

# EINE PERSPEKTIVE FÜR DIE ALLGEMEINE LUFTFAHRT MIT SCHWERPUNKT FLUGSTEUERUNG UND AVIONIK

G. Konrad, R. Reichel

Institut für Luftfahrtsysteme, Pfaffenwaldring 27, D-70569 Stuttgart

(gernot.konrad@ils.uni-stuttgart.de; reinhard.reichel@ils.uni-stuttgart.de)

Die Forschung am Institut für Luftfahrtsysteme (ILS) der Universität Stuttgart befasst sich schwerpunktmäßig mit den mannigfaltigen Aspekten zukünftiger Avioniksysteme und absolut sicherheitskritischer Fly-by-Wire-Systeme. Ergänzend zu diesen Themen führte das ILS in den letzten sechs Jahren signifikante Neuentwicklungen im Bereich fahrzeugumfassende X-by-Wire-Systeme durch, die in der Lage sind, gleichzeitig eine Vielzahl komplexer sicherheitskritischer Fahrerassistenzfunktionen auszuführen. Dabei zeigte sich, dass X-by-Wire-Systeme für Automobile in mehrfacher Hinsicht ähnlichen Anforderungen unterliegen wie Fly-by-Wire-Systeme für zukünftige Flugzeuge der Allgemeinen Luftfahrt (General Aviation, GA). Vergleichbare Anforderungen sind beispielsweise Sicherheit, Kosten oder die rein elektrische Energieversorgung. Zudem verfügt der Fahrer bzw. der Pilot kaum über Systemwissen und ist auf fehlerbedingte Funktionsdegradationen nicht ausgebildet. Dies führte zu folgenden zentralen Fragen:

1. Automobile weisen ohne einen hohen Ausbildungsstand des Fahrers höchste Missionszuverlässigkeit (Allwettertauglichkeit, Nachfahrtauglichkeit, usw.) auf. Die Frage ist woran das liegt und ob dies für Privatpiloten mit einem geeigneten Fly-by-Wire-Ansatz auch mit Flugzeugen der GA möglich wäre. Anders formuliert könnte die Frage lauten: Kann das Fliegen mit Fly-by-Wire (FbW) unter Sichtflugbedingungen (VMC) und unter Instrumentenflugbedingungen (IMC) in jeder Hinsicht für den Piloten einfach und sicher gestaltet werden?
2. Wenn ja: Können damit in Zukunft Flugzeuge der GA den Individualverkehr, der heute fast ausschließlich vom Automobil getragen wird, sinnvoll ergänzen und ist eine derartige Ergänzung überhaupt notwendig?
3. Wenn ja: Was muss getan werden damit Privatpiloten Flugzeuge der GA sowohl unter VMC als auch unter IMC einfach und sicher steuern können? Wie könnte hierzu eine geeignete Steuerungsphilosophie aussehen?
4. Welche Funktionen wären dafür notwendig und müssten in einer FbW-Plattform implementiert sein?
5. Welche Anforderungen ergeben sich daraus an die FbW-Plattform?

Ziel ist es, auf die Fragen 1 bis 5 eine Antwort zu geben. Dies geschieht anhand der Darlegung folgender Punkte:

- Abschätzung der Entwicklung des zukünftigen Bedarfs an Individualluftverkehr.
- Herleitung zentraler Anforderungen an ein geeignetes Individualflugzeug.
- Herleitung von schwerpunktmäßig funktionellen Anforderungen an Flugzeugsysteme zukünftiger Individualflugzeuge mit dem Fokus auf geeigneten Easy Handling Qualities (EHQ).
- Skizzieren eines möglichen Easy Handling Systems (EHS) für Individualflugzeuge.
- Ermittlung der Kernanforderungen an eine FbW-Plattform für zukünftige Individualflugzeuge.

