, verbunden mit einem voraussichtlich anhaltenden Wachstum des Luftverkehrs (Passagier- und Frachttransport), erfordern kostengünstige, sichere und umweltverträgliche Fluggeräte. Dieses ist zum Beispiel in den entsprechenden Schriften des Advisory Council for Aeronautical Research in Europe (ACARE) niedergelegt worden ("A Vision for 2020", "Beyond Vision 2020 (Towards 2050)") und soll hier nicht wiederholt werden.
- Die bestehende Konkurrenzsituation mit der US-Amerikanischen Luftfahrtindustrie.
- Die bestehende, aber insbesondere die zukünftige Konkurrenzsituation mit der Luftfahrtindustrie aus den BRICC-Staaten (Brasilien, Russland, Indien, China, Canada).
- Die Erschließung neuer Märkte in Ländern mit schwacher Verkehrsinfrastruktur.
- Die Positionierung der deutschen Luftfahrtindustrie, zusammen mit der Forschung und der Lehre, im europäischen Rahmen. Letzten Endes ist dieses wieder die Frage nach dem strategischen Wert der Branche. Wenn, wie immer wieder zu beobachten ist, die Tendenz besteht, die Produktdefinition und -entwicklung dem oder den europäischen Partnern zu überlassen, dann ist das falsch. Die Luftfahrtfirmen sind nicht länger - im Vergleich zum Zeitraum 1920-1980 - mehr oder minder "Innovationsfirmen" [3], sondern normale Industrien in privater Hand, die auf Wertschöpfung orientiert sind. Wo sich allerdings die Ansicht durchsetzt, dass Produktentwicklung nur Geld kostet und die Fertigung alleine interessant ist, wird der Niedergang bereits eingeleitet. In unserem Fall gilt, dass es nicht in einem strategischen deutschen Interesse sein kann, Produktdefinition und -entwicklung überwiegend den europäischen Partnern zu überlassen und sich selbst nur auf die Produktion als solche zu beschränken.

4 Das Flugzeug und die bodengebundenen Verkehrsmittel

Das hier betrachtete Flugzeug hat zwei - nicht immer getrennte - Aufgaben: (1) Transport von Personen, (2) Transport von Gütern (meistens, aber nicht notwendig, in Kombination mit (1)). Dazu kommt die Gewinnung von Informationen, eine Aufgabe, die in Zukunft größere Bedeutung erringen kann. Der Luftverkehr steht hiermit in Konkurrenz zum Straßenverkehr (Aufgaben 1 und 2), zum Schienenverkehr (Aufgaben 1 und 2) und zum Binnenschiffverkehr (Aufgabe 2).

Der Transport per Flugzeug betrifft in der Regel den Transport über größere Entfernungen, auf keinen Fall aber den Nahverkehr etwa im Umfeld von Städten und städtischen Ballungsgebieten. Das gilt für den Personen-, aber auch für den Gütertransport. Bei den folgenden Betrachtungen ergibt sich daher die Notwendigkeit einer sinnvollen Abgrenzung. Generell wird dem Luftverkehr in ökologischer Hinsicht ein schlechtes Zeugnis ausgestellt im Vergleich zum Straßen- und zum Schienenverkehr. Das schlechte Zeugnis für den Luftverkehr ergibt sich meistens aufgrund politisch/ideologisch verzerrter Betrachtungsweisen, wobei allerdings auch wirtschaftliche Interessen politisch einflussreicher Kreise eine Rolle spielen können.

Die beanstandeten Betrachtungsweisen resultieren in der Regel daraus, dass etwa nur der Kraftstoffverbrauch - und damit der Schadstoffausstoß - einer Transportleistung gesehen wird, etwa die Treibstoffmenge, die benötigt wird, um einen Passagier oder ein Frachtgut von A nach B zu transportieren. Das geht soweit, dass beim Passagiertransport in einem Flugzeug die Frachtbeiladung, die einen erheblichen Teil des Geschäftes ausmacht, gar nicht berücksichtigt wird.

Viel wichtiger, und das ist ein wesentlicher Punkt in unserer Argumentation, ist, dass bei dieser punktuellen Betrachtungsweise das Problem des jeweiligen Gesamtsystems unterschlagen wird. Hier sind einige Beobachtungen zu machen:

1. Der Luftverkehr hat einen sehr niedrigen Flächenverbrauch im Vergleich zum Schienenverkehr und zum Straßenverkehr. Die Bundesrepublik Deutschland hat eine Fläche von ungefähr 357.100 km², davon sind 4,8 Prozent, also ungefähr 17.100 km² Verkehrsfläche [4]. Von dieser Fläche belegt der Straßenverkehr ungefähr 91,6 Prozent, der Schienenverkehr ungefähr 7 Prozent und der Luftverkehr 0,6 Prozent [5]. Das sind für den Straßenverkehr 15.700 km², für den Schienenverkehr 1.200 km² und für den Luftverkehr 102 km². Die Anzahl der pro Flächeneinheit transportierten Passagiere konnte nicht ermittelt werden. Bereits in der alten Bundesrepublik Deutschland wurden aber pro Flächeneinheit mehr als fünf mal soviel Passagierkilometer im Luftverkehr als im Schienenverkehr gezählt und mehr als sechs mal soviel wie im Straßenverkehr (Quelle BMV/Lufthansa 1989). Der Luftverkehr ist also bei weitem die Verkehrsart mit dem niedrigsten Flächenverbrauch pro Passagierkilometer.
2. Der spezifische Primärenergiebedarf des Luftverkehrs ist im Vergleich niedrig. Üblicherweise wird der Kraftstoffverbrauch von Autos in Liter/(100 km) angegeben. Dabei ist nichts über die Transportleistung gesagt. In der Luftfahrt, auch bei der Deutschen Bahn, wird der Verbrauch auf die Person (P) bezogen: Liter/(Pkm). Um jedoch den Energiebedarf verschiedener Transportmittel korrekt zu vergleichen, ist es erforderlich, eine dimensionslose gemeinsame Vergleichsbasis zu benutzen. In [6] wird dafür der spezifische Primärenergiebedarf e_p als Basis eingeführt. (Anschaulich kann der spezifische Primärenergiebedarf mit dem Energieinhalt etwa von Benzin (E_p) folgendermaßen ausgedrückt werden: $E_p = e_p \times 3,21$ Liter/(100 Pkm).) Der spezifische Primärenergiebedarf berücksichtigt jedoch nicht die Infrastrukturkosten des jeweiligen Verkehrsträgers.

Je niedriger der e_p eines Transportmittels ist, desto wirtschaftlicher ist der Transport damit. Für Flugzeuge vom Airbus-Typ ergeben sich für 150-Sitzer (Kurzstrecke) bis zum 300-Sitzer (Langstrecke) Werte von $e_p = 0,94$ bis $0,83$. Beim ICE ergeben sich für Geschwindigkeiten von 250 km/h bis 350 km/h Werte von $e_p = 1,24$ bis $2,35$. Für einen Oberklassen-Pkw erhält man $e_p = 1,73$ und für ein großes Containerschiff nur $e_p = 0,035$.

3. Die Kostenstruktur des Luftverkehrs ist günstig. Die Systematik der Kostenstrukturen der Verkehrsträger in [7] unterscheidet Kosten des Betriebs, der Infrastruktur, der Unfälle und der Umwelt. Für das Jahr 2008, zum Beispiel, ergeben sich die in Tabelle 1 angegebenen Kostenstrukturen. Es werden die volkswirtschaftlichen Kosten angegeben. Für den Schienenverkehr findet man die Angabe eines volkswirtschaftlichen Kostendeckungsgrades von nur 52 Prozent. Dem steht der betriebswirtschaftliche Kostendeckungsgrad von 107 Prozent gegenüber [7]. Für die Verkehrsträger Schiene und Luft sind keine Unfallkosten angegeben. Der Luftverkehr allerdings ist weltweit die sicherste Verkehrsart [8], Für das Jahr 2011 gibt die IATA an, dass im weltweiten Luftverkehr 486 Menschen ums Leben kamen. Die Zahl der Fluggäste weltweit war rund 2,6 Milliarden.

Tabelle 1: Kostenstrukturen (volkswirtschaftliche Kosten) des Personenverkehrs der Verkehrsträger in Deutschland im Jahr 2008 in Mrd. Euro. ÖPNV: öffentlicher Personennahverkehr. Datenquelle [7].

Verkehrsart	Betrieb	Infrastruktur	Unfälle	Umwelt	Kostendeckung [%]	Subventionen
Straße	164	24,2	31,8	13,6	80 - 84	3,32
Schiene	6,1	7,1	-	0,9	52	9,88 (mit ÖPNV)
Luft	19,9	6,1	-	1,4	95	0,517

Bei den Angaben zur Kostendeckung wird für Straßen- und Luftverkehr davon ausgegangen, dass die Betriebskosten hundertprozentig gedeckt sind. In wieweit die Infrastrukturkosten des Schienenverkehrs die Kosten der Liegenschaften enthalten, ist nicht erkennbar. Die Unfallkosten sind die externen Unfallfolgekosten. Die Umweltkosten sind Kosten im Zusammen-

hang mit Luftverschmutzung, Lärm, Klima (CO₂) und so weiter. Auch hier ist nicht erkennbar, wie weit die Umweltkosten der Liegenschaften enthalten sind.

Die Transportleistungen der einzelnen Verkehrsträger im Jahr 2008 werden in [7] in Passagierkilometern (Pkm) ermittelt: Straße 869,6 Mrd. Pkm; Schiene, Fern- und Regionalverkehr (FuRV) 82,5 Mrd. Pkm; Schiene, ÖPNV: 55,6 Mrd. Pkm; Luft 189,1 Mrd. Pkm.

4. Der Luftverkehr hat im Vergleich die niedrigsten spezifischen Subventionen. Die spezifischen Subventionen der Verkehrsträger sind - aufsteigend notiert - Luft: 2,7 EURO/(1000 Pkm); Straße: 3,8 EURO/(1000 Pkm); ÖPNV: 50,1 EURO/(1000 Pkm); Schiene FuRV: 86,0 EURO/(1000 Pkm). Zu Details siehe [7].
5. Die spezifischen Umweltkosten des Luftverkehrs sind niedrig. Die spezifischen Umweltkosten der Verkehrsträger ergeben sich zu - ebenfalls aufsteigend notiert - Schiene (FuRV + ÖPNV): 0,0065 EURO/(1000 Pkm); Luft: 0,0074 EURO/(1000 Pkm); Straße: 0,0156 EURO/(1000 Pkm). Zu Details siehe ebenfalls [7].
6. Die Lärmbelastung der Bevölkerung durch die einzelnen Verkehrsträger ist schlecht vergleichend quantifizierbar, auch wenn die Problematik an sich gut durchdrungen ist, siehe, zum Beispiel [9]. Man darf aber annehmen, dass die Lärmbelastung durch den Straßenverkehr und durch den Schienenverkehr in der Summe um ein Vielfaches größer ist als die durch den Luftverkehr. Diese wird durch die Ergebnisse der Lärmkartierung durch das Umweltbundesamt (UBA) - entsprechend der Umgebungs-lärm-Richtlinie der EU - bestätigt [10].

In diesem Zusammenhang ist eine Konditionierung weiter Bevölkerungskreise zu beobachten: das Geräusch etwa eines hochfliegenden Flugzeuges wird als viel störender empfunden als der Lärm des Straßen- oder Schienenverkehrs in der unmittelbaren Umgebung. Es darf aber nicht verkannt werden, dass der Lärm insbesondere startender Flugzeuge in Flughafennähe ein ganz großes Problem ist und entsprechend eine sehr große Herausforderung für den Flugzeugbau, für den Flughafenbetrieb und für das Luftverkehr-Management darstellt.

Das Transportsystem Flugzeug hat also in der Summe eine gute Bilanz im Vergleich zu jedem der anderen Transportsysteme. Von einer negativen Klimabilanz des Flugverkehrs zu sprechen, ist gelinde gesagt, eine Irreführung, selbst wenn man nur den spezifischen Primärenergieverbrauch, siehe oben, heranzieht. Die tatsächliche Klimabilanz muss nämlich die Infrastrukturkosten einbeziehen. Selbst wenn man die jeweilige Infrastruktur der Verkehrsträger Straße und Schiene, also das jeweilige Verkehrswegenetz als gegeben annimmt, muss zumindest die Klimabilanz des Unterhaltes dieser Netze mit betrachtet werden. Der Luftverkehr hat daher aufgrund seines geringen Flächenverbrauches, siehe oben, einen großen Vorteil. Eine Quantifizierung dieses Sachverhaltes ist dringend notwendig.

Schiene- und Straßenverkehr bekommen andererseits immer stärkere Akzeptanzprobleme. Der für sich sinnvolle Ansatz, Verkehr von der Straße auf die Schiene zu verlegen, stößt in der Bevölkerung zunehmend auf Widerstand, der allerdings von politischen Parteiungen jeglicher Couleur je nach Lage geschürt und ausgenutzt wird. Prominente Beispiele aus jüngerer Zeit sind der Widerstand gegen den Um/Neubau des Stuttgarter Hauptbahnhofes (Stuttgart 21) und gegen den Ausbau der Nord-Süd-Magistrale (Baden 21) in Offenburg. Der erforderliche Ausbau des Zulaufes zum Brennertunnel durch das Inntal wird im Bereich zwischen Rosenheim und Kufstein auf erheblichen Widerstand stoßen, der sich bereits jetzt formiert.

In einem Gebiet, Staat oder Kontinent mit einer Struktur gewachsener Transportsysteme hat das Flugzeug offensichtlich keine sehr großen neuen Potentiale, anders als in Ländern mit schwacher Verkehrsinfrastruktur. Hier ist selbst der Individualverkehr mit Kleinflugzeugen vorstellbar. Entsprechende Studien sind die der European Personal Air Transport System (EPATS) study group [11], [12], aber auch die NASA Studien zum Personal Air Transport (PATS) mit unter anderem dem senkrecht startenden und landenden Elektroflugzeug Puffin [13]. Die geringe deutsche Beteiligung bei der EPATS study group ist bezeichnend (2 Prozent Deutschland gegenüber 34 Prozent Polen und je 25 Prozent Frankreich und Die Niederlande).

Auf jeden Fall ist aber für Länder mit schwacher Verkehrsinfrastruktur der Gütertransport mit angepassten Transportflugzeugen eine sehr interessante Option, siehe das ECOLIFTER-Konzept [14] und potentiell ein Geschäftsfeld (s. unten Empfehlung 7.4). Dieses gilt selbst für Gebiete

mit einer Struktur gewachsener Transportsysteme. Mit einer relativ kleinen Flotte spezieller Flugzeuge könnte zum Beispiel ein beträchtlicher Teil des Gütertransports über die Alpen abgewickelt werden. Hier sollten keine Denkverbote bestehen. Der Brennertunnel mit seinen Zulaufstrecken, der Bürgerprotest auf allen Seiten und die langen Gestehungszeiten könnten vergessen werden. Gleiches gilt etwa für den Zubringerverkehr in Ballungsgebieten mit Senkrechtstartern - nicht Hub-schraubern - die mit wenig Flächenverbrauch, großer Flexibilität und vertretbarer Lärmemission betrieben werden können.

5 Zur Erinnerung: einige grundlegende Zusammenhänge

Richard von Mises schrieb 1926 in seiner Fluglehre, dass das Flugzeug seine "Weltform" erreicht habe, da ... die Entwicklung in den Grundzügen abgeschlossen ist, und das Flugzeug in seinem allgemeinen Aufbau und in der Mehrzahl seiner Konstruktionsteile allmählich endgültige Formen annimmt [15]. Man kann jetzt mit Fug von der "zweiten Weltform" des Transportflugzeuges sprechen [16], oder auch von der heutigen "Normalform". Sie kennzeichnet ein Transschall-Flugzeug mit rückwärts gepfeiltem dickem Flügel, Tiefdeckeranordnung (die Hochdeckeranordnung der Flügel findet man bei militärischen Transportflugzeugen und Bombern), Strahltriebwerken mit Axialverdichter in Triebwerksgondeln mit großer Vorlage unter dem Flügel, zylindrischem Rumpf und weit hinten liegendem Leitwerk. Seit geraumer Zeit gibt es Versuche, mit neuartigen, sogenannten "unkonventionellen" Zellenformen Anstöße für eine Weiterentwicklung des Flugzeuges zu geben. Bevor darauf eingegangen wird, sollen ganz kurz zwei grundlegende Betrachtungen durchgeführt werden. Sie betreffen einerseits Cayleys Entwurfparadigma und andererseits die Breguetsche Reichweitenformel.