## 1. EINLEITUNG

### 1.1. Betrachtete Flugzeugkategorien

Die »Allgemeine Luftfahrt« stellt in diesem Beitrag ein zentrales Thema dar. Dazu ist es notwendig den Begriff »Allgemeine Luftfahrt« kurz zu erläutern. Die ICAO definiert: „General aviation operation: An aircraft operation other than a commercial air transport operation or an aerial work operation.“ [1] Die Allgemeine Luftfahrt kann demnach als alle Luftverkehrsarten umfassende Flüge mit Ausnahme von Charter-, Linien, Militär- und Staatsflügen verstanden werden.

Allgemeine Luftfahrt			
Privatluftfahrt (z.B. private Reisende, Luftsport oder Rundflüge)	Flugausbildung	Geschäftsluftfahrt (z.B. Werksflugverkehr, Lufttaxi oder Paket- und Frachtflugdienst)	Luftrettung (z.B. Rettungs- hubschrauber oder Flugambulanz)

BILD 1. Einteilung der Allgemeinen Luftfahrt

Die GA beinhaltet unter anderem, wie BILD 1 zeigt, Schulungsflüge, die Sportfliegerei, Geschäfts- und Privatflüge, unter VMC und IMC. Über die Art des eingesetzten Luftfahrzeugs sowie über die Anzahl der Fluggastsitze und die maximale Abflugmasse wird von der ICAO keine Aussage getroffen. Den weitaus größten Teil der GA stellen jedoch, wie in TAB 1 zu sehen ist, Flächenflugzeuge der Kennzeichen-klassen »E« und »K« dar.

	Kennzeichenklasse								
	A: Flugzeuge über 20 t	B: Flugzeuge über 14 bis 20 t	C: Flugzeuge von 5,7 bis 14 t	E: Einmotorige Flugzeuge unter 2 t	F: Einmotorige Flugzeuge von 2 bis 5,7 t	G: Mehrmotorige Flugzeuge unter 2 t	I: Mehrmotorige Flugzeuge von 2 bis 5,7 t	H: Drehflügler (Hubschrauber)	K: Motorsegler
Bestand 2007	702	51	200	6705	120	230	417	731	2824

TAB 1. Luftfahrzeugbestand in der BRD im Jahr 2007 [2]

Aufgrund der vergleichsweise geringen Reisefluggeschwindigkeiten und kleinen Transportkapazitäten werden Motorsegler hier nicht weiter betrachtet. Der Fokus dieses Beitrags liegt auf Flugzeugen der Kennzeichenklassen E, F, G und I. Die Flugzeuge dieser Kennzeichenklasse stellen den bei weitem größten Teil der so genannten Individualkomponente des Luftverkehrs dar. Die diesem Bereich zugehörigen Flugzeuge werden deshalb im Weiteren als Individualflugzeuge bezeichnet.

## 1.2. Steuerung heutiger Individualflugzeuge

Bei allen heute im Einsatz befindlichen Individualflugzeugen steuert der Pilot das Flugzeug weitgehend über eine mechanische Steuerung. Durch diese Art der direkten Steuerung weist jeder Flugzeugtyp ein für ihn charakteristisches Steuerverhalten auf, welches von Flugschülern durch eine intensive Ausbildung erlernt bzw. sogar von erfahrenen Piloten innerhalb einer flugzeugspezifischen Einweisung trainiert werden muss. Für das Einhalten der Flugbereichsgrenzen ist alleine der Pilot verantwortlich. Warneinrichtungen zur Einhaltung der minimalen Geschwindigkeit sind teilweise vorhanden. Sie greifen allerdings nicht direkt in die Steuerung ein, sondern machen durch akustische und/oder optische Warnungen den Piloten auf die kritische Situation aufmerksam. In jedem Fall muss der Pilot reagieren, wodurch er in Stresssituationen oft überfordert ist. Nach [3] sind derartige Situationen oft Ursache für Flugunfälle.

Autopilotensysteme, sofern vorhanden, greifen über eigene Stellmotoren in die mechanische Steuerkette ein und führen das Flugzeug automatisch in bis zu drei Steuerachsen. Die Autorität des Autopiloten ist jedoch sowohl in Kraft, Dynamik als auch Weg begrenzt. Die Autopiloten von heutigen Individualflugzeugen decken somit nicht den kompletten Flugbereich ab. Im Fehlerfall schaltet sich der Autopilot selbst ab, oder er muss vom Piloten deaktiviert werden. Wenn sich im Fehlerfall der Autopilot nicht mehr abschalten lässt, muss der Pilot, nach [4], diesen über die zentralen Steuerorgane überdrücken können.

## 1.3. Heutige Nutzung von Individualflugzeugen

Gerade Echo-Flugzeuge (Flugzeuge der Kennzeichenklasse E), welche ca. 60 % aller Flächenflugzeuge in Deutschland ausmachen, werden nur in wenigen Fällen als Individualverkehrsmittel verwendet. Die Mehrzahl der Piloten ist in Vereinen organisiert und teilt sich dort zur Verfügung stehende Vereinsflugzeuge. Auf Grund ihres Charakters als Hobby findet die Privatfliegerei heute vorwiegend an Wochenenden oder Feiertagen und fast ausschließlich bei gutem Wetter und am Tage statt. Die Flüge dauern im Durchschnitt nur eine Stunde und enden oft am Startflugplatz. Bei der Durchführung dieser Flüge ist meist der Weg das Ziel. Damit entspricht die Verwendung des Individualflugzeugs heute mehr der eines Sportgerätes (Flugsport). Nur in wenigen Fällen werden Individualflugzeuge tatsächlich als Individualverkehrsmittel eingesetzt. Einige Gründe dafür lassen sich auf dem ersten Blick erkennen:

- Der Einsatz von Echo-Flugzeugen ist stark wetterabhängig (üblicherweise gibt es keine IFR-Instrumentierung und keine Enteisungsanlagen)

- Echo-Flugzeuge können mangels geeigneter Ausrüstung (z.B. keine Landescheinwerfer) und Flugplatzausstattung oft nur bei Tage betrieben werden.
- Die Vorbereitung erfordert Gründlichkeit und viel Zeit.
- Die Flugdurchführung, insbesondere die Navigation auf Überlandflügen ist anspruchsvoll und verlangt eine hohe Konzentration vom Piloten.
- Die Einhaltung der Flugbereichsgrenzen ist gerade bei schlechterem Wetter sehr anspruchsvoll.

Daraus resultieren sogleich die ersten beiden zentralen Fragen auf die es eine Antwort zu finden gilt:

1. Gibt es überhaupt einen Bedarf dafür, die hier betrachteten Individualflugzeuge in Zukunft stärker als echte individualverkehrsmittel zu nutzen?
2. Wenn ja, welche Eigenschaften müssen dafür geeignete Individualflugzeuge aufweisen?

## 2. ERMITTLUNG DES ZUKÜNFTIGEN BEDARFS AN INDIVIDUALVERKEHR

### 2.1. Mobilitätsbedarf der Gesellschaft

Die gegenseitige Abhängigkeit zwischen der wirtschaftlichen Prosperität einer Gesellschaft und ihres wachsenden Mobilitätsbedarfs bzw. steigenden Verkehrsaufkommens war in der Vergangenheit sehr hoch. So war das wirtschaftliche Wachstum in Deutschland in den Jahren zw. 1980 und 2005 begleitet von einer parallelen Zunahme der Gesamtverkehrsleistung. [5] Die Verteilung des Mobilitätsbedarfs auf die unterschiedlichen Verkehrsmittel wird in [6] »Modal Split« genannt und ist die Folge des Mobilitätsverhaltens der Menschen einerseits und des Verkehrsangebots andererseits. Der Modal Split bildet sich jedoch, wie BILD 2 zeigt, nicht gleichmäßig auf die Verkehrsleistung der Verkehrsmittel ab.