Cayleys Entwurfparadigma

Cayleys Entwurfparadigma [17] strebt (erster Aspekt) nach einer möglichst eindeutigen Zuordnung von Funktionen und Subsystemen, zum Beispiel Auftrieb → Flügel, Vortrieb → Triebwerk, Längs- und Seitenstabilität → Höhen- und Seitenleitwerk, Nutzlast → Rumpf. Wenn dann die Subsysteme schwach und linear gekoppelt sind, kann jedes für sich weitgehend unabhängig von den anderen optimiert werden, und man optimiert damit gleichzeitig das gesamte System. Dieses Paradigma ist die wünschenswerte Grundlage für das Vorgehen bei der Flugzeugentwicklung, aber auch bei der Entwicklung eines jeden komplexen technischen Gerätes. Es wird allerdings seit Jahren mehr und mehr geschwächt, da in der modernen Flugzeugtechnik Kopplungen von Funktionen und Subsystemen immer stärker werden, was zu neuen Entwurfs-, Entwicklungs- und auch Betriebsproblemen führt, generell aber auch zur Notwendigkeit eines Nach-Cayleyschen Entwurfparadigmas führen kann, Unterabschnitt 8.4.

Der zweite Aspekt des Paradigmas ist die Differenzierung der an der Definition und Entwicklung des Flugzeuges beteiligten wissenschaftlich-technischen Disziplinen. Diese Differenzierung prägt die organisatorisch/institutionelle Gliederung von Luftfahrtforschung, -lehre und -industrie. Sie hat einerseits zu der heute üblichen sequentiellen und iterativen Vorgehensweise in den Entwurfsprozessen geführt. Andererseits ist sie einer der Gründe für die enorme Dynamik der technologischen Entwicklung des Flugzeugbaus. Wenn aber der erste Aspekt von Cayleys Paradigma geschwächt wird, steht diese Disziplinendifferenzierung einer mehr ganzheitlichen Vorgehensweise im Wege. Darauf wird später in Unterabschnitt 8.6 eingegangen.

Breguets Reichweitenformel

Die Reichweitenformel in ihrer einfachsten Form verknüpft die Reichweite R mit den Parametern Fluggeschwindigkeit v , aerodynamische Güte (Auftrieb/Widerstand) c_A/c_W , spezifischer Impuls I_{sp} , sowie den Strukturparametern Leermasse m_L , Nutzlastmasse m_N und Kraftstoffmasse m_K :

$$R = v \cdot \frac{c_A}{c_W} \cdot I_{sp} \cdot \ln \left(1 + \frac{m_K}{m_L + m_N} \right).$$

Diese Reichweitenformel zeigt, dass die einzelnen Parameter bei gleicher Zielreichweite R "getauscht" werden können. Bei einem Transschall-Flugzeug ist die maximal mögliche Geschwindigkeit natürlich durch die Widerstandsdivergenz nach Überschreiten der kritischen Machzahl begrenzt.

Das gilt sowohl für gepfeilte als auch für ungepfeilte Flügel, wobei die kritische Machzahl umso niedriger ist, je kleiner die Pfeilung, beziehungsweise je größer die relative Dicke des Flügels ist.

Wenn also eine unkonventionelle Konfiguration, etwa die sogenannte Boxwing-Konfiguration, eine aerodynamische Güte c_A/c_W deutlich kleiner als das einer konventionellen Konfiguration hat, muss das kompensiert werden entweder durch eine höhere Fluggeschwindigkeit v , eine entsprechend verbesserte Antriebswirksamkeit I_{sp} , oder eine entsprechend verringerte Leermasse m_L . Wenn aber die Kompensation nicht gegeben ist, ist die Konfiguration im Sinne der Reichweitenformel defizitär. Natürlich können andere Gründe diese Betrachtung modifizieren, etwa wenn besonderer Wert auf die Flugeigenschaften gelegt wird, oder wenn eine unkonventionelle Konfiguration zu einer besonders niedrigen Lärmemission führt.

Mit der Reichweitenformel lassen sich auch die Fortschritte zeigen, die im Flugzeugbau seit den 1970er Jahren erzielt wurden [1]. So konnte durch Verbesserungen des aerodynamischen Entwurfs die aerodynamische Güte des Flugzeuges vom Airbus-Typ, dargestellt durch $(M c_A/c_W)_{opt}$, um mehr als 30 Prozent erhöht werden (M ist die Flug-Machzahl). Die Entwicklungen der Nebenstrom-Triebwerke führten zur Reduktion des Treibstoffverbrauches um etwa die Hälfte. In der letzten Dekade haben sich die großen Fortschritte auf Zellenstrukturen aus Kohlefaserverbundwerkstoffen verlagert. Reduktionen der Leermasse um 25 bis 30 Prozent können damit erreicht werden und gleichzeitig für den Passagier eine Verbesserung des Kabinenklimas durch höheren Luftdruck und höhere Luftfeuchtigkeit.

Generell muss heute vermutet werden, dass die zweite Weltform des Transportflugzeuges die optimale Form darstellt, in Zukunft allerdings mit stärkerer Integration von Auftrieb und Antrieb. Argumente dafür sind, jeweils im Vergleich zu anderen möglichen Konfigurationen, wie Tandem-, Nurflügel-, Mehrflächen-, Box- oder Jointwing-Konfigurationen:

- Übersichtliche Konfiguration durch weitgehende Trennung der einzelnen Funktionen (entsprechend Cayleys Entwurfsparadigma), auch wenn Kopplungen (Interferenzen) immer stärker werden, zum Beispiel bei der Integration eines großen Fantriebwerkes mit dem Flügel.
- Durch die Trennung von Auftriebsfunktion (Flügel) und Nutzlastfunktion (Rumpf) relativ einfache Druckregulierung im Passagierbereich.
- Beste Nutzung des Flügels zur Auftriebserzeugung und zur Treibstoffunterbringung sowie wahrscheinlich beste erzielbare Flugeigenschaften.
- Einfache Aerodynamik gegenüber Mehrflächenflugzeugen, weil relativ schwache Interferenzen vorliegen. Das gilt dann nicht mehr, wenn aus Gründen weiterer Widerstandsverringering instabiler Flug angestrebt wird.
- Keine Beeinträchtigung von flugmechanischer Stabilität und Flugeigenschaften durch andere Auftriebsflächen, insbesondere bei asymmetrischen Flugzuständen.
- Kleine Nickmomente bei Auftriebsänderungen durch kleinsten Abstand von Schwerpunkt und Neutralpunkt des Gesamtflugzeuges gegenüber anderen Konfigurationen, mit Ausnahme von Nurflüglern.
- Größtmöglicher Höhen- und Seitenleitwerkshebel aller Konfigurationen und damit von vornherein große Stabilisierungs- und Kontrollflächenvolumen mit entsprechend kleinen Kräften und schädlichen Widerständen. Eine Folge sind einfache Auslegungskorrekturen bei reduzierter Längsstabilität wegen relativer Unempfindlichkeit gegenüber Veränderung der Leitwerksgröße.
- Leichtere Beherrschbarkeit des Bodeneffektes bei Start und Landung.
- Wahrscheinlich einfachste Fahrwerksauslegung gegenüber anderen Konfigurationen.
- Gutes Passagierhandling und gute Flughafenvträglichkeit (Passagierzugang, Notfall-Evakuierung, optimaler Zugang zu Flugzeugkomponenten zur Sichtkontrolle, Wartung, ...).

- Beste Zugänglichkeit zu den Triebwerken.

Spezielle Problemfelder bei "unkonventionellen" Konfigurationen sind:

- Druck- und Gewichtsprobleme bei nichtzylindrischen Rumpfformen.
- Auswirkungen von Flügelformen auf das Wurzelbiegemoment und auf den induzierten Widerstand.
- Unter Umständen problematische Implementierung von Hochauftriebsmitteln.
- Mögliche Begrenzung von Start- und Landeanstellwinkeln.
- Problematische Bodenbewegung, Start und Landung bei großen Fahrwerk-Radabständen.
- Problematische Böenabminderung bei großen Flügeltiefen, kleiner Flächenbelastung, Boxwing-Konfigurationen.
- Passagierverhalten bei ausschließlich künstlicher Sicht auf die Außenwelt.
- "Passagierhandling" am Boden und in Notfällen.

Mit dieser Betrachtung soll nicht ausgeschlossen werden, dass neue Konfigurationen möglich sind, wobei zwischen Kurzstrecken-, Mittelstrecken- und Langstreckenflugzeugen unterschieden werden muss. Nach neuen Konfigurationen sollte aktiv gesucht werden. Die Betrachtung ergibt aber, dass jede "unkonventionelle" Konfiguration, die vorgeschlagen wird, sich mindestens den Folgerungen aus Cayleys Entwurfsparadigma und Breguets Reichweitenformel stellen muss, aber auch den obigen Argumenten und Problemen. Das gilt, wenn auch mit Modifikationen, ebenso für andere Flugzeugtypen als das Transschall-Flugzeug, das hier im Mittelpunkt steht.

6 Der Hintergrund der fachlichen Empfehlungen

Die fachlichen Empfehlungen, die in Abschnitt 7 gegeben werden, beziehen sich auf die Ökonomie und Ökologieaspekte der Luftfahrt (Unterabschnitt 6.1), wobei mögliche künftige Flugbereiche (Unterabschnitt 6.2) und neue Ansätze, Technologien und Fluggeräte (Unterabschnitt 6.3), zu betrachten sind.

6.1 Ökonomie- und Ökologieaspekte der Luftfahrt

Die ökonomische und ökologische Gestaltung der Luftfahrt sieht sich zum Teil alten aber verstärkten, und zum Teil ganz neuen Forderungen gegenüber. Der Nachhaltigkeitsaspekt, das heißt, die Schonung und Erhaltung der Ressourcen, wird zunehmend wichtiger. In Zukunft bekommen die folgenden Punkte ein immer stärkeres Gewicht (s. auch [18] - [20]), wobei die Versorgungssicherheit bei gleichzeitiger Klimaverträglichkeit eine entscheidende Rolle spielt:

- Verminderung des Verbrauchs von
 - fossilen Energieträgern,
 - Materialien (Al, Ti, Li, C, ...).
- Reduktion von
 - Abgasemissionen (CO_2 , NO_x , H_2O),
 - Lärmemissionen (Start, Flugkorridor, Landung),
 - Betriebsflächen (Flugplätze, Infrastruktur).

6.2 Die betrachteten Flugbereiche

Die in Abschnitt 7 gegebenen fachlichen Empfehlungen betreffen nicht nur das zivile Transschall-Flugzeug. Im Hintergrund sind vier "Flugbereiche" und eine Reihe von neuen Ansätzen und Technologien, die zum Teil schon länger in Diskussion beziehungsweise in Arbeit sind, die aber bisher keine allgemeine Anwendung gefunden haben. Eine direkte Zuordnung wird nur zum Teil vorgenommen.

Die Flugbereiche sind:

- Flug bei unterkritischen Machzahlen, das heißt, bei Geschwindigkeiten, bei denen in der Aerodynamik Kompressibilitätseffekte keine große Rolle spielen. Wesentliches Merkmal des Flugzeuges sei eine so geringe Flügelpfeilung, dass natürliche (passive) Laminarhaltung, [21], der Flügelströmung in Teilen oder im Ganzen möglich ist. Solche Konfigurationen können künftig infrage kommen, wenn die ökologischen Zwänge so groß werden, dass zugunsten eines drastisch gesenkten Treibstoffverbrauchs auf eine hohe Fluggeschwindigkeit und damit auf Transportleistung verzichtet wird. Das jedoch setzt voraus, dass keine Kompensation durch größere Flugzeugflotten und/oder höhere Flugfrequenzen erfolgt.
- Flug bei solchen überkritischen Machzahlen, die eine Flügelpfeilung erforderlich machen, die der heutiger Transschall-Flugzeuge entspricht (Status quo). Hier kann künftigen größeren ökologischen und ökonomischen Zwängen mit einer ganzen Reihe von Innovationen begegnet werden. Ein sehr interessanter Ansatz in dieser Hinsicht wird in der Studie „Klimaverträgliches Lufttransportsystem (CATS)“ des DLR verfolgt. Die interdisziplinäre Betrachtung situationsbedingter Anpassung von Fluggeschwindigkeit und -höhe ergibt ökologische Vorteile, allerdings auch ökonomische Auswirkungen für den Fluggerätebetreiber und die Passagiere.
- Überschall- und Hyperschallflug, die zwar aus ökologischen Gründen fraglich sind, aber für spezielle Raumfahrt- und/oder militärische Missionen interessant sein können.
- Flug mit Kurz- und Senkrechtstart und -landung. Die Fluggeräte dieses Bereiches sind der klassische Hubschrauber aber auch der Kurz- oder Senkrechtstarter, wie er etwa in Deutschland in den 1960er Jahren für einen möglichen VTOL-Luftverkehr vorgeschlagen wurde [22].

6.3 Neue Ansätze, Technologien und Fluggeräte

Neue Ansätze, Technologien und Fluggeräte im Hintergrund sind zum Beispiel:

- Aktive Nutzung der Flexibilität des Flugzeuges mit extrem leichten und flexiblen Strukturen, die im wesentlichen den Flügel betreffen. Dieses geht hinaus über das klassische "aeroelastic tailoring" und die Aeroservoelastik [23], beinhaltet aber diese beiden Aspekte.
- Instabile Flugzeug-Auslegung mit künstlicher Längsstabilität zur Widerstandsverringernung.
- Passive und aktive Grenzschichtbeeinflussung zur Widerstandsverringernung.
- Alternative Kraftstoffe: Wasserstoff, Methan, Methanol, Kraftstoffkombinationen.
- Große Zellenvolumina in Hinsicht auf alternative Kraftstoffe.
- Neue Antriebsformen: Mehrkreistriebwerke, elektrische und hybrid-elektrische Triebwerke, [24], fortschrittliche Dieselmotoren.
- Kopplung von Auftriebs- und Antriebsfunktion. Diese Frage wurde bereits in den 1960er Jahren in [25] (Kapitel K II: Ineinandergreifen von Widerstands- und Antriebsmechanismus) und [26] diskutiert.

- Fluggeräte für Kurz-/Ultrakurz-/Senkrechtstart und -landung.
- „Motorsegler“-Konfigurationen.
- Unbemannte Systeme (wahrscheinlich nur für den Frachttransport).
- Großflugzeuge, auch als Seeflugzeuge (zu Seeflugzeugen läuft – in Hinsicht auf die ACARE Vision 2020 – die EU-Studie “Future Sea Plane Traffic, FUSETRA” [27]) oder Bodeneffektgeräte.
- Luftschiffe.
- „Unkonventionelle“ Konfigurationen: vorwärts gepfeilter Flügel (mit dem sehr interessanten Potential natürlicher Laminarhaltung [28]), blended wing/body, veränderliche Geometrien.

Heute noch spekulative Entwicklungen wie sie sich durch Quantenrechner ergeben könnten, virtueller Flug, Nanotechnologien, low-energy nuclear reactions usw., s. zum Beispiel [29], werden in den fachlichen Empfehlungen nicht berücksichtigt.

7 Fachliche Empfehlungen

Die fachlichen Empfehlungen spiegeln individuelle Sichten der ASM-Mitglieder wider, sind letztlich aber Ergebnisse kollektiver Erörterungen. Die Einzelthemen beziehen sich auf das Gesamtsystem Flugzeug, aber auch auf die Definitions- und Entwicklungsprozesse sowie die beteiligten wissenschaftlich-technischen Disziplinen. Anspruch auf Vollständigkeit wird nicht erhoben. Einige der Themen mögen bereits umgesetzt worden sein, beziehungsweise befinden sich in der Umsetzung oder in der Vorbereitung dazu. Auch Forschungs- und Entwicklungsthemen, die früher bearbeitet wurden, aber keinen Eingang in die industrielle Anwendung gefunden haben, werden aufgeführt. Zum sehr wichtigen Thema des Antriebes, sowie zu anderen wichtigen Themen, konnten aus personellen Gründen keine Empfehlungen gegeben werden.

Die Empfehlungen geben ganz kurz den Gegenstand, den Innovationsbedarf und skizzieren entsprechende Lösungsgedanken.

7.1 Innovationsbedarf in Hinsicht auf die möglichen Entwicklung der zivilen Luftfahrt

- Gegenstand

Die jetzigen Verkehrsflugzeuge sind hinsichtlich Gestalt, Antrieb, Flieg- und Steuerbarkeit, Avionik und so weiter, sowie hinsichtlich der industriellen Definitions- und Entwicklungsprozesse, das Ergebnis einer Entwicklung, die überwiegend nach 1945 begann. Es ist denkbar, dass diese Entwicklung allmählich in eine Sättigung führt. Ökonomische und ökologische Zwänge mögen jedoch zu neuen, unter Umständen auch radikal anderen Lösungen führen, Abschnitt 6. Im Hintergrund sind jedoch immer die grundsätzlichen Zusammenhänge und Problembereiche zu sehen, die in Abschnitt 5 skizziert wurden.

Die ökonomischen und ökologischen Zwänge betreffen allerdings nicht nur das Flugzeug als solches, sondern auch die Infrastruktur der zivilen Luftfahrt, nämlich Flughäfen einschließlich ihrer Anbindung an andere Verkehrssysteme und die generelle Luftraumnutzung, s. zum Beispiel [30]. Besonders groß sind in dieser Hinsicht die Anforderungen und Probleme in Ländern mit hochverdichteten Siedlungsstrukturen, gewachsener effektiver Verkehrsinfrastruktur und einer Bevölkerung, die zwar den Luftverkehr in allen Aspekten (Tourismus, Geschäftsreisen, Güter- und Lebensmitteltransport) in Anspruch nimmt, sich aber vehement gegen zusätzliche infrastrukturelle Folgen des Luftverkehrs wehrt.

Die weitere Entwicklung der zivilen Luftfahrt wird aber nicht nur von den ökonomischen und ökologischen Zwängen abhängen, sondern auch von der Entwicklung der Weltwirtschaft, der globalen Energiesituation und politischen Gegebenheiten.

Welchen Einfluss diese Faktoren auf die weitere Entwicklung des zivilen Flugzeuges haben werden,

ist kaum vorhersehbar. Die heutige ausgereifte Konfiguration des zivilen Flugzeugs, die zweite Weltform, hat hinsichtlich Transportleistung, Wirtschaftlichkeit und Betrieb ein hohes Niveau erreicht. Verbesserungen sind grundsätzlich möglich, aber auch erforderlich, insbesondere in Hinsicht auf die zu verbessernde Nachhaltigkeit der Luftfahrt.

- Innovationsbedarf

Innovationen wären zum Beispiel die künstliche Längsstabilität zur Minimierung oder zum völligen Wegfall des Trimmwiderstandes, die Reduktion des Reibungswiderstandes durch Grenzschichtbeeinflussung, neue Werkstoff- und Strukturkonzepte, neuartige Fertigungsmethoden im Bereich der Faserverbundbauweise, neue Antriebskonzepte und Flugführungskonzepte, unkonventionelle Konfigurationen und schließlich radikal neue Produktdefinitions- und Entwicklungsprozesse und Prozesstechnologien. Zu einigen dieser Punkten sind Demonstratoren vorzusehen. Innovativ wären aber auch Konzepte wie sehr große Transportflugzeuge, selbst sehr große Seeflugzeuge und V/STOL-Flugzeuge für den Zubringerverkehr. Diese Konzepte sind im Zusammenhang mit der individuellen Verkehrssituation von Staaten oder Regionen zu sehen, Abschnitt 4.

- Lösungsgedanken

Lösungsgedanken werden hier nicht erörtert. Sie sind bei den folgenden Empfehlungen zu finden.

7.2 Deutsche Systemfähigkeit im Flugzeugbau

- Gegenstand

In den Abschnitten 2 und 3 wurden Bemerkungen zum Stellenwert der Luftfahrtindustrie in Deutschland und der deutschen Luftfahrtbranche in der internationalen Konkurrenzsituation gemacht. Dabei stand der Großflugzeugbau im Vordergrund, der in Deutschland sehr erfolgreiche Klein- und Sportflugzeugbau wurde außer Acht gelassen. Das gilt auch für die folgenden Überlegungen.

Falls bei Cassidian Air-Systems die Entwicklungsfähigkeiten aufgegeben werden, ist festzustellen, dass Deutschland keine Systemfähigkeit im Großflugzeugbau mehr besitzt. Unter Systemfähigkeit sei die Definitions- und die Entwicklungsfähigkeit verstanden. Man kann natürlich sagen, dass die Systemfähigkeit auch nicht unbedingt erforderlich sei. Es sollte aber nicht im Interesse Deutschlands sein, Produktdefinition und -entwicklung zugunsten europäischer Kooperation aufzugeben. Innovationsleistungen sind zwar auch in einer solchen Kooperation möglich, der Anreiz wird aber durch das Gesamtsystem erzeugt. In diesem Zusammenhang sei noch einmal auf den militärischen Flugzeugbau verwiesen, wo Innovation eine noch höhere und weiter gefasste Bedeutung hat.

In Hinsicht auf die weitgehend aufgegebenene Systemfähigkeit kann man Stimmen hören, die fragen, warum dann noch Luftfahrtforschung und -lehre in Deutschland? Das Geld kann man für andere Dinge ausgeben. Bei der Befindlichkeit weiter Kreise der deutschen Gesellschaft und Politik hinsichtlich der Luftfahrt sind solche Äußerungen gefährlich.

Die ASM sind der Ansicht, dass alles getan werden sollte, um die Großflugzeug-Systemfähigkeit wieder herzustellen, weil diese für die deutsche Volkswirtschaft technologische und industrielle Herausforderungen ergeben wird, die nicht unterschätzt werden sollten.

Systemfähigkeit sollte aber auch vorhanden sein in Hinsicht auf Überschall- und Hyperschall-Fluggeräte. Das gilt nicht nur für den militärischen Flugzeugbau, s. Abschnitt 2, sondern auch für zukünftige Raumtransportsysteme. Im deutschen Hyperschall-Technologieprogramm von Mitte der 1980er bis Mitte der 1990er Jahre wurde das zweistufige voll wiederverwendbare Raumtransportsystem SÄNGER II untersucht [31]. Zugrunde lag der langfristige geo-strategische Ansatz, von Europa in den Weltraum zu gelangen, ohne das politische Risiko für den Start von anderen Erdteilen zu tragen. Solche langfristig strategische Denkansätze sind heute in Deutschland und Europa kaum noch zu finden. Die ASM bezweifeln, dass wir uns das auf lange Sicht leisten können.

- Lösungsgedanken

In Anbetracht des erfreulich großen Auftragsbestandes von Airbus ist davon auszugehen, dass die Entwicklungskapazitäten in Toulouse für lange Zeit großenteils gebunden sind. Dieses wäre eine Gelegenheit, in Deutschland, in Bremen oder in Hamburg, die Definition und die Entwicklung etwa eines A320-Nachfolgers durchzuführen. Dabei können die hier im folgenden gegebenen Empfehlungen, die vor allem die künftigen Ökonomie- und Ökologiezwänge im Blick haben, eine Leitlinie sein. So wäre etwa die Einführung der vorgeschlagenen neuen Definitions- und Entwicklungsmethodik, Empfehlung 7.6, mit Aspekten des Virtuellen Produktes, Empfehlung 7.7, eine große und inspirierende Herausforderung.

Die Definitions- und Entwicklungstätigkeiten, die mit der vorgeschlagenen neuen Definitions- und Entwicklungsmethodik erfolgen sollten, wären mit Forschungstätigkeiten beim DLR, den Hochschulen, beim Bauhaus Luftfahrt, aber natürlich auch bei Innovations Work zu unterstützen. Auch die Luftfahrtforschungsprogramme könnten einen neuen Fokus finden.

Allerdings darf die vorgeschlagene deutsche Entwicklungsorganisation auf keinen Fall die alten Paradigmen, Vorgehensweisen und Strukturen übernehmen, dazu Abschnitt 8 "Allgemeine Empfehlungen zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit". Die alten, zwar bewährten aber doch in Anbetracht der künftigen Herausforderungen infrage zu stellenden Pfade müssen verlassen werden zugunsten neuer zukunftsfähiger. Natürlich ist dieses mit Risiken verbunden, aber auf lange Sicht ist das sowieso erforderlich.

Für Airbus/EADS hätte das vier positive Effekte. Einmal würde Deutschland wirtschaftspolitisch positiv bedacht werden, zum anderen würde eine interne Konkurrenz installiert, die, gut platziert, sehr innovationsfördernd sein könnte und zum dritten würde ein Element langfristiger Zukunftssicherung geschaffen.

Der vierte positive Effekt bestünde darin, dass ein Anreiz für die sehr guten deutschen Nachwuchs-Ingenieure gegeben wird, in die Branche zu kommen und dort zu bleiben. Vielfach ist heute nämlich zu beobachten, dass das Abwandern der Definitions- und Entwicklungstätigkeiten aus Deutschland diesen Anreiz eben nicht gibt.

Hinsichtlich der Über- und Hyperschalltechnologien sollten Wege gefunden werden, die Entwurfsmöglichkeiten von Cassidian Air-Systems zu erhalten und überdies technologische Keimzellen für Hyperschall-Fluggeräte in der Forschung und in der Industrie zu schaffen, die in entsprechende europäische Netzwerke einzubinden wären. In Bezug auf diese Technologien sollten aber nicht nur Vorentwurfsstudien gemacht werden, sondern es müssen die technologischen Schlüsselprobleme in Angriff genommen werden [32].

7.3 Allgemeine Entwurfsanforderungen

- Gegenstand

Neben die bisher überwiegend dominierenden Wirtschaftlichkeitsaspekte des Flugzeuges (direkte Operationskosten, Lebenszykluskosten) werden zunehmend gleichwertige Nachhaltigkeitsforderungen treten müssen. Die Nachhaltigkeitsaspekte üben in vielen Teilbereichen des Entwurfs Einflüsse in unterschiedlicher Weise und Stärke aus, wofür bisher keine genügende Systematik besteht. Diese Einflüsse sind zu analysieren und zu quantifizieren sowie in einer entsprechenden Entwurfssystematik abzubilden.

- Innovationsbedarf

Im Entwurfsprozess müssen die ökonomischen und die ökologischen Aspekte gekoppelt berücksichtigt werden. Geeignete technische Maßnahmen, wie zum Beispiel Grenzschichtbeeinflussung, künstliche Stabilität der Längsbewegung, neue Werkstoffe und Bauweisen, unkonventionelle Antriebs- und Antriebsintegrationskonzepte sind zu bewerten. Entsprechende Bewertungskriterien sind zu definieren und gegenseitig abzuwägen. Ihre "Spuren" müssen durch die Fachdisziplinen und den Gesamtentwurf stets verfolgbar sein.

- Lösungsgedanken

Im Hinblick auf die Ökologie des gesamten Entwurfes sind "Wirkungsgrade" zu entwickeln. Diese

Wirkungsgrade müssen in mathematischer Form bereitgestellt werden. Spezifische Zielgrößen und -funktionen, die zum optimalen Gesamtentwurf führen, sind zu definieren, wobei rationale Optimierungsprozesse eine große Rolle spielen werden. Generell muss mehr Wissen schon zu Beginn des Entwurfs erzeugt werden, das heißt, dass ein höherer Durchdringungsgrad mit mehr Produktwissen zu einem früheren Zeitpunkt als jetzt üblich ("front loading") erforderlich ist, Empfehlung 7.6. Die wohl wirkungsvollste Maßnahme dazu ist die Einführung des "Virtuellen Produktes", welches ein wesentliches Element des seit Jahren diskutierten, aber generell nicht realisierten "concurrent engineering" sein wird, Empfehlung 7.7.

7.4 Entwurfsanforderungen von Großflugzeugen

- Gegenstand

Es handelt sich um besonders große Transportflugzeuge mit etwa 250 Tonnen Frachtkapazität zur Bedienung von Relationen mit hohem Frachtaufkommen. Sie sind nicht von Passagierversionen abgeleitet. Vorzugsweise werden Standardcontainer eingesetzt. Das bietet die Gelegenheit, besonders effektive Lade/Entladekonzepte zu entwickeln. Wenn aufgelassene Militär-Flugplätze genutzt werden können, muss nicht auf die 80 m x 80 m Box von Zivilplätzen Rücksicht genommen werden. Die Reisegeschwindigkeit soll dem üblichen Standard von $M = 0,8$ bis $M = 0,85$ entsprechen, damit die Flugsicherung optimale Slots vergeben kann.

- Innovationsbedarf

Zur kurzen Umschlagzeit sind neue Belade/Entladekonzepte vonnöten, um die Start/Landekapazität der Flugplätze maximal zu nutzen. Zu diesem Zweck gehört auch eine spezifische Rumpfgestaltung, welche sowohl in der Geometrie als auch in der gegebenenfalls notwendigen Druckbelüftung neue Wege geht. Zur Vermeidung von Nachtflugverboten sind besondere Überlegungen zur geräuschmindernden Anordnung der Triebwerke vonnöten.

- Lösungsgedanken

Ein Rumpf, der eher breit als hoch ausgelegt ist - sogenanntes Wärmflaschenprofil - eignet sich optimal zur simultanen Beschickung aller Ladepositionen. Dazu sind auf beiden Längsseiten Öffnungen vorgesehen, durch die jeweils ein Standardcontainer von zirka 6 m Länge eingefahren werden kann. Das erfordert Rumpfbreiten von zirka 15 m! Je nach Fracht werden die Container einfach in den Rumpf verbracht oder, falls Druckbelüftung/Klimatisierung erforderlich ist, in eigene Druckröhren, die von Fall zu Fall verwendet werden. Die Container werden direkt vom vorgefahrenen Lkw auf gleicher Ebene in das Rumpfabteil geschoben. So sind ladeseitig keine zusätzlichen Vorrichtungen erforderlich. Zur Lärminderung werden die Triebwerke oben zwischen einem doppelten Seitenleitwerk im Heck angebracht. Spezielle Beugungsgitter vor Einlauf und im Austritt lenken den Schall überwiegend nach oben ab.

7.5 Entwurfsanforderungen von Senkrechtstartern

- Gegenstand

Es handelt sich hier um Starrflügler mit VTOL-Fähigkeit, nicht um den meistverbreiteten Senkrechtstarter, den Hubschrauber. Das Spektrum reicht vom 2-Sitzer für Polizeiaufgaben bis zum Feederliner mit Reichweiten um die 1.000 km. Dieses Fluggerät arbeitet auch von kleinsten Flächen ohne Startbahn (RIA: Runway Independent Aircraft), vorzugsweise im Bereich von Städten der Größenordnung von 50.000 Einwohnern und als Zubringer oder Geschäftsreiseflugzeug.

- Innovationsbedarf

Es fehlt generell an VTOL-Passagierflugzeugen mit hoher Reisegeschwindigkeit, die mit dem Standard-Slot-System der Flugsicherung kompatibel sind. Offene Rotoren oder Propeller sowie schwenkbare Elemente sollten aus Sicherheitsgründen und Gründen der Passagierakzeptanz nicht zur Anwendung kommen. Der Geräuschminderung kommt höchste Priorität zu. Lange Schwebzeiten sind bei den ausschließlich zivilen Anwendungen nicht vorzusehen. Für die Starttransition sind 15 s, für die Landetransition maximal 90 s zu erlauben.

- Lösungsgedanken

Für kleinere Einheiten bieten moderne aufgeladene Kolbenmotoren Vorteile hinsichtlich Geräusch,

Verbrauch, schneller Regelung und geringerer Kosten gegenüber Gasturbinen. Die Entwicklung spezieller Hubtriebwerke ist nicht sinnvoll, da nur zusätzlicher Aufwand und Kosten entstehen. Bei größeren Einheiten liefert die Verwendung mehrerer in Schwerpunktnähe gelegener Gasturbinen die gebotene Redundanz. Der Hubtrieb erfolgt mittels Impellern, die über Fernwellen oder gar elektrisch angetrieben werden. Der kalte Luftstrom vermeidet das Problem der Ansaugung heißer Abgase in die Turbineneinläufe durch die unvermeidbare Rezirkulation. Spezielle Rundumsichtssensoren sichern in der Transitions- und Schwebephase vor Kollisionen mit Objekten in der Umgebung.