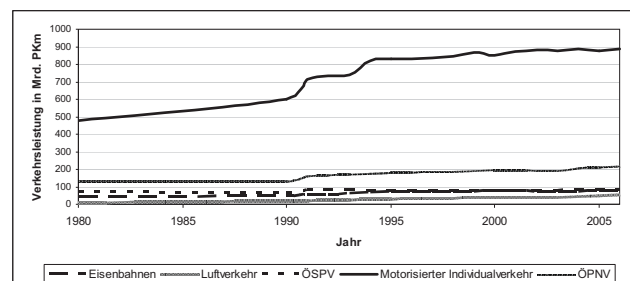


BILD 2. Entwicklung der Verkehrsleistung nach [5]

Nach [5] stellt das Automobil den bei weitem größten Anteil am motorisierten Individualverkehr (MIV) dar.

### 2.2. Die Rolle der Geschäftsluftfahrt

In [5] wurde die Allgemeine Luftfahrt, also die Individualkomponente der Luftfahrt, nicht berücksichtigt. Jedoch ist in den letzten Jahren ein anhaltendes, starkes Wachstum in der Geschäftsluftfahrt zu beobachten gewesen. Gemäß [7] wächst der Geschäftsflugverkehr in Europa doppelt so schnell wie der gesamte Luftverkehr. So gab es im Jahr 2005 bereits 22 % mehr Geschäftsflüge als im Jahr 2001. Dies ist ein Indiz für einen hohen Bedarf an schnellen Individualverkehrsmitteln. Als Kernproblem der Geschäftsluftfahrt erweist sich jedoch ihre Exklusivität. Dies sei an folgenden Punkten erläutert:

- Die meisten Geschäftsreiseflugzeuge sind, wie Verkehrsflugzeuge, gemäß den hohen Standards nach EASA CS-25 zugelassen und entsprechen auch aus operationeller Sicht dem Stand der Linienluftfahrt, da sie oft gemäß EU-OPS 1, dem Standard der weltweit operierenden Fluggesellschaften, betrieben werden. [8] Dies verursacht sehr hohe Betriebskosten.
- Viele Nutzer von Geschäftsreiseflugzeugen nutzen Flugtaxi oder bevorzugt Flugzeugcharter. Dies ist kostengünstiger, erfordert allerdings das Vorausplanen und Reservieren von Flugzeugen und Piloten. Aus diesem Grund ist die spontane und kostengünstige Nutzung von Geschäftsreiseflugzeugen, ähnlich wie bei Autotaxis, nicht gegeben.
- Geschäftsreiseflugzeuge werden in den allermeisten Fällen nach Instrumentenflugregeln betrieben. [7] Dies macht sie vom Wetter unabhängig. Gleichzeitig erfordert ein Allwetterbetrieb jedoch die dafür notwendige Infrastruktur, wie z.B. Instrumentenlandesysteme. Dies zwingt private Geschäftsreiseflugzeuge, aber auch Lufttaxi und Flugzeugvercharter, sich vorwiegend auf großen Flugplätzen anzusiedeln. Dies schränkt die Start- und Zielgranularität von Geschäftsreiseflugzeugen stark ein.

### 2.3. Absehbare Probleme im Individualverkehr

Das Ergebnis einer Analyse des Modal Splits der Verkehrsmittel über die zurückgelegten Entfernungen, wie sie in [9] und [10] durchgeführt wurden, zeigt, dass bei Entfernungen unter ca. 400 km das Automobil und bei Reisen mit Entfernungen ab ca. 600 km das Verkehrsflugzeug dominiert. Im Mittelstreckenverkehr teilen sich die Bahn, das Automobil und das Verkehrsflugzeug die Anteile am Gesamtverkehr zu ca. je einem Drittel. Die Reisen von dezentralen Regionen in ein Ballungszentrum oder umgekehrt sowie die Reisen zwischen zwei dezentralen Regionen bleiben jedoch dabei häufig dem Automobil vorbehalten. Vergleicht man die einzelnen Verkehrsbereiche miteinander, so spielt nach [11] »Flexibilität« bei der Auswahl der Verkehrsmittel eine zentrale Rolle. Auf den Aspekt »Flexibilität« wird nur verzichtet, wenn er zu signifikanten Nachteilen wie deutlich höheren Reisezeiten führt, was bei Langstreckenreisen der Fall ist. Erreichen lässt sich eine hohe Reiseflexibilität heute im Wesentlichen nur durch das Automobil, also dem Individualverkehrsmittel der Straße. Diesem sind allerdings Wachstumsgrenzen gesetzt:

- Zum einen durch eine maximale Verkehrsdichte und
- zum anderen durch das Miteinbeziehen immer weiter voneinander entfernter dezentraler Regionen, also einer anwachsenden Reisedistanz.

Gerade an dem Verlangen nach einem hohen Grad an Flexibilität und längerer möglicher Reisedistanzen lässt sich ein Bedarf für ein das Automobil ergänzendes Individualverkehrsmittel ableiten.

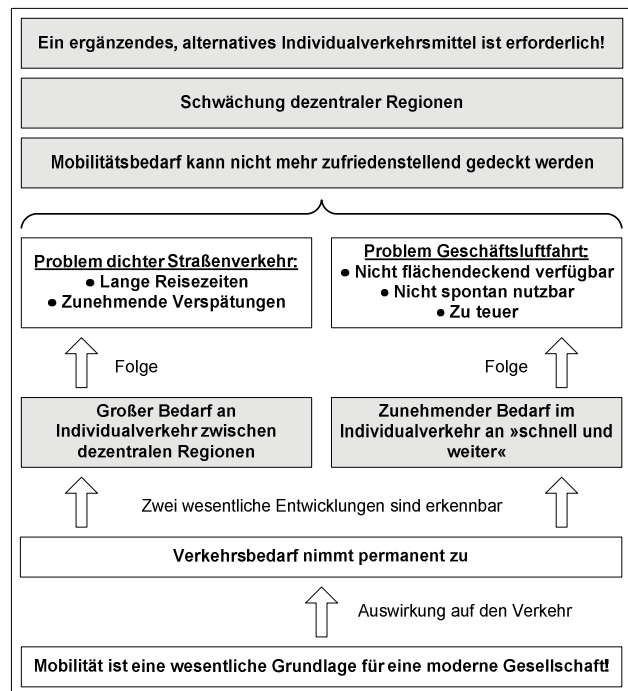


BILD 3. Auswirkungen des Mobilitätsbedarfs

### 2.4. Die Privatluftfahrt als möglicher Ausweg

Natürlich drängt sich einem begeisterten Luftfahrer sofort der Gedanke auf, den oben dargelegten Zusatzbedarf an Individualverkehr durch die Privatluftfahrt, dem größten Bereich der Allgemeinen Luftfahrt, zu decken. Dafür gibt es eine Vielzahl von Gründen. Einige davon sind:

- Hohe Reisegeschwindigkeit,
- keine Reisezeitverzögerung während des Fluges,
- hohe Flugplatzdichte in der Allgemeinen Luftfahrt und
- im Vergleich zur Geschäftsluftfahrt um ein Vielfaches geringere Kosten.

Jedoch hat die Privatfliegerei auch einige erhebliche Nachteile, wie z.B.:

- Starke Abhängigkeit von Wetter und Tageslicht,
- schlechte verkehrstechnische Anbindungen von Flugplätzen der Allgemeinen Luftfahrt,
- hoher Aufwand für die Flugvorbereitung und
- hoher Aufwand und Kosten für den Erwerb und den Erhalt einer Fluglizenz.