Dedizierte Start/Landeplätze (VTOL-Zentren) nach Art der Monopteros-Tempelbauweise von zirka 200 m Durchmesser und 100 m Höhe bilden eine komplette Infrastruktur für den VTOL-Betrieb für Flugzeuge bis zu 100 Sitzen. In den zirka 30 Etagen können alle Dienste untergebracht werden:

- Die Start/Landefläche ganz oben.
- Darunter die überdachten Anlegestellen für die Flugzeuge, welche nach Art der Flugzeugträger via Lift dorthin bewegt werden.
- Darunter die Abfertigungsräume und die Gepäckanlage.
- Darunter folgen Wartungsräume, Büros, Klinikum, Restaurants, Hotelbetriebe und schließlich Einkaufsplazas und Auto-Parkdecks.

Alle diese unteren Etagen sind in der Peripherie zwischen den Säulen des Monopteros untergebracht. Im Inneren befinden sich die Etagen des Parkhauses. Diese VTOL-Zentren lassen sich ohne großen Flächenbedarf voll in Großflughäfen integrieren. Die Zufahrt der Passagiere erfolgt durch Unterführungen von außerhalb des umfriedeten Geländes, sowohl auf der Straße als auch auf der Schiene.

7.6 Definitions- und Entwicklungsmethodik

- Gegenstand

Die heute übliche, allerdings in vielen Varianten existierende Vorgehensweise bei der Produktdefinition ist gekennzeichnet durch eine in den frühen Definitionsphasen (Konzeptphase, Vorentwurf) relativ unvollständige Beschreibung der physikalischen Eigenschaften und der Funktionen des Fluggerätes, was eingeschränktes Produktwissen bedeutet. Die ungenügende Durchdringung wird hingenommen, obwohl Übereinstimmung darüber besteht, dass in den frühen Definitionsphasen die späteren Betriebs- und Lebenszykluskosten zu einem großen Teil festgelegt werden. Wichtige Aussagen etwa zu den statischen und dynamischen Eigenschaften der Zelle werden sogar erst sehr spät im Entwicklungsprozess erzielt – nachdem erstmals eine Zelle assembliert wurde. In extremen Fällen – je nach Größe der Schritte, die bei Einführung neuer Technologien gemacht werden – wird die beschreibende Datenbasis des Fluggerätes, die das Produktwissen darstellt, schließlich erst nach entsprechend umfangreicher Flugerprobung (Systemidentifikation) die erforderliche Tiefe und Genauigkeit erhalten.

Eine ungenügende Durchdringung bei der Produktdefinition führt zu Risiken. Diese sind in der Regel Mehrkosten bei der Produktentwicklung, insbesondere wenn in deren späten Phasen - oder erst während der Flugerprobung - die Notwendigkeit sogenannter Reparaturlösungen offenbar wird. Die Mehrkosten werden üblicherweise durch Rückstellungen aufgefangen, eine mögliche Nichterfüllung der Garantieleistungen durch Kompensation des Kunden. Die Mehrkosten können allerdings so hoch werden, dass ein Projekt in späten Phasen, sogar während der Flugerprobung, aufgegeben werden muss und/oder dass das Unternehmen generell in eine ernste finanzielle Schieflage gerät. Dafür gibt es drastische Beispiele in der Vergangenheit.

Kritisch ist angesichts dieses Szenariums zu sehen, dass in der Regel keine systematischen Nachbetrachtungen der Definitions- und Entwicklungsprozesse gemacht werden, s. Unterabschnitt 8.2. Diese wären nicht nur erforderlich, wenn große Probleme aufgetreten sind, sondern generell wünschenswert.

In Zukunft werden die bisherigen Verflechtungen Mission \rightarrow Konfiguration \leftrightarrow Entwurf die zusätzliche Zielfunktion Ökologie erhalten. Ökonomie und Ökologie des Produktes können prinzipiell in Einklang gebracht werden. Grundvoraussetzung ist die Definition der ökologischen Standards oder Wirkungsgrade, Empfehlung 7.3. Unbedingt erforderlich erscheint aber auch eine Änderung der bisherigen Vorgehensweise bei der Produktdefinition, die die genannten Probleme und Risiken verringert oder sogar ganz vermeidet.

- Innovationsbedarf

Wenn starke ökonomische und ökologische Zwänge größere Technologieschritte - s. Empfehlung 7.1, Innovationsbedarf – erforderlich machen, müssen Auswirkungen von Widersprüchlichkeiten frühzeitig identifiziert und quantifiziert werden. Im Hinblick auf ökologische Aspekte fehlt die für die frühen Definitionsphasen erforderliche statistische Datenbasis. Deshalb müssen für den Vorentwurf zwingend innovative Vorgehensweisen entwickelt werden.

- Lösungsgedanken

Drei Lösungsschwerpunkte werden gesehen:

Schwerpunkt A) Einführung neuer, auf Informationstechnologien gestützter Vorgehensweisen bei der Produktdefinition und dort bereits in der Vorentwurfsphase, um den erforderlichen höheren Durchdringungsgrad zu einem früheren Zeitpunkt – das gewünschte "front loading" – zu erzielen:

- Einsatz graphen-basierter Entwurfsmethoden (Graph-Based Design Methods, GBDM) in den Definitionsphasen als rechnergestützte Prozesse mit automatischer Dokumentation der Schritte und Lösungen, einschließlich des Verwerfens von möglichen Lösungen, wie sie etwa in [33], [34] beschrieben sind.
- Anwendung phasen-adäquater (Konzept-, Vorentwurfs-, Entwurfs- usw. Phasen) numerischer Simulations- und Optimierungsverfahren (Virtuelles Produkt, Empfehlung 7.7), um frühzeitig eine genauere mathematische Beschreibung der physikalischen Eigenschaften und Funktionen des Produktes zu erzielen. Die so entstehende Datenbasis des Produktwissens, die sukzessive genauer und verlässlicher wird, führt zu einer Verbesserung der Ergebnisse aller erforderlichen Systemsimulationen und Leistungsidentifikationen, erlaubt realistischere Demonstrationen für den oder die Kunden und ermöglicht frühes Einweisen von Piloten und Wartungspersonal.

Schwerpunkt B) Frühzeitige Betrachtung von Konfigurationsalternativen wie zum Beispiel Wing-Body-Blending und andere Alternativen.

Schwerpunkt C) Betrachtung von Missionsalternativen, zum Beispiel Luftbetankung, Zwischenlandungen und so weiter.

7.7 Virtuelles Produkt, multidisziplinäre Simulation und Optimierung

- Gegenstand

Dem durchgehend erforderlichen höheren Durchdringungsgrad in den frühen Produktdefinitionsphasen, Empfehlung 7.6, stehen im wesentlichen, wenn auch in unterschiedlichen Ausformungen bei den Firmen, drei Problemkreise entgegen:

- Die Produktdefinition im Flugzeugbau folgt im Prinzip immer noch dem ersten Aspekt des Cayleyschen Entwurfparadigmas, Abschnitt 5. Die Ausdifferenzierung der Disziplinen (zweiter Aspekt) wird durch Kostenstellen- und Leitungsstrukturen der Unternehmen eher noch verstärkt, s. dazu die Abschnitte 8.6 und 8.7.
- In den entscheidenden Anfangsphasen eines Projektes ist meistens der Zeit- und Kosten-druck so hoch, dass grundlegende Festlegungen oft freihändig getroffen werden und später auch nicht mehr in Frage gestellt werden. Eine Dokumentation der Gründe für die Festlegungen erfolgt nicht, vielfach auch, weil es sich um das Herrschaftswissen einzelner Personen handelt.
- Die Aufgabe einer Projektleitung, über die Fachdisziplinen hinweg eine Gesamtoptimierung des Produktes zu erreichen, wird in der Regel dadurch erschwert, dass keine disziplinenübergreifenden Strukturen und nur eingeschränkte Einflussmöglichkeiten bestehen.

Diese Empfehlung betrifft die Gestaltung der phasen-adäquaten numerischen Simulations- und Optimierungsverfahren, des "Virtuellen Produktes", s. dazu Empfehlung 7.6, die geeignet sind, im weitesten Sinne den ersten und den dritten der angesprochenen Problemkreise zu überwinden.

- Innovationsbedarf

Um die angesprochenen Probleme zu mindern oder ganz zu eliminieren, erscheinen die folgenden Maßnahmen als geeignet:

- Entwicklung eines Nach-Cayleyschen Entwurfparadigmas, dazu s. Unterabschnitt 8.4.
- Ersetzung der disziplin-orientierten, iterativen Produktdefinition und -entwicklung durch ganzheitliche, schwach-iterative Vorgehensweisen, dazu s. Unterabschnitt 8.6.
- Entwicklung des Virtuellen Produktes (VP) als hochgenaue mathematisch/numerische Repräsentation der physikalischen Eigenschaften und der Funktionen des Produktes, hier des Flugzeuges. Kern des VP sind numerische multidisziplinäre Simulations- und Optimierungsverfahren (MDSO-Verfahren [35]) mit adäquaten strömungsphysikalischen (s. Empfehlung 7.8) und strukturphysikalischen (s. Empfehlung 7.9 und 7.10) Modellen.

- Lösungsgedanken

Die Lösungsgedanken beziehen sich hier nur auf das Virtuelle Produkt als fortschrittlichste IT-gestützte Prozesstechnologie. Das Perspektivproblem ist "Die numerische Simulation des elastischen freifliegenden und manövrierenden Fluggerätes einschließlich des Antriebes in stationären und instationären Betriebszuständen", wie es bereits Mitte der 1990er Jahre in einer Denkschrift formuliert wurde [36].

Das Produktwissen hat in den frühen Definitionsphasen noch einen kleinen Umfang, nimmt dann aber stetig zu, wobei das Ziel ist, gegenüber der jetzigen Vorgehensweise schneller zu einem höheren Durchdringungsgrad zu kommen [35]. Das bedeutet, dass die Definitions- und Entwicklungsphasen-adäquaten Modellbildungen von anfänglich einfachen Produktmodellen, etwa mit Ersatzmodellen für die elastische Struktur, zu schließlich sehr umfangreichen Produktmodellen führen müssen. Letztere schlagen dann den Bogen über die gesamte Flugkontrollkette vom Luftdatensystem bis zu den Aktuatoren der aerodynamischen Kontrollflächen unter Einschluss der gegebenenfalls nichtlinearen Aerodynamik, der real-elastischen Zelle und des geregelten Antriebes.

Folgende Schritte sind erforderlich, um das VP in diesem Sinne zu erzielen (diese Schritte beziehen sich nur auf die fachliche Seite des Problems. Zu den übergeordneten Struktur- und Organisationsproblemen der Branche s. Abschnitt 8.):

- Je nach Projekt Identifikation der Leitkonfiguration, s. Unterabschnitte 6.2 und 6.3, und der phasenadäquaten Produktmodelle sowie der erforderlichen Ersatz- und Subsystemmodelle.
- Festlegung der relevanten Simulationspunkte aus der Flugenvelope.
- Identifikation der Disziplinen-Wechselwirkungen und der jeweiligen disziplinären numerischen Codes.
- Definition von Kopplungsstrategien für die erforderlichen multidisziplinären Verfahren.
- Schaffung gemeinsamer Plattformen für die Randbedingungen und den Datentransfer.
- Identifikation der Anforderungen an multidisziplinäre Optimierungsstrategien und -algorithmen.
- Entwicklung und Weiterentwicklung der MDSO-Verfahren.

Diese Schritte sind mit allen beteiligten Bereichen und Personen einschließlich der aus der Forschung, mit dem dort zum Teil bereits hervorragenden Forschungsstand, zu unternehmen. Nachweisfragen und Zulassungsprozeduren müssen von Anfang an voll berücksichtigt werden.

7.8 Aerodynamik

- Gegenstand

Die Empfehlungen zur Aerodynamik betreffen zwei Problemkreise: A) Steigerung der aerodynamischen Effektivität von Flugzeugen, B) strömungsphysikalische Modellbildung in Hinsicht auf Empfehlung 7.7 (Virtuelles Produkt, multidisziplinäre Simulation und Optimierung).

Zu A): Der in Abschnitt 6 skizzierte Hintergrund für die fachlichen Empfehlungen (Ökonomie- und Ökologieaspekte, Flugbereiche, neue Ansätze und Technologien) hat als mögliche Konsequenzen – insbesondere in Hinsicht auf die Aerodynamik – verschiedene Forderungen. Die wichtigsten sind stärkere Integration der aerodynamischen Elemente und des Antriebes, Verringerung des Reibungswiderstandes mit Hilfe von Grenzschichtbeeinflussungsmaßnahmen und Flug mit künstlicher Längsstabilität.

Zu B): Die numerischen Methoden zur multidisziplinären Simulation und Optimierung als Elemente des Virtuellen Produktes benötigen deutlich verbesserte strömungsphysikalische Modelle von hoher Genauigkeit und Verlässlichkeit, was, je nach Flugbereich, auch für die thermodynamische Modellbildung gilt.

- Innovationsbedarf

Der Innovationsbedarf stellt sich wie folgt dar.

Problemkreis A)

- Systematische Untersuchungen der aerodynamischen Vorteile hochintegrierter Gesamtkonfigurationen gegenüber denen von klassischen Konfigurationen unterschiedlichen Integrationsgrades.
- Entwicklung und Verifizierung von Auslegungsverfahren für optimale Laminarformen hochintegrierter Gesamtkonfigurationen (Laminarflugzeug).
- Weiterentwicklung und Neuentwicklung von Grenzschichtbeeinflussungsmaßnahmen in Hinsicht auf klassische und hochintegrierte Konfigurationen.
- Weiterentwicklung von konfigurativen Ansätzen zur künstlichen Längsstabilität.

Problemkreis B)

- Genaue und zuverlässige empiriefreie Kriterien und Modelle für die laminar-turbulente Instabilität und Transition sowie die Relaminarisierung.
- Rezeptivitätsmodelle (mathematische Modelle, die die Aufnahme von Störungen durch die Grenzschicht beschreiben) von atmosphärischen Störungen (Turbulenzgrad, Temperatur- und andere Fluktuationen) und Fluggeräte-spezifischen Störungen (Oberflächeneigenschaften, Vibrationen, Lärm) in Hinsicht auf laminar-turbulente Instabilitäts- und Transitionsphänomene sowie turbulente Strömungen.
- Turbulenz- und Transitionsmodelle für Ablöse- und Wirbelströmungen.

- Lösungsgedanken

Lösungsgedanken sind:

Problemkreis A)

- Laminarflugzeug: Anordnung der Tankvolumina und des Antriebes um einen konventionellen zylindrischen Passagier-/Frachtraum zur Erzielung einer optimalen Laminar-Rumpf-konfiguration.
- Laminarflügel: Bei gepfeilten Flügeln entsprechende Gestaltung des Flügels und des Hochauftriebsystems, um entweder mit natürlicher (vorwärtsgepfeilter Flügel) oder mit aktiver Laminarhaltung (Absaugung) die Verminderung des Reibungswiderstandes zu erzielen.

- Direkte Kopplung von Widerstands- und Vortriebsmechanismus zur Verbesserung des Vortriebswirkungsgrades.
- Künstliche Längsstabilität: Entwicklung von Redundanzansätzen für den mehr oder minder konventionellen Betrieb des Flugzeuges am Boden und im Flug.
- Mikroelektromechanische Systeme (MEMS) zur Transitionssteuerung und zum Temperaturmanagement der Zellenoberfläche zur Reduktion des turbulenten Reibungswiderstandes.

Problemkreis B)

- Weiterentwicklung von nichtlokalen und nichtlinearen empiriefreien Transitionsmodellen mit geeigneten Rezeptivitätsmodellen.
- Weiterentwicklung von statistischen Turbulenzmodellen und hybriden Kopplungsansätzen (RANS-LES Kopplungen) mit geeigneten Rezeptivitätsmodellen.
- Gewinnung experimenteller Modellierungs- und Verifizierungsdaten auch im DNW, ETW und im Flugversuch, da solche Daten bisher im wesentlichen nur aus Kanälen mit niedrigen Reynoldszahlen und/oder ungenügender Machzahl/Reynoldszahl-Ähnlichkeit vorliegen.
- Generelle Abkehr von der methodenorientierten Vorgehensweise und Übergang zur problemorientierten durch konsequente Kombination von analytischen, experimentellen (auch Flugversuch) und numerischen Methoden.