Die o.a. Punkte schränken den ganz wesentlichen Aspekt »Flexibilität« von Individualflugzeugen signifikant ein. Wenn Individualflugzeuge in Zukunft für jedermann zugänglich gemacht werden sollen, muss die Handhabung dieser Flugzeuge unter allen Wetterbedingungen und Lichtverhältnissen drastisch vereinfacht werden, ohne damit an Sicherheit einzubüßen. Eine ergänzende Alternative zum Straßenverkehr werden Individualflugzeuge nur dann darstellen können, wenn für das Fliegen keine umfangreichen und teuren Ausbildungen sowie zyklisches Training erforderlich sind.

Im Folgenden werden einzelne für ein Individualverkehrsmittel wesentliche Aspekte, die für Echo-Flugzeuge als flexibles Individualverkehrsmittel von Bedeutung sind, dargelegt und jeweils entsprechende Anforderungen bzw. Lösungsansätze erörtert.

### 3. ZENTRALE ANFORDERUNGEN AN ZUKÜNFTIGE INDIVIDUALFLUGZEUGE

Um Flugzeuge der GA, im speziellen Echo-Flugzeuge, bzgl. ihrer Eignung als ergänzendes Individualverkehrsmittel besser beurteilen zu können, wurden verschiedene Anforderungen an Individualverkehrsmittel erarbeitet. Basis hierfür war das Automobil als praktisch einziger Träger des heutigen Individualverkehrs. Die wesentlichen Aspekte zentraler Anforderungen an Individualverkehrsmittel lassen sich wie folgt unterteilen:

- Leistung
  - Einsatzradius
  - Transportkapazität
  - Reisezeit/Reisegeschwindigkeit
- Betriebskosten
- Umweltverträglichkeit
  - CO<sub>2</sub>-Emission
  - Lärmemission
- Nutzungsaspekte
  - Grad der Flexibilität
  - Typischer Fahrer bzw. Pilot
  - Komfort
  - Zuverlässigkeit
- Sicherheit

Im Folgenden werden die Punkte Reisegeschwindigkeit, Grad der Flexibilität und Sicherheit dargestellt.

#### 3.1. Reisezeit/Reisefluggeschwindigkeit

Anhand von mehreren am ILS durchgeführten Beispielflügen wurde die Gesamtreisezeit für ein typisches Echo-Flugzeug ermittelt und den Reisezeiten unter Nutzung eines Pkw gegenüber gestellt. Hierzu wurden die Reiseabläufe der beiden Verkehrsmittel, wie in [9], in fünf Phasen unterteilt. Als Nachteil hat sich hier beim Echo-Flugzeug vor allem die Phase der langen Vorbereitungszeit (ca. 50 Minuten [3]) erwiesen. Diese ist geprägt durch die eigentliche Flugvorbereitung außerhalb des Flugzeuges, wie Routenplanung, Wetterberatung (METAR, TAF), Studium von Luftfahrerinformatoren (NOTAM), Massen- und Schwerpunktberechnung und den Flugzeugaußenkontrollen sowie der Vorbereitung im Flugzeug, wie dem Einstellen der benötigten Funkfrequenzen, Durchführung von System- und Motorchecks usw.

Pkw	Entfernung [km]	150	200	300	400	500	600	700	800
	Reisegeschw. [km/h]	94	99	105	109	111	112	113	114
	Reisedauer [h]	1,60	2,01	2,85	3,68	4,51	5,35	6,18	7,01
Fza/Pkw	Reisedauerverhältnis	1,26	1,06	0,84	0,72	0,65	0,59	0,56	0,53
Fza	Entfernung [km]	140	175	245	315	385	455	525	595
	Reisegeschw. [km/h]	70	82	102	119	132	143	153	161
	Reisedauer [h]	2,00	2,13	2,39	2,65	2,91	3,17	3,43	3,69

Möglicher Reisekorridor

TAB 2. Sinnvoller Reisekorridor für Echo-Flugzeuge

BILD 4 verdeutlicht den Einsatzbereich innerhalb dessen zukünftige Individualflugzeuge gegenüber dem Automobil deutliche Reisezeitvorteile erbringen sollen.

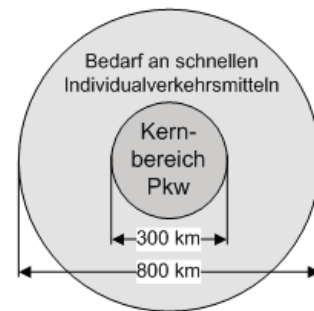


BILD 4. Bedarf schneller Individualverkehrsmittel

Um dies zu erreichen müssen Individualflugzeuge zukünftig jedoch folgende Anforderungen erfüllen:

- Reisefluggeschwindigkeit mindestens 270 km/h.
- Die Flugzeugsysteme sollen weitgehend selbstständig die Flugtauglichkeit des Flugzeuges feststellen. Es sollen keine Kontrollen des Piloten wie Freigängigkeit der Ruder, Ölstand, Treibstoffmenge, Funktionstest der Bremsen, Motorentestlauf usw. erforderlich sein.
- Die Flugzeugsysteme sollen weitgehend selbstständig die Flugvorbereitung übernehmen. Der Pilot soll nur für das Routenmanagement verantwortlich sein. Tätigkeiten wie das Einholen von METAR, NOTAM, Masse- und Schwerpunktberechnungen, Streckenplanung, usw. sollen automatisiert ablaufen.

#### 3.2. Grad der Flexibilität

Der Grad der Flexibilität gibt an, wie ausgeprägt die Flexibilität eines Individualverkehrsmittels ist. Hierzu wird die Flexibilität unterteilt in:

- Geografische Flexibilität; geprägt durch eine hohe Start-/Zielgranularität; große Anzahl möglicher Routen und die Möglichkeit der jederzeitigen Zieländerung und
- zeitliche Flexibilität, geprägt durch einen jederzeitigen Reisebeginn und eine jederzeitige Reiseunterbrechung und Wiederaufnahme.

Dem Automobil wird in [11] ein sehr hoher Grad an Flexibilität bestätigt. Heutige Echo-Flugzeuge hingegen gelten als nicht hinreichend flexibel. Die wesentlichen Probleme sind:

- Mangelnde Allwettertauglichkeit,
- eingeschränkte Nachtflugfähigkeit und
- Einschränkungen aufgrund der Infrastruktur.

Im Wesentlichen können Echo-Flugzeuge unter drei verschiedenen Bedingungen betrieben werden. Dies sind:

- Sichtflugbedingungen bei Tag,
- Sichtflugbedingungen bei Nacht und
- Instrumentenflugbedingungen.

Diese drei Betriebsarten führen zu folgenden ganz unterschiedlichen Problemstellungen in der GA:

- Der Betrieb von Flugzeugen nach Sichtflugregeln (VFR) ist nur möglich wenn VMC vorherrschen.
- Da die Mehrheit der Echo-Flugzeuge nach VFR betrieben wird folgt nach [12], dass fast 70 % aller Flugauffälle der geplanten Flüge auf schlechtes Wetter zurückzuführen sind.
- Um in Deutschland Nachtsichtflüge durchführen zu dürfen, bedarf es einer gesonderten Ausbildung.



- In der Bundesrepublik verfügen nur ca. 17 % der Privatpiloten über eine Nachtflugberechtigung. Außerdem ermöglichen nur 117 der 447 Flugplätze in Deutschland Starts und Landungen bei Nacht. [13]
- Bei geplanten Flügen nach Instrumentenflugregeln (IFR) sind die wetterbedingten Flugausfälle deutlich geringer als bei VFR [12]. Um Flüge nach IFR durchführen zu dürfen, muss der Pilot jedoch im Besitz einer Instrumentenberechtigung (IR) sein. Dies trifft in der BRD nur auf ca. sechs % der Privatpiloten zu. Außerdem sind in Deutschland nur 58 Flugplätze für eine Instrumentenlandung geeignet. [13]

Um diesen Problemen entgegen zu wirken müssen zukünftig folgende Anforderungen erfüllt sein:

- Individualflugzeuge sollen für Piloten mit geringer Qualifikation weitgehend wetterunabhängig, bei Tag und Nacht einsetzbar sein.
- Der Betrieb des Individualflugzeuges soll auch auf Flugplätzen ohne Instrumentenlandesystem (ILS) möglich sein. Das Flugzeug soll weitgehend satellitengestützte Anflug- und Landeverfahren nutzen.