7.9 Werkstoffe und Bauweisen

- Gegenstand

Werkstoffe und ihre Eigenschaften Metalle wie zum Beispiel Stahl, Titan und Aluminium und ihre Legierungen haben den Vorteil, dass statische Lasten sehr gut übertragen werden können. Durch eine mögliche Plastifizierung sind sie kerbunempfindlich gegenüber statischen, jedoch kerbempfindlich gegenüber dynamischen Lasten. Der Hauptnachteil der Metalle sind die hohen Dichten und damit die niedrigen darauf bezogenen Festigkeiten und Steifigkeiten, verglichen mit den Eigenschaften von Faserverbunden.

Faserverbunde sind wichtige alternative Materialien. Sie bestehen aus Fasern, die in einer Matrix (zum Beispiel Epoxydharz) gebettet sind. Die angebotenen Kohlefasern können in drei Gruppen eingeteilt werden: hochfeste, mittelsteife und hochsteife Fasern. Bei einer Dichte von 1,6 bis 2,0 g/cm³ erhält man für die Faser eine Reißlänge von 150 bis 220 km. Der auf die Dichte bezogene Elastizitätsmodul ist bei einer hochsteifen Faser außerordentlich hoch, ist doch der Elastizitätsmodul der hochsteifen Faser fünfmal höher als der des Stahls. Die Faser selbst ist orthotrop, die Längssteifigkeit ist sehr viel höher als die Quersteifigkeit. Die Bruchdehnung beträgt etwa 1 Prozent. Der Wärmeausdehnungskoeffizient ist etwa null oder negativ in Faserlängsrichtung, dagegen ergibt sich ein positiver Wert für die Querrichtung.

Die erhältlichen Glasfasern haben eine Dichte von 2,55 g/cm³. Die Fasern sind isotrop, der Elastizitätsmodul ist vergleichbar mit dem von Aluminium, die Fasern besitzen aber eine deutlich höhere Festigkeit. Die Bruchdehnung liegt bei 4,5 Prozent.

Die Fasern werden üblicherweise mit Epoxydharzen verbunden. Diese sind isotrop und haben ein nichtlineares Spannungsdehnungsverhalten. Sie besitzen einen Elastizitätsmodul von 3.000 - 6.000 N/mm², eine Zugfestigkeit von 40 - 140 N/mm² bei einer Bruchdehnung von 2 - 10 Prozent. Sie sind bis 170°C einsetzbar. Die Dichte liegt bei etwa 1,2 g/cm³, damit verringert sich die Dichte des Faser-Harz-Verbundes und ist etwa für Kohlefaser-Epoxy nur halb so hoch wie für Aluminium.

Die Fasern können beliebig im Harz positioniert werden. Die Eigenschaften werden üblicherweise für Unidirektionalverbunde mit einem Faservolumenanteil von 60 Prozent angegeben. Die Festigkeiten der Multidirektionalallaminat entsprechen denen der ohne Plastizitäten errechneten Werte. Kerben haben einen bedeutenden Einfluss auf die statische Festigkeit – im Gegensatz zu Metallen –, aber

einen geringen auf die dynamische Festigkeit. Die Wöhlerkurven haben einen relativ geringen Festigkeitsabfall, das Verhältnis zwischen statischer und dynamischer Festigkeit ist klein. Damit ergeben sich weit längere Inspektionsintervalle für Faserverbundstrukturen als für Metallbauteile.

Schlagartige Belastungen können Faserverbundstrukturen schädigen und insbesondere die Druckfestigkeit deutlich mindern (compression after impact). Mit bruchmechanischen Kennwerten (Energiefreisetzungsrates) kann das Schadensverhalten beurteilt und beeinflusst werden. Auch die Festigkeitsauswirkungen von Schäftungen und Kerben können mit diesen Werten berechnet werden. In [37] wird dieses mit Gültigkeit auch für die Starrflügler-Konstruktion dargestellt.

Mithilfe neuer gesetzlicher Zulassungsvorschriften etwa für kleine und große Hubschrauber [38] (gemeinsam von USA und Europa erarbeitet) bezüglich dynamischer Festigkeit und Schadenstoleranz können Faserverbundstrukturen sicher nachgewiesen und zugelassen werden. Besondere Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit müssen beachtet werden. Beispielsweise besitzt die Pechfaser eine Wärmeleitfähigkeit, die dreimal so hoch ist wie die von Kupfer (theoretisch bis zu 2.400 W/(m K)). Damit wird sie zu einem Kandidaten für das Thermalmanagement von Bauteilen mit hohen Wärmelasten. Faserverbundstrukturen kennen keine Korrosion (zum Beispiel Spannungsrissskorrosion), damit kann das Feuchtklima in Flugzeugrümpfen für die Passagiere angenehm gestaltet werden. Die grundlegenden Werkstoffeigenschaften müssen sorgfältig gemessen und beschrieben werden, schlechte Probenformen führen zum Beispiel zu vorzeitigen Brüchen und zu erhöhten Streuungen, die von Zulassungsbehörden mit der Einführung von geminderten zulässigen Festigkeiten bestraft werden.

- Innovationsbedarf

Das große Potential von Kohlefaserverbundwerkstoffen muss im Flugzeugbau stärker als bisher ausgeschöpft werden! Nach den Schrittmacherentwicklungen an Hochschulen (studentische Segelflugvereinigungen) und der Industrie gibt es bisher Anwendungen bei Segelflugzeugen, Hubschraubern, bei Kampfflugzeugen und Satelliten. Anfang der 1980er Jahre wurde bei Airbus Hamburg für die A300-Konfiguration ein Seitenleitwerk in Kohlefaserverbund-Bauweise entwickelt [39]. Abgeleitet davon wurde ein solches Seitenleitwerk beim A310 und später beim A320 das erste zivile Großbauteil in dieser Bauweise. Der Einsatz solcher Leitwerke bei allen Flugzeugen dieser Typen ist sehr erfolgreich. Der entscheidende Kostenfaktor für die Betreiber sind die weitaus größeren Inspektionsintervalle als bei Seitenleitwerken in Metallbauweise. Aber erst jetzt, 30 Jahre später, wird mit dem M400 und dem A350 der Schritt in den Bau von Großflugzeugen getan.

- Lösungsgedanken

• Bauweisen

Bei der gewählten Bauweise müssen die Schadenstoleranzanforderungen berücksichtigt werden. In Versuchen muss nach dem Aufbringen dynamischer Lasten eine Restfestigkeit unter Berücksichtigung auftretender Feuchte und Maximaltemperaturen nachgewiesen werden. Zusätzlich sind die Auswirkungen von eingebrachten Schäden zu berücksichtigen. Daher sollte nach Möglichkeit die aufgelöste Bauweise mit Spanten und Stringern verwendet werden, weil damit die Größe eines Schadens begrenzt werden kann. Bei einer Sandwichstruktur können dagegen lokale, nicht erkannte Schäden durch die aufgebrachte Belastung zum ultimativen Versagen führen. Eine Begrenzung des Schadenswachstums durch die Anordnung von Versteifungen ist somit zwingend. Kraftein- und -überleitungen sind bei Faserverbunden genau zu dimensionieren. Delaminationen können bedeutende Schäden zur Folge haben. Eine "fail safe"-Bauweise sollte bei den Krafteinleitungen verwendet werden. Bei dicken, gekrümmten Faserverbundstrukturen können Belastungen schlecht übertragbare Querspannungen erzeugen. Große Bedeutung haben die Fügungen bei Faserverbund- (FV-) Strukturen. Kleben, Nieten und Verschrauben sind geeignete Fügungsmöglichkeiten, die aber sorgfältig dimensioniert werden müssen.

• Strukturphysikalische Methoden und strukturphysikalische Modellbildung

Die Berechnungsmethoden für Faserverbundstrukturen entsprechen den üblichen bei Metallstrukturen angewandten Verfahren. Optimierungsverfahren sind bei der Auslegung der FV-Strukturen von großer Bedeutung, da die Variationsmöglichkeiten sehr groß sind. Bei den Berechnungen sind auch die Auswirkungen von thermischen Einflüssen (Wärmeausdehnung und Wärmeleitung) zu beachten, da schon die Aushärtung zusätzliche Spannungen erzeugt. Eine Vielzahl von Zusatzbetrachtungen muss bei der Berechnung von FV-Strukturen berücksichtigt werden. Die Anwendung bruchmechanischer Methoden ist insbesondere bei der Bestimmung von Schlagschäden und Delaminationen von Bedeutung.

Diese Aussagen gelten für monolithische Strukturen. Eine vollständige FV-Zellenstruktur schließt eine große Anzahl von Fügstellen und Dämpfungselementen ein. Die Anforderungen an eine verbesserte Definitions- und Entwicklungsmethodik, Empfehlung 7.6, mit der Perspektive des Virtuellen Produktes, Empfehlung 7.7, bedingen die frühzeitige und genaue Ermittlung statischer und dynamischer real-elastischer Eigenschaften, Empfehlung 7.10. Dieses macht die Entwicklung von strukturphysikalischen Modellen erforderlich, die es gestatten, Fügstellen aller Art, aber auch Dämpfungselemente in den strukturphysikalischen Methoden zu berücksichtigen. Bei FV-Zellenstrukturen ist dieses jedoch im Allgemeinen ein kleineres Problem als bei Metallbauweisen.

• Fertigung

Eine große Anzahl von Fertigungsmethoden wird für die Erstellung von FV-Strukturen angewendet. In der Frühzeit der Faserverbundtechnik wurden trockene Gewebe und Glasfaserstränge mit Harz benetzt und dann als nasse Struktur mit einer Folie überzogen, Luft und überschüssiges Harz wurden abgesaugt und zum Verpressen Druck aufgebracht. Die Qualität der Struktur war nicht sehr gut, da eine gleichmäßige Verteilung des Harzes nicht garantiert werden konnte.

Um eine genauere Ablage und eine gleichmäßigere Harzverteilung zu garantieren, entstanden vorimprägnierte, mit Harz maschinell getränkte "Prepregs". Der Einsatz der Prepregs ist bis heute bei der Erstellung von hochwertigen Strukturen weit verbreitet. Ihr Nachteil ist der hohe Preis, bedingt durch den zusätzlichen Tränkungsprozess.

Eine drastische Reduktion der Fertigungskosten ist unbedingt erforderlich. Etwa 25 Prozent können erreicht werden, wenn man eine trockene Faserstruktur aufbaut und diese mithilfe eines Vakuumprozesses mit Harz durchtränkt. Dieser Fertigungsprozess ist bei großen Serien und großen Flugzeugstrukturen vorgesehen. Ein Zusammenfügen von Kohlefaserverbundstrukturen mit Metallen ist nur bedingt möglich, da insbesondere bei Verbindung mit Aluminium Korrosionsprobleme auftreten können.

Von immer größerer Wichtigkeit wird die Entsorgung beziehungsweise das Recycling von Abfällen oder nicht mehr benötigten Bauteilen. Hier sind weitaus größere Anstrengungen als bisher erforderlich. Das Recyclingproblem muss bereits bei der Konstruktion berücksichtigt werden.

• Empfehlungen

Für zukünftige Entwicklungen werden die folgenden Empfehlungen gegeben:

1. Die grundlegenden Werkstoffkennwerte für die Dimensionierung und Konstruktion müssen sehr genau gemessen werden. Hochwertige Probenformen müssen standardisiert werden, denn mangelhaft entworfene und billige Probenformen können Zulassungsprobleme aufwerfen. Die dadurch bedingte größere Streuung und reduzierte gemessene Festigkeit kann zu schädigenden Abminderungsfaktoren führen.
2. Die Klebung als weit verbreitete Fügung wird rechnerisch heute meistens mit unzulänglichem Materialverhalten beschrieben. Geeignete Strukturberechnungsmethoden sind vorhanden, s. zum Beispiel [40], aber die Verfügbarkeit adäquater Stoffwerte stellt ein Problem dar, das gelöst werden muss.
3. Die Gesetzgebung der Luftfahrtzulassungsbehörden erlaubt heute eine durchdachte, anwendungsorientierte Dimensionierung bezüglich "fatigue and damage tolerance". Es fehlen jedoch auf Fachwissen beruhende Detailforderungen. Anwendungsszenarien müssen in abgestimmter Vorgehensweise von Industrie und Zulassungsbehörde entwickelt werden.
4. Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist eine gute Standardmethode, die auf Metall- und FV-Strukturen gleichermaßen anwendbar ist. Für die Probleme, die sich aufgrund von Fügstellen und Dämpfungselementen ergeben, sind Erweiterungen dringend erforderlich.
5. Die numerische Optimierung ist insbesondere bei der Auslegung von Faserverbundstrukturen wegen der vielen Parameter eine wichtige Methodik. Für die Optimierung von FV-Struktur-Topologien sind weitere Entwicklungen nötig.
6. Der Wissensaustausch ist bei der Entwicklung von FV-Strukturen zur Vermeidung von Fehlern

zwingend. Ein transparenter Wissensaustausch ist aber zur Zeit in Deutschland und Europa generell nicht gegeben. Maßnahmen zur Verbesserung der Situation sind erforderlich.

7. Die Faserverbunde bieten durch die Vielzahl an ungekoppelten Eigenschaften gute Möglichkeiten, innovative Strukturen zu entwickeln. Dieses sollte stärker als bisher genutzt werden.
8. Besondere, ergänzende Berechnungsmethoden sind bei der Entwicklung von Faserverbundstrukturen zwingend. Diese betreffen die Schlagbeanspruchung (Impact) und Umwelteinflüsse (Temperatur und Feuchtigkeit).
9. In Hinsicht auf Schlag- und Zusatzschäden sind Inspektionsmethoden zu verbessern, die sich insbesondere auf die statische Festigkeit beziehen.
10. Reparaturmethoden sind weiterzuentwickeln.
11. Eine Auslegung von Faserverbundstrukturen mithilfe festgelegter Dehnungen wie zum Beispiel 0,3 Prozent ergibt eine zu große pauschale Sicherheit, die zu einer Überdimensionierung führt. Die Bruchdehnung für einen unidirektionalen Kohlefaserverbund beträgt dagegen etwa 1,5 Prozent. Die Relevanz für alle Bauteile muss stärker als bisher untersucht werden, um Potentiale der Gewichtsreduktion vollständig zu erschließen.
12. Fertigungsmethoden für Faserverbundstrukturen müssen weiterentwickelt werden, um die Gestehungskosten der Bauteile zu senken.

7.10 Aeroelastik

- Gegenstand

Die Aeroelastik umfasst die Wechselwirkungen (statisch und dynamisch) der kräfteübertragenden Luftströmung mit der elastischen Flugzeugstruktur. Einzelaspekte sind:

- Verformung des Flügels einschließlich des Hochauftriebssystems sowie aerodynamischer Stabilisierungs- und Kontrollflächen unter Last.
- Flattern.
- Buffeting in seiner aeroelastischen Auswirkung.
- Wechselwirkungen zwischen elastischer Zelle und Flugregelung (Aeroservoelastik, Strukturfilterauslegung).
- Böenlasten und Rumpfschwingungen (Passagierkomfort).
- Asymmetrisches Strömungsverhalten beim Langsamflug.
- Schaufelflattern bei Turbotriebwerken, Propellerblattflattern.

Das reale elastische Verhalten der Zelle, statisch und dynamisch, wird bestimmt durch die Steifigkeiten der Bauteile, aber auch durch Dämpfungen und Nichtlinearitäten, die sich aufgrund der Fügungen (Nieten, Schrauben, Klebungen, ...) und gegebenenfalls durch Nachbeuleffekte von Bauteilen ergeben. In heutigen FEM-Simulationen können die real-elastischen Effekte nicht berücksichtigt werden. Die Zelle, beziehungsweise die Bauteile werden - obwohl gefügt - monolithisch modelliert.

Moderne Faserstrukturen sind überwiegend monolithische oder quasi-monolithische Bauteile, jedoch meistens nicht ganz ohne Fügstellen. Hier kehrt sich, zumindest teilweise, die Fügstellenproblematik um. Es werden Dämpfungselemente eingeführt, um unerwünschte Schwingungen zu eliminieren. Der Effekt dieser Dämpfungselemente muss natürlich ebenfalls in FEM-Simulationen erfasst werden können.

- Innovationsbedarf

FEM-Simulationen der Aeroelastik ergeben nur das ideal-elastische Verhalten, was je nach Problemstellung zu eingeschränkten Aussagen in der Definitionsphase und in den anfänglichen Entwicklungsphasen führt. Die real-elastischen Eigenschaften der Flugzeugzelle werden erst sehr spät in der Entwicklungsphase durch Standversuche gefunden, die endgültigen erst durch die Systemidentifikation im Flugversuch.

Die Folgen sind:

- Datenbasen mit eingeschränkter Genauigkeit für die Systemsimulationen in den Definitions- und Entwicklungsphasen.
- Zusatzkosten und -gewicht aufgrund in späten Entwicklungsphasen gegebenenfalls erforderlich werdende Reparaturlösungen.
- Imageverlust und Konventionalstrafen bei Verzögerung der Inbetriebnahme durch den Kunden.

Erforderlich ist, insbesondere bei Fluggeräten mit hochelastischen Flügeln, bei Flugzeugen mit künstlicher Längsstabilität, bei Konfigurationen mit starker Kopplung zwischen Antrieb und Zelle (unkonventionelle Konfigurationen, luftatmende Über- und Hyperschallflugzeuge), eine frühe und genaue Ermittlung der real-elastischen Eigenschaften hinsichtlich kritischer Einzelaspekte. Mathematische Modelle, die das real-elastische Verhalten beschreiben, sind Voraussetzung für die numerischen multidisziplinären Simulations- und Optimierungsmethoden des Virtuellen Produktes, Empfehlung 7.7.

- Lösungsgedanken

Die Empfehlung bezieht sich auf das Problem der Berechnung der real-elastischen Eigenschaften der Zelle. Folgende Punkte sind zu nennen:

- Systematische Identifikation kritischer Bauteile und des Simulationsbedarfs.
- Quantifizierung der Abweichungen von im Standversuch ermittelten elastischen Eigenschaften von den mit ideal-elastischer FEM-Simulation gefundenen.
- Erarbeitung von strukturphysikalischen Modellen (statistische Modelle basierend auf Parameteridentifikation, direkte numerische Simulation, ...), s. Empfehlung 7.9, zur mathematischen Beschreibung des real-elastischen Verhaltens.
- Strukturphysikalische Modelle für Ersatz- und Subsystemmodelle in frühen Definitionsphasen, s. Empfehlung 7.7, je nach der konstruktiven Detaillierung der Zelle.
- Systematische und umfassende Erprobung und Validierung der strukturphysikalischen Modelle mit Methoden der multidisziplinären Simulation und Optimierung (MDSO) an Bauteilen steigender Komplexität bis zur vollständigen Flugzeugzelle.

7.11 Flugmechanik

- Gegenstand

Gegenstand der Flugmechanik sind klassischerweise die Flugleistungen eines Fluggerätes entsprechend den Kundenvorgaben (Mission, Nutzlast, Reichweite usw.) und die Flugeigenschaften, welche unter anderem die Fliegbarkeit des Gerätes mit und ohne Regler, einschließlich der Stabilitätseigenschaften betreffen. Zu den Flugeigenschaften gehört ebenfalls der Passagierkomfort, zum Beispiel Sitzplatz-Bereich, Klimatisierung, Unterhaltungsmedien. Flugleistungen und Flugeigenschaften sind üblicherweise getrennte Disziplinen, die letztendlich aber eng gekoppelt im Sinne des Virtuellen Produktes gesehen werden müssen. Ein Beispiel ist der Flug mit hinterer Schwerpunktlage, der zu besseren Flugleistungen führt, aber schlechtere Flugeigenschaften ergibt.

- Innovationsbedarf

Zur Lösung der Flugmechanikprobleme ist die Kenntnis der Basiskräfte, der Gesamtmasse und der Bauteilmassen, des Triebwerksschubs und der Aerodynamik notwendig. Grundsätzlich gilt, dass die Verkleinerung der Flugzeugmasse, die Verbesserung der Triebwerke (weniger Verbrauch) und

die Erhöhung des Auftriebs mit möglichst geringer Widerstandsvergrößerung anzustreben sind. Darüber hinaus sind neue Flugzeugkonfigurationen zu untersuchen, die zum Beispiel größere Nutzlastkapazität, geringeren Widerstand usw. besitzen. Neben der Verbesserung der am Flugzeug wirkenden Kräfte und der Optimierung der Flugzeugkonfiguration sind Missionsstrategien anzudenken, um zum Beispiel Stratosphärenflüge zu minimieren und um Kraftstoff sparende Flugabschnitte abfliegen zu können (spezielle Area-Navigation mit GPS beim Landeanflug).

- Lösungsgedanken

A) Verbesserung der am Flugzeug wirkenden Basiskräfte:

- Aerodynamik:
 - a) Entsprechende Interferenzgestaltung, die möglichst robust über dem gesamten Geschwindigkeitsbereich ist.
 - b) Kontinuierliche Landeklappeneinstellung zur Durchführung von günstigen Landeanflügen.
- Triebwerk:
 - a) Variable Verbindung bei Strahltriebwerken von Bypass-Luftstrom und Coreströmung zwecks Wirkungsgraderhöhung.
 - b) Andenken von Propellerkonfigurationen, so dass mit akzeptablen Wirkungsgraden bei großen Geschwindigkeiten geflogen werden kann.
 - c) Verwendung moderner Hochleistungsmotoren (Diesel, Otto), um Verbrauch zu reduzieren.
- Masse: Verwendung von hybriden Materialien (Faserverbunde, Metall), um Gewichtsreduktion bei vorgegebener Festigkeit sowie Steifigkeit zu erzielen.

B) Erhöhung der Sicherheit beim Flug mit weniger stabiler Konfiguration (hintere Schwerpunktslage) durch Verbundauslegung der im Flugzeug vorhandenen Reglerkapazität (üblicherweise sind viele Regelkreise vorhanden), so dass Reglerausfall kompensiert werden kann.

7.12 Flugführung

- Gegenstand

Die heute vorhandenen, der Flugführung zugänglichen elektronischen Hilfssysteme (Navigation, Fluglage, automatische Systemintegration, ...) erlauben eine wesentlich genauere und sichere, wenn auch umfangreichere Integration in das Cockpit, wobei dem Mensch-Maschine Interface zunehmende Beachtung geschenkt werden muss, um eine Überlastung/Übersättigung der Piloten zu verhindern. Das Fluggerät soll unter optimalen Randbedingungen (vorgegebene Zeit, kraftstoffsparend, sicher) von einem Ort zum anderen gebracht werden.

- Innovationsbedarf

Mehreren, zum Teil schon vorhandenen oder in der Entwicklung befindlichen Assistenzsystemen gebührt eine höhere Beachtung/Priorität. Dazu gehören zum Beispiel:

- Verbesserung/Optimierung der Rollführung von Flugzeugen, insbesondere bei schlechtem Wetter (unzureichende Außensicht bei Nebel, Schneefall, Regen) bei Tag und Nacht.
- Deutlich verbesserte Scherwinderkennung bei Start und Landeanflug. Es gibt zwar bereits Scherwinderkennung, jedoch erfolgt eine Warnung erst, wenn das Flugzeug den Scherwind in Folge von außergewöhnlichen Geschwindigkeitsvariationen erkennt. Eine frühzeitigere Erkennung und automatisierte Systemreaktion würde eine erhebliche Verbesserung der Flugsicherheit bedeuten.
- Optimierung der Cockpitdarstellung zur Verbesserung des räumlichen Bewusstseins (situational awareness) der Piloten. Hierbei kommt der Verhinderung von Übersättigung der Piloten mit Informationen eine besondere Bedeutung zu.
- Von Flugplatzinfrastruktur und -systemen unabhängige An-/Abflug- sowie Landehilfen bis zu Blindlandungen auch auf kleinen Flugplätzen.

- Lösungsgedanken

- Entwicklung von Bodenführungszentralen zur Leitung/Führung von Flugzeugen bei Nullsicht mit automatischer Rollkontrolle, bodengebunden oder flugzeuginherent. Dazu könnte zentimetergenaue GPS-Ortung verwendet werden.
- Frühzeitige Scherwinderkennung, heute bereits im Entwicklungsstadium, muss forciert werden, verbunden mit einer automatischen, autopilotengestützten Ausweichtechnik. Dadurch würde ebenfalls der Passagierkomfort in ungewöhnlichen Situationen (Durchstartmanöver) erheblich gesteigert.
- Verbesserung der Cockpitinformation besonders unter dem Gesichtspunkt, dass heutzutage eine Unmenge von digital aufbereiteten Informationen für das Cockpit zur Verfügung steht, wovon nur eine relativ geringe Menge zur Durchführung des Fluges notwendig ist, abhängig von Flugphase und Situation. Verbesserte Darstellung des räumlichen Umfeldes kann erheblich zur Entzerrung des heute und in Zukunft noch stärker belasteten Luftraumes beitragen.
- Obwohl Landungen bei starkem Querwind verbunden mit unvorhersehbaren Böen heute noch problematisch sind, muss angestrebt werden, unter Einsatz von GPS die zulässigen Wind-Komponenten zu erhöhen, um eine weitere Flexibilität des Einsatzes von Flugzeugen bei vorhergesagtem Starkwind zu ermöglichen. Hier wären aber auch die bereits vereinzelt angewendeten Fahrwerklösungen, die ein Schiebelandung zulassen, neu zu betrachten.

7.13 Avionik

- Gegenstand

Die Avionik, in deutscher Sprache früher Flugelektronik genannt, umfasst die innere, dem Fluggerät zugeordnete, sowie die äußere, der Mission in der Umwelt zugeordnete Elektronik im Flugzeug. Strukturiert werden die einzelnen Funktionen durch ihre vier Elemente, die eine Wirkungskette bilden:

Sensoren - Prozessoren - Effektoren - Relatoren.

Letztere sind die notwendigen Verbindungen in Form von Leitungen, aber auch von Feldern, zum Beispiel dem elektromagnetischen Feld.

- Innovationsbedarf

Der extrem hohe Leistungsstandard der Computertechnik - der Prozessoren, Speicher und Datenbusse - entwickelt sich ständig fort und bedarf keiner zusätzlichen Impulse durch die Luftfahrt. Auf der Sensorseite bestehen noch viele offene Wünsche, insbesondere, was die Sicht unter Schlechtwetterbedingungen betrifft.

Anzeigen sind Effektoren. Sie koppeln den Menschen mit seinen entsprechenden vier Elementen – Sinnesorgane, Nervensystem, Gehirn, Gliedmaßen – an die technischen Systeme Avionik und Flugzeug. Hier sind noch viele Wünsche hinsichtlich des Human Engineering offen. Institute der Anthropotechnik sind gefordert, die mentale Belastung der Piloten in allen Phasen einer Flugmission quantitativ zu ermitteln. Mittels der aus der Kybernetik bekannten Informationstheorie kann die mentale Belastung in bit pro Sekunde angegeben werden. Die Verbindung der avionischen Geräte untereinander durch Bussysteme – Relatoren, zum Beispiel Fly-by-Wire, Fly-by-Light – ist leistungsmäßig weitgehend abgedeckt.

- Lösungsgedanken

- Realisierung von Prozessorfunktionen als "Festverdrahtung" als Quasi-Analogtechnologie zur Vermeidung von Software- (SW-) Fehlern In der Analogtechnik gestaltet sich die Vermeidung von Fehlern insofern einfacher, da das einmal positiv getestete System durch die Zuverlässigkeit seiner Bauelemente bestimmt ist. In der Digitaltechnik hingegen kommen die oft unvermeidbaren Softwarefehler als permanente "Bedrohung" hinzu. Eine hundertprozentig sichere Software gibt es nicht. So kann ein fehlerhaftes SW-Modul durch die funktionale Integration mit anderen das gesamte System zum Ausfall bringen. Es gab in der Vergangenheit Ansätze, vitale Funktionen gleichsam in Silizium zu "gießen". Diese Ansätze sind zur Anwendung zu

bringen. Das digitale Analogon sieht dann von außen wie ein analoger Baustein aus, der in üblicher Weise mit anderen verdrahtet ist. So kann ein Fehler sich nicht durch Gemeinsamkeiten mit anderen Bausteinen im System fortpflanzen.

- Infrarot-Datenübertragung in Cockpit und Kabine, um EMV-Probleme zu vermeiden Die Verkabelung im Flugzeug ist ein ebenso anspruchsvolles wie kritisches Thema. Die Probleme von Airbus mit dem Typ A 380 sind hinlänglich bekannt geworden. Die sogenannte elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) bleibt ein zentrales Problem, solange mit metallischen Leitern gearbeitet werden muss. Zwar ist die Lichtleitertechnik diesbezüglich ein großer Fortschritt, doch bleibt der materielle Aufwand der Verkabelung, welche auch ein schwieriges topologisches Problem darstellt. Eine Bestrahlung der Passagierkabine mittels eines modulierten Infrarotstrahlers erspart die Verkabelung sowie elektromagnetische Interferenzen. Da die Ausstattung jedes einzelnen Passagiersitzes mit immer mehr IT-Funktionen fortschreitet, kann so auch sehr flexibel auf Änderungen reagiert werden. Zudem wird das Gewicht der Kabelbäume gespart, von dem Arbeitsaufwand zur Installation ganz abgesehen. Falls Passagier-Akzeptanz herbeigeführt werden könnte, würde der Ersatz der Kabinenfenster durch Bildschirme signifikante Einsparungen an Strukturmasse bringen. Zur realistischen Außen-sicht ist dann nur jeweils an Stelle der Fenster eine minimale Öffnung für eine Videokamera erforderlich. Der Passagier kann auf dem Bildschirm aber auch andere Darstellungen anwählen.
- Vollbild-„Glascockpit“ mit 3D-Darstellung Das Glascockpit hat nunmehr schon bedeutenden Anteil an der Cockpitgestaltung bekommen. Von Piloten wird allerdings bereits die Überfütterung mit zu vielen Funktionen moniert, s. Empfehlung 7.12. Die zuvor geschilderte Analyse der Belastung in bit/sec könnte als Kriterium genutzt werden, was in welcher Missionsphase angezeigt wird oder nicht. So könnte die gesamte im Augenblick relevante Informationsmenge auf das notwendige Maß reduziert werden. Die inzwischen in den Unterhaltungsmedien einziehende 3D-Darstellung könnte eine weitere Reduzierung der Belastung bringen bei gleichzeitiger Anzeige von weniger bedeutenden Informationen im 3D-Hintergrund. Dazu wird diese Anzeige eventuell nur schemenhaft dargestellt oder auch durch nur gelegentliches Einblenden aktiviert. Hier bietet sich ein weites Experimentierfeld an.
- Optimierung der Eingabemedien: zum Beispiel Ersatz des Sidesticks durch Videoanalyse der Handbewegungen Videokameras, welche den Piloten anvisieren, um etwa seine Wachsamkeit zu kontrollieren, könnten auch dazu dienen, mittels Mustererkennung seine Bewegungen zu erkennen. So könnte eine Gestik etwa in der Zeichensprache der Taubstummen gegebenenfalls auch die Nutzung des Sidesticks ersetzen. Er bleibt natürlich für alle Fälle physisch vorhanden. Durch Scannen der Augenbewegungen kann auch die Qualität der Anzeigen bewertet werden, indem die Verweilzeit auf einem Detail als Kriterium verwendet wird.
- Sensorfusion von Video-, Infrarot- und Mikrowellenbildern für eine ständige Außen-sicht Der reine Instrumentenflug könnte durch eine Sensorfusion von Video-, Infrarot- und Mikrowellenbildern durch einen synthetischen Sichtflug abgelöst werden. Digitale Geländemodelle in Verbindung mit GPS, Galileo, GLONASS könnten zur 3D-Kartendarstellung genutzt werden.

8 Allgemeine Empfehlungen zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit

Die im folgenden gegebenen Empfehlungen sind genereller Art. Sie betreffen vor allem die Luftfahrtbranche und dort die etablierten, aber teilweise schon lange nicht mehr hinterfragten Strukturen und Vorgehensweisen insbesondere in den Definitionsphasen, aber auch in den Entwicklungsphasen. Die Empfehlungen zielen auf die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der Branche ab und werden zum Teil auf lange Sicht als von existenzieller Bedeutung angesehen.

8.1 Ausschöpfung der Potentiale der Informationstechnologien in der Produktdefinition und -entwicklung

Die Strukturen der Produktdefinition und -entwicklung sind unterschiedlich in den verschiedenen Zweigen der Luftfahrtbranche. Gemeinsam ist die Erkenntnis, dass in den frühen Phasen der Produktdefinition, der Konzeptphase, beziehungsweise der Vorentwurfsphase, die wesentlichen Eigenschaften des künftigen Produktes und damit große Anteile des ökonomischen Budgets (Betriebs- und Lebenszykluskosten), aber auch des ökologischen Budgets (Betriebs- und Lebenszykluslasten) festgelegt werden. Im Gegensatz zu dieser Erkenntnis wird jedoch im allgemeinen in den Frühphasen nicht genügend Produktwissen erzeugt, so dass die Gefahr suboptimaler Produkt-Lösungen groß ist.

Die in Empfehlung 7.6 ausgedrückten Lösungsgedanken beziehen sich auf die technische Vorgehensweise und die Entwurfswerkzeuge. Entscheidend ist jedoch, dass hier in der Praxis ein grundsätzlicher Widerspruch vorliegt. Es müssen Mittel aufgewendet werden, obwohl das Produkt noch nicht verkauft ist. Das ist aber das grundsätzliche unternehmerische Risiko, das eingegangen werden muss. Wenn man sich diesem Risiko nicht hinreichend stellt, besteht die Gefahr genannter sub-optimaler Lösungen.

Die Entwicklungen in den Informationstechnologien, insbesondere in der numerischen Simulation und Optimierung (Virtuelles Produkt), Empfehlung 7.7, bieten die Chance, dem genannten Widerspruch zu begegnen, wenn gleichzeitig entsprechende organisatorische und personelle Maßnahmen ergriffen werden, aber auch die unternehmerische Risiko-Bereitschaft angemessen erhöht wird.

8.2 "Lessons Learned" zur Weitergabe von Produktwissen

Typisch für die Luftfahrtbranche, etwa im Vergleich zur Automobilbranche, sind die generell langen Entwicklungszeiten der Produkte. Die gezielte und konkrete Dokumentation und Weitergabe personengebundenen Wissens sowohl firmen- als auch branchenintern sollte daher einen viel höheren Stellenwert haben, als sie heute hat (eine detaillierte Behandlung dieses Problems und des Technologietransfers in andere Branchen, der sehr bedeutend ist, würde den Rahmen dieser Denkschrift sprengen. Darstellungen dazu sind in [1], [41] zu finden, ebenso weiterführende Literatur). Dem stehen im allgemeinen brancheninterne Konkurrenzbedürfnisse entgegen, und firmenintern etwa Profitcenterstrukturen, s. Unterabschnitt 8.6.

Grundvoraussetzung für die Wissensweitergabe sind aber strukturierte Lernprozesse, basierend auf Nachbetrachtungen am Ende einer Entwicklung, gleichgültig, ob diese zu einem Produkt geführt hat oder nicht. Solche Nachbetrachtungen - "Lessons learned" - fehlen jedoch weitgehend in der Branche. Sie können helfen, positive und negative Erfahrungen bei einem Projekt festzuhalten. Gute Erfahrungen sollten etwa in "best practice guides" Niederschlag finden. Negative Erfahrungen sollten aber vor allem motivieren, Fehler zu identifizieren, etwa bei der Vorgehensweise in den Definitions- und Entwicklungsphasen, sowie die Sinnhaftigkeit der verwendeten Simulations- und Optimierungswerkzeuge festzustellen.

Vier Aspekte sind dabei zu betrachten. Erstens werden bei der Produktdefinition die Gründe für Entscheidungen für oder wider eine mögliche Lösung in der Regel nicht hinreichend dokumentiert. Dieses gilt zweitens auch für Probleme (und ihre Überwindung), die bei der späteren Produktentwicklung aufgrund ungenügender Durchdringung bei der Produktdefinition auftreten. Drittens und viertens gilt das für Probleme (und ihre Lösung), die bei der Fertigung und später beim Betrieb des Flugzeuges auftreten. Nichterfüllung von Produktgarantien und Reparaturlösungen sind kostspielig und werden im Allgemeinen durch Rückstellungen aufgefangen.

Generell ist die Weitergabe des Personen-gebundenen Wissens ein Problem, wenn Mitarbeiter ausscheiden. Trotz aller Einsicht scheitern die guten Vorsätze meistens an den unmittelbar entstehenden Kosten. Diese sind normalerweise auch der Grund dafür, dass keine Nachbetrachtungen angestellt werden. Dabei ist zu fragen, ob "lessons learned" und ein effektiver Wissenstransfer auf lange Sicht nicht doch kostengünstiger sind als die übliche Vorgehensweise, vor allem auch in Hinsicht auf die immer wieder einzugehenden technologischen Risiken und den Umfang der

heute erforderlichen Rückstellungen. Graphen-basierte Entwurfsmethoden (Empfehlung 7.6) als rechnergestützte Prozesse in den Definitions- und Entwicklungsphasen, zusammen mit jeweils adäquaten numerischen Simulations- und Optimierungsverfahren (Virtuelles Produkt, Empfehlung 7.7) wären dabei die geeigneten Werkzeuge. Sie können helfen, Prozesse zu beschleunigen, Entscheidungen rationaler zu treffen, ohne dass dabei die Freiheit des gestaltenden Ingenieurs beeinträchtigt wird.

8.3 Verbesserung des Wissenstransfers per Tagungen und Veröffentlichungen

Tagungen und Veröffentlichungen sind wichtige Mittel des Wissenstransfers. Die europäischen Luft- und Raumfahrtgesellschaften haben sich schrittweise zum Council of European Aerospace Societies (CEAS) zusammengeschlossen. Mit Tagungen, Arbeitsgruppen und Journalen des CEAS ist der übernationale europäische Informationsaustausch institutionalisiert worden. Die nationalen Aktivitäten bei der DGLR bestehen durchgehend weiter. Das European Rotorcraft Forum widmet sich jährlich der Hubschraubertechnik. In Deutschland gibt es darüber hinaus Aktivitäten wie die der Deutschen Strömungsmechanischen Arbeitsgemeinschaft STAB (ursprünglich "Strömungen mit Ablösung"), die im Jahreswechsel Workshops und Symposien veranstaltet. Die Beiträge zu den Symposien werden in der Springer-Reihe "Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, NNFM" veröffentlicht.

Es muss allerdings festgestellt werden, dass zumindest in Deutschland bei allen diesen Aktivitäten die Beteiligung der Industrie generell zu wünschen übrig lässt, während von Seiten der Hochschulen und des DLR der Zuspruch gut ist. Von Industrieseite werden hierfür teilweise Kostengründe genannt, teilweise findet auch keine Aktivierung der Mitarbeiter statt, teilweise mag auch die wissenschaftliche Kompetenz fehlen. Das schriftliche Erstellen eines Artikels oder Tagungsbeitrages wird oft als Zumutung angesehen. Diese Situation ist bedenklich, denn der Wissenstransfer in der Luftfahrtbranche ist nach wie vor sehr wichtig. Ein Umsteuern wird dringend empfohlen.

8.4 Einführung eines Nach-Cayleysche Entwurfsparadigmas (erster Aspekt)?

Die immer stärker werdende Kopplung von Funktionen und Subsystemen bei modernen Fluggeräten ist teilweise von großer Bedeutung. Diese Kopplung muss aber nicht notwendig zu einer Abkehr von der bisherigen Vorgehensweise führen, das heißt, zu einem Nach-Cayleyschen Entwurfsparadigma. Das betrifft den ersten Aspekt des Paradigmas, wie er in Abschnitt 5 erläutert wurde. Diese Feststellung gilt umso mehr als die Einführung eines Nach-Cayleysches Entwurfsparadigmas mit Kosten, organisatorischen Änderungen und Risiken behaftet ist [17], [35]. Wahrscheinlich wird man aber doch gezwungen sein, den Schritt zu gehen, weil die Entwicklung von hochelastischen, wohl auch künstlich längsstabilen Flugzeugen kommen wird. Die Gründe sind in diesem Fall vorwiegend ökologische, aber natürlich auch ökonomische und die weltweite Konkurrenzsituation. Das Nach-Cayleysche Entwurfsparadigma ist primär ein Thema der Industrie, durch die damit verbundene Nutzung des Virtuellen Produktes, aber auch ein Thema der Forschung und der Lehre.

8.5 Potentiell große Wettbewerbsvorteile durch die "zweite Mathematisierungswelle"

Vor ungefähr einhundert Jahren war es ein Anliegen der Göttinger Wissenschaft, in Person von Felix Klein, die bis dahin wesentlich empirisch geprägten Wissenschaften zu "mathematisieren" [1]. Klein holte den Strömungsmechaniker Ludwig Prandtl und den angewandten Mathematiker Carl Runge an die Universität Göttingen. Prandtl hat dann wesentlich die "Mathematisierung" der Strömungsmechanik und Aerodynamik, aber auch anderer Flugzeugbau-relevanter Disziplinen getragen. Wenn das als die erste Mathematisierungswelle angesehen werden kann, führte die

Entwicklung der digitalen Hochleistungsrechner und die Informationstechnologien seit den 1980er Jahren zur zweiten Mathematisierungswelle in den Technik- und den Naturwissenschaften. Sie manifestiert sich in diskreten numerischen Methoden zur Lösung der beschreibenden Systeme partieller Differentialgleichungen.

Die zweite Mathematisierungswelle wurde in der Luftfahrtbranche nie richtig thematisiert. Das wäre eine Aufgabe der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (DGLR) gewesen, auch der Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik (GAMM). In der Luftfahrtbranche wurden die Impulse trotzdem aufgenommen, aber im Wesentlichen nur auf Fachdisziplinenebene. Beispiele sind die Finite-Element-Methode, die die Strukturmechanik revolutioniert hat und später, ermöglicht durch die enorme Zunahme der Rechnerleistungen, die – nichtlineare – numerische Aerodynamik. Die Informationstechnologien im weiteren Sinn haben ebenfalls zu revolutionären Entwicklungen geführt, etwa beim rechnergestützten dreidimensionalen interaktiven Konstruieren (CATIA: Computer-Aided Three-Dimensional Interactive Application), in der Versuchstechnik, bei der Simulation, der Avionik und so weiter.

Das Gesamtsystem Flugzeug wird im Laufe des Definitions- und dann des Entwicklungsprozesses mathematisch "simuliert". Die Simulation erfolgt mit anfänglich ungenauen (quantitativ niedrige Beschreibung des Fluggerätes, s. Empfehlung 7.6), dann aber mit zunehmend genaueren Datensätzen. Die Simulation der physikalischen Eigenschaften und der Funktionen des Flugzeuges und seiner Subsysteme mit diskreten numerischen Methoden erfolgt aber im wesentlichen disziplinenorientiert, wobei die Aerodynamik in der Regel die anspruchsvollsten Aufgaben zu lösen hat.

Die multidisziplinäre Simulation und Optimierung des Flugzeuges, die im Gefolge der zweiten Mathematisierungswelle möglich wäre, Virtuelles Produkt, Empfehlung 7.7, hat bisher jedoch keinen rechten Eingang in den Flugzeugbau gefunden. Das ist erstaunlich, da sowohl die Forschung als auch einzelne Bereiche der Industrie große Anstrengungen unternommen haben und noch unternehmen, um entsprechende Methoden zu entwickeln und zu erproben [35]. Einige Gründe dafür sind in den folgenden Unterabschnitten zu finden. In jedem Fall besteht aber die dringende Empfehlung, die Potentiale, die sich durch die zweite Mathematisierungswelle ergeben, zu identifizieren und auszuschöpfen.

8.6 Bedeutung des zweiten Aspekts von Cayleys Entwurfparadigma

In Abschnitt 5 wurde der zweite Aspekt des Cayleyschen Entwurfparadigmas eingeführt. Er betrifft die Differenzierung der an der Definition und Entwicklung des Flugzeuges beteiligten wissenschaftlich-technischen Disziplinen. Diese Differenzierung prägt heute die internen Strukturen der Luftfahrtindustrie, aber auch die Strukturen der Luftfahrtforschung und der Lehre an Hochschulen und Fachhochschulen. Die Disziplinendifferenzierung steht einer mehr ganzheitlichen Vorgehensweise im Wege.

In der Industrie ist in der Regel eine technische Disziplin in einer dedizierten Organisationseinheit zu Hause. Diese ist normalerweise gleichzeitig Kostenstelle oder Profitcenter. Das führt zu einer Abgrenzung und zur Konkurrenz mit anderen Organisationseinheiten, sprich Disziplinen, denn die Kostenstelle muss Gewinn erwirtschaften. Der Gedanke, dass Quersubventionen schädlich sind, verstärkt den Effekt. Die Folge ist eine stark iterativ geprägte Arbeitsweise in allen Produktphasen, im Gegensatz zum sogenannten, immer wieder beschworenen concurrent engineering.

Die Ansätze zu modernen numerischen multidisziplinären Methoden werden meistens von der Aerodynamik getragen, natürlich auch mit Beteiligung anderer Disziplinen. Die Einführung der neuen Methoden in die Definitions- und Entwicklungsprozesse scheitert jedoch dann an den Kostenstellenstrukturen, wenn es für die Leiter der beteiligten Organisationseinheiten nicht genügend Anreize gibt, mit anderen Organisationseinheiten anders als iterativ zusammen zu arbeiten.

Da bei den heutigen Produkten diese organisatorische Struktur und die daraus resultierende Arbeitsweise anscheinend keine Nachteile haben, besteht offensichtlich auch keine Notwendigkeit, diese Struktur zu verändern. Trotzdem sollten aber die Wechselwirkungen zwischen den Fachdisziplinen verbessert werden. Wird jedoch für künftige Produkte ein Nach-Cayleysches Entwurfparadigma erforderlich, wird die Differenzierung der Disziplinen und damit die heutige organisatorische

Struktur infrage zu stellen sein (Aufgabe der Matrixstruktur im herkömmlichen Sinne, Projektsteuerung durch Gruppen von Einzeldisziplinen, die je nach erforderlicher Wechselwirkung miteinander vernetzt sind). Die Einführung der Informationstechnologien hat in der Vergangenheit in der Industrie zu einer Verkleinerung des Personals in allen Disziplinen geführt. Die Einführung Graphen-basierter Entwurfsmethoden, Unterabschnitt 8.2, zusammen mit Elementen des Virtuellen Produktes wird zu einer weiteren Verkleinerung führen.

Hiermit ergibt sich die Chance, durch Zusammenlegen von Organisationseinheiten die Nachteile der Profitcenterstrukturen zumindest zum Teil zu überwinden. Einzelne Disziplinen können dann multidisziplinär mit entsprechenden Simulations- und Optimierungsverfahren zu nur noch schwach iterativen Prozessen kommen und damit zu wirklichem concurrent engineering. Das kann im übrigen auch gelten, wenn Cayleys Entwurfsparadigma im Wesentlichen bestehen bleibt.

Die Differenzierung der an der Definition und Entwicklung des Flugzeuges beteiligten wissenschaftlich-technischen Disziplinen in der hochschulfreien Forschung und an den Hochschulen ist ein weiteres Problem. Drittmittelzwänge, denen sich jedes Institut und jeder Lehrstuhl stellen muss, stehen ganzheitlicher Forschung entgegen. Schwerpunktprogramme und Sonderforschungsbereiche der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) mögen zu einer engeren Zusammenarbeit führen. Dem sind in der Regel aber enge Grenzen gesetzt, nicht zuletzt auch aufgrund der verständlichen persönlichen Ambitionen des Führungspersonals.

8.7 Das Thema Leitungsfunktionen und Fachwissen sollte stets neu bedacht werden

Eine Entwicklung in der Industrie, die lange Anlass zu Bedenken gab, ist die, Fachwissen für Träger von Leitungsfunktionen als weitgehend unnötig anzusehen. Das gilt für Leitungsfunktionen, die etwa dem Hauptabteilungsleiter und darüber entsprechen, aber auch für Projektleiter. Dieser Ansicht scheint man sehr stark in Partnerländern verpflichtet zu sein, aber auch - in unterschiedlichem Maße - in Deutschland. Wenn keine oder nur geringe Innovationsleistung in einer Organisationseinheit erwartet wird, kann man das akzeptieren.

Wenn aber Innovation verlangt wird, wenn große Produktrisiken bestehen, wäre das eine falsche Entwicklung. Ungenügende Einsicht, zumindest auf Hauptabteilungsleiter-Ebene, in die technischen Gegebenheiten, zu starke Verpflichtung per Leistungsvereinbarung den Kostenstellenprofit zu erwirtschaften, schematisches Abarbeiten von Prozessen usw., wären letzten Endes schädlich für das Geschäft. Auch Projektleiter sollten nicht nur Budget-Manager sein, sondern Systemintegratoren mit hohem Allgemein- und Spezialwissen. Generell wird empfohlen, dass alle höheren Leitungsfunktionen von qualifizierten Generalisten bekleidet werden.

Ist das nicht der Fall, wäre der Ausweg die Einführung einer konsequenten Fachlaufbahn. Konsequent insofern, als die Fachhierarchen spätestens ab Hauptabteilungsleiter-Ebene aufwärts nicht mehr dem parallelen Leiter in der Linie unterstellt sind. Erst auf Entwicklungsleiter-Ebene müssten dann Konflikte ausgetragen werden, was dann das Potential hätte, nötige fachliche Maßnahmen und Schritte umzusetzen.

Die Fachhierarchie darf keine dekorative Funktion haben, höchstens auf der direkten Arbeitsebene. Die besten Fachleute müssen als Fachhierarchen den fachlich/technischen Widerpart zu den Kosten/Gewinn-orientierten Linienhierarchen bilden. Es hat sich aber immer wieder gezeigt, dass große Widerstände aus der Linien-Hierarchie gegen eine solche Aufteilung bestehen, was dann regelmäßig zu einem Aufweichen oder Versickern entsprechender Ansätze führte. Allerdings werden in Teilen der Industrie schrumpfende Entwicklungsbudgets und -mannschaften eine künftige Rückverlagerung fachlicher Kompetenz in das Führungspersonal geradezu erzwingen.

Bisherige Fachlaufbahn-Ansätze sind positiv zu sehen. Ihre Wirksamkeit muss jedoch immer wieder überprüft werden. Die Anreize für die Beteiligten sind bei wechselnden Randbedingungen hinsichtlich ihrer Widerspruchsfreiheit zu betrachten.

8.8 Neuausrichtung des Industrieinflusses auf die Forschung?

Eine Beobachtung, die zu bedenken empfohlen wird, ist der starke Einfluss, den die Industrie, und das ist im wesentlichen Deutsche Airbus, heute auf die Ausrichtung der Forschung ausübt. Dabei wird das eher kurzfristige Denken der Industrie auf die Forschung übertragen. Das gilt für das DLR, aber auch für die Hochschulen.

Grundsätzlich ist eine gewisse Industrienähe der Forschung nicht von Schaden. Wenn das aber dazu führen würde - oder auch ein Vorwand von Seiten der Forschungseinrichtung wäre - langfristige Forschungsthemen nicht anzugehen, wäre das falsch. Der Zwang bei den Forschungseinrichtungen, Drittmittel einzuwerben, ist im jetzigen Umfang als schädlich anzusehen.

Die Drittmittel-Philosophie an den Hochschulen ist genauso zu sehen. Wenn überwiegend Drittmittel-Forschung betrieben wird, werden die Themen bearbeitet, die der Drittmittel-Geber bestimmt und nicht notwendig die, die in Hinsicht auf zukünftige Herausforderungen bearbeitet werden müssten.

Eine Möglichkeit wäre, pro Forschungseinrichtung ein bestimmtes Personalkontingent für neue und/oder langfristige Themen zur Verfügung zu stellen. Allerdings muss dann verhindert werden, dass etwa in der hochschulfreien Forschung die starken Leistungsträger auf Drittmittel-Forschung angesetzt werden, weil die ja Geld bringt, schwächere Leistungsträger aber gewissermaßen auf die "freie" Forschung abgeschoben werden.

Zur Industrieforschung und -entwicklung ist anzumerken, dass bei EADS momentan offensichtlich sehr kurzfristige Ziele für die Umsetzung in Produkte bestehen. Das schlägt sich auch bei den von der Industrie beeinflussten Forschungsarbeiten an den Hochschulen und bei der hochschulfreien Forschung (DLR) nieder. Natürlich müssen die in den vergangenen Dekaden bei mehreren EADS-Projekten angefallenen Zusatzkosten, die teilweise deutlich höher waren als die veranschlagten Rückstellungen, "verdaut" werden. Die Ursachen der Zusatzkosten lagen aber nicht nur bei Managementfehlern, internen Firmenstrukturen und Kommunikationsproblemen, sondern bei einigen Produkten auch bei nicht hinreichender technologischer Vorbereitung. Das gilt sowohl für Hardware-, als auch für Prozesstechnologien.

8.9 Empfehlungen zur Hochschulausbildung

Nachdem das erst in den USA zu beobachten war, ist es jetzt auch in Europa so, dass die Motivation junger Leute, einen technischen Beruf zu ergreifen, nachlässt. Der Einsicht, dass die Motivierung bereits in der Schule, wenn nicht schon im Kindergarten beginnen muss, ist nichts hinzuzufügen. Bezüglich der Luftfahrtbranche haben EADS, BDLI und DLR eine sehr begrüßenswerte Reihe von Aktivitäten entwickelt. Ausschreibungen und Preise reichen von "Ideenflug" (EADS) und "Juri" (BDLI) bis zum gut dotierten Promotionspreis "Fly your ideas" (Airbus).

Die Hochschulausbildung selbst ist überwiegend durch die Differenzierung der Disziplinen geprägt. Ob dieses im jetzigen Umfang für die Zukunft zweckmäßig ist, muss hinterfragt werden.

Die zuweilen von der Industrie erhobene Forderung, die Lehre des klassischen Flugzeugbaus zugunsten anderer Gebiete, wie zum Beispiel der Informationswissenschaften, zurückzufahren, ist zurück zu weisen. Für einen Teil der Studierenden wäre es sogar zweckmäßig, mehr generalistisch als Flugzeugbauer ausgebildet zu werden.

Andererseits würde die in dieser Denkschrift empfohlene Änderung der Definitions- und Entwicklungsmethodik auch einen anderen Ausbildungsgang verlangen, da diese sich ganz wesentlich auf numerische Simulations- und Optimierungsmethoden (Virtuelles Produkt) stützt.

Ein Ausbildungsgang "Das Virtuelle Flugzeug" müsste etwa enthalten:

1. Prozesstechnologien:

- disziplinäre und multidisziplinäre
 - physikalische Modellbildung,
 - diskrete numerische Methoden.
- Informations- and Kommunikations-Technologien.

2. Produkt-Technologien (generalistische Aspekte des Flugzeugbaues).

3. System-Technologien (Flugkontrollsystem, Avionik, Grundsysteme, ...).

Generell wird empfohlen, mehr Wert zu legen auf Erfahrung und Wissensumfang des Lehrkörpers in Hinsicht auf das Gesamtsystem "Flugzeug". Die Verbesserung der Kommunikation zwischen Hochschulen und Industrie ist unbedingt erforderlich, allerdings dürfen keine kurzfristigen Denkweisen im Vordergrund stehen. Die Lehrtätigkeit von Industrieangehörigen sollte ermutigt und nicht, wie vielfach bisher, nur geduldet werden.

9 Abschließende Bemerkungen

Die deutsche Luftfahrtbranche – die Flugzeugindustrie, die hochschulfreie Luftfahrtforschung und die Hochschullehre und -forschung – ist eine weltweit anerkannte und in vielen Bereichen führende Branche. Mit dieser Denkschrift möchten die Aeronautischen Senioren München Anregungen geben, von denen sie glauben, dass damit die ökonomische und die ökologische Potenz der Branche in Zukunft noch gestärkt werden kann. Die Anregungen haben sich aus den Erfahrungen der ASM-Mitglieder ergeben. Dass sie zum Teil kritisch sind, ist durch die individuellen Erfahrungen begründet und die Sorge um die künftige richtige Positionierung der Branche.

10 Die Mitglieder der Aeronautischen Senioren München, die an dieser Denkschrift mitgewirkt haben

Dr.-Ing. H. Bansemir (im Ruhestand), Flottillenadmiral a.D. W. Engelmann, Dipl.-Ing. M. Feuersenger (im Ruhestand), Dipl.-Ing. W. Heinzerling (im Ruhestand), Prof. Dr.-Ing. habil. E.H. Hirschel (im Ruhestand), Dipl.-Ing. F. Müller (im Ruhestand), Dipl.-Phys. H. Niedzballa (im Ruhestand), Oberst i.G. i.R. M. Purucker, Prof. Dr.-Ing. W. Staudacher (im Ruhestand), Dipl.-Ing. G. Thalhammer (Pilot), Prof. Dr.-Ing. habil. O. Wagner (im Ruhestand), Dr.-Ing. C. Weiland (im Ruhestand).

Literatur

- [1] E.H. Hirschel, H. Prem, G. Madelung (Hrsg.): Luftfahrtforschung in Deutschland. Bernard & Graefe Verlag, Bonn, 2001.
- [2] G. Bridel: What Future for the European Combat Aircraft Industry - A Death Foretold? CEAS Quarterly Bulletin, April 2012, pp. 13 -15.
- [3] H. Trischler: Luft- und Raumfahrtforschung in Deutschland 1900 - 1970, Politische Geschichte einer Wissenschaft. CampusVerlag, Frankfurt/New York, 1992.
- [4] Statistisches Bundesamt Deutschland. www.destatis.de, 2012.
- [5] H. Mensen: Planung, Anlage und Betrieb von Flugplätzen. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2009.
- [6] H.A. Niedzballa, D. Schmitt: Comparison of the Specific Energy Demand of Aeroplanes and Other Vehicle Systems. J. Aircraft Design, Vol. 4, 2001, pp. 163-178.
- [7] Ch. Schreyer, C. Doll, M. Maibach, R. Zandonella, H. Lückge: Verkehrsträgeranalyse - Kosten, Erträge und Subventionen des Strassen-, Schienen- und Luftverkehrs in Deutschland. ILFD-INFRA-SISI-final-07-07-10.doc, Zürich/Karlsruhe, 2010.
- [8] N.N.: Annual Safety Review 2010. European Aviation Safety Agency (EASA), Köln, 2011.
- [9] W. Babisch: Quantifizierung des Einflusses von Lärm auf Lebensqualität und Gesundheit. UMID: Umwelt und Mensch i Informationsdienst, Ausgabe 01, 2011, pp. 28-36.
- [10] <http://www.umweltbundesamt.de/laermprobleme/ulr.html>.
- [11] P. Butterworth-Hayes: Flying Gets Personal in Europe. Aerospace America, July/August 2010.
- [12] European Personal Air Transport System (EPATS): www.epats.eu, 2006.
- [13] The Puffin, A Passion for Personal Flight: www.nasa.gov/topics/technology/features/puffin.html, 2010.
- [14] D. Schmitt, R. Metzger: ECOLIFTER - Ein Luftfrachtkonzept zur Entlastung des bodengebundenen Güterverkehrs. Expertenforum Alternativen im Güterfernverkehr Prien, 15. Januar 2002.
- [15] R. von Mises: Fluglehre. Julius Springer, Berlin 1926.
- [16] E.H. Hirschel: Luftfahrtforschung in der Bundesrepublik. In: H. Trischler, K.-U. Schrogel: "Luft und Raumfahrt in Deutschland". Campus Verlag, Hannover, 2007, pp. 295-319.
- [17] E.H. Hirschel: Towards the Virtual Product in Aircraft Design? In: J. Periaux, M. Champion, J.-J. Gagnepain, O. Pironneau, B. Stoufflet, P. Thomas (Hrsg.): "Fluid Dynamics and Aeronautics New Challenges". CIMNE Handbooks on Theory and Engineering Applications of Computational Methods, Barcelona, 2003, pp. 453-464.
- [18] E. Dautriat: The "Clean Sky Project". Air and Space Academy, Newsletter No. 72, Toulouse, June 2011.
- [19] J. Banke: Flying Farther on Less. Aerospace America, July/August 2011.
- [20] N.N.: Quieter Flight: A Balancing Act. Aerospace America, March 2011.
- [21] E.H. Hirschel: Aerodynamik - vom schallnahen zum Hyperschallflug. In: E.H. Hirschel, H. Prem, G. Madelung (Hrsg.): "Luftfahrtforschung in Deutschland", Bernard & Graefe Verlag, Bonn, 2001, pp. 366-378.

- [22] X. Hafer: Die Entwicklung der Senkrechtstarttechnik. In: E.H. Hirschel, H. Prem, G. Madelung (Hrsg.): "Luftfahrtforschung in Deutschland", Bernard & Graefe Verlag, Bonn, 2001, pp. 351-363.
- [23] H. Försching: Aeroelastik - neue Herausforderungen und Problemstellungen. In: E.H. Hirschel, H. Prem, G. Madelung (Hrsg.): "Luftfahrtforschung in Deutschland", Bernard & Graefe Verlag, Bonn, 2001, pp. 521-536.
- [24] M. Westlake: Electrifying Flight. Aerospace America, October 2011.
- [25] H. Hertel: Struktur, Form, Bewegung. Otto-Krausskopf-Verlag, Mainz, 1963.
- [26] H. Focke: Zur Geschichte der Nachstrompropulsion. Steinkopff-Verlag, Darmstadt, 1970.
- [27] Future Seaplane Traffic (FUSETRA): www.fusetra.eu, 2006.
- [28] C.-C. Rossow: Aerodynamics - A Discipline Swept Away? The Aeronautical Journal, Vol. 114, No. 1160, pp. 599-609.
- [29] D.M. Bushnell: Aeronautics: Frontiers of the Imaginable. Aerospace America, September 2012.
- [30] N.N.: Airports and their Challenges. Air and Space Academy, Dossier 33, Toulouse, 2010.
- [31] D.E. Koelle, P. Sacher, H. Grallert: Deutsche Raketenflugzeuge und Raumtransporter-Projekte. Bernard & Graefe Verlag, Bonn, 2007.
- [32] E.H. Hirschel, C. Weiland: Design of Hypersonic Flight Vehicles: Some Lessons from the Past and Future Challenges. CEAS Space J., Vol. 1, No. 1, 2011, pp. 3-22.
- [33] B. Kröplin, S. Rudolph: Entwurfsgrammatiken - Ein Paradigmenwechsel? Der Prüflingenieur, 2005, pp. 34-43.
- [34] D. Böhnke, A. Reichwein, S. Rudolph: Design Language for Airplane Geometries Using the Unified Modeling Language. Proc. ASME 2009 Int. Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2009, San Diego, USA, August 30 to September 2, 2009. ASME-paper DETC2009-87368, 2009.
- [35] E.H. Hirschel, C. Weiland: Issues of Multidisciplinary Design. In E.H. Hirschel, E. Krause (eds.): "100 Volumes of 'Notes on Numerical Fluid Mechanics'". Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, NNFM 100, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 2009, pp. 255-270.
- [36] E.H. Hirschel, H.G. Hönlinger: Höchstleistungsrechnen in der Luftfahrtindustrie und -forschung. Memorandum, DLR WB-AE, Göttingen, 1996.
- [37] H. Bansemir, S. Emmerling: Substantiation and Damage Tolerance Evaluation of Fiber Composite Helicopter Components. RTO/AGARD Applied Vehicle Technology Panel: "Application of Damage Tolerance Principles for Improved Airworthiness of Rotorcraft". Corfu, Greece, 1999.
- [38] N.N.: Damage Tolerance and Fatigue Evaluation of Rotorcraft Structures. NPRM No. 09-12 (Notice of Proposed Rulemaking) for FAR 27/29.573, Federal Register/Vol. 75, No. 3/January 6, 2010.
- [39] D. Schulz: Development of the A300 Fin in Modern Composite Fiber Construction. MBB Unternehmensbereich Hamburg, ICAS-80-16.2, 1980.
- [40] H. Bansemir: Krafteinleitung in versteifte orthotrope Scheiben. Ing. Archiv, Bd. 42, H.2, 1973.
- [41] E.H. Hirschel, P. Krammer, W. Uhse, F. Hormann, H. Kuczera, P.W. Sacher: Technologietransfer-Potentiale des BMFT-Förderkonzeptes Hyperschalltechnologie. DGLR 92-03-087, 1992, auch Dasa LME202/S/Pub/0505, 1992.