### 3.3. Sicherheit

Ebenso wie bei der Flexibilität soll die Sicherheit eines Individualflugzeugs an der Sicherheit im Straßenverkehr gemessen werden. Nach [14] waren in der BRD im Jahr 2004 ca. 45.000.000 Pkw für den Verkehr zugelassen. Deutschlandweit haben sich in demselben Jahr ca. 135.000 schwere Unfälle<sup>1</sup> ereignet. Daraus ergibt sich mit einer angenommenen durchschnittlichen Fahrzeit von 300 Stunden pro Jahr und Pkw [15] ca. ein schwerer Unfall pro 100.000 Fahrstunden. Dies bedeutet, dass die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit, eines schweren Unfalls mit einem Pkw, in Deutschland im Jahre 2004 pro Stunde kleiner war als  $1 \cdot 10^{-5}$ .

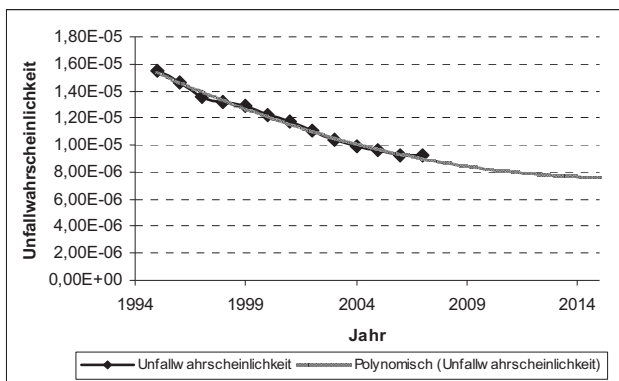


BILD 5. Unfallwahrscheinlichkeit mit Pkw nach [14]

BILD 5 zeigt, dass die Unfallwahrscheinlichkeit mit einem Pkw in Deutschland von 1994 bis 2004 stetig abgenommen hat. Geht man von einer ähnlichen Entwicklung der Unfallwahrscheinlichkeit in den nächsten Jahren aus, so ist für das Jahr 2014 von einer Auftretenswahrscheinlichkeit von schweren Unfällen von ca.  $7 \cdot 10^{-6}$  auszugehen.

Im Jahre 2004 gab es in der BRD insgesamt ca. 1,5

<sup>1</sup> Schwerer Unfall: Ein Unfall, der mindestens einen Schwerverletzten oder Getöteten oder einen Totalschaden des Verkehrsmittels zur Folge hat.

Unfälle pro 100 zugelassene Flugzeuge, [16]. Nimmt man eine durchschnittliche Flugstundenanzahl von 300 pro Flugzeug und Jahr an, so ergibt sich für Flugzeuge unter 2,0 t ca. ein Unfall pro 20.000 Flugstunden. Die Wahrscheinlichkeit in Deutschland mit einem Echo-Flugzeug einen schweren Unfall zu erleiden, beträgt damit pro Flugstunde ca.  $5 \cdot 10^{-5}$ . Diese Wahrscheinlichkeit ist um ca. den Faktor zehn höher als die Wahrscheinlichkeit pro Stunde in einen schweren Unfall mit einem Pkw verwickelt zu sein. In [17] wird die Auftretenswahrscheinlichkeit fataler Unfälle pro Flugstunde unter eingeschränkten Sichtverhältnissen bei einmotorigen Flugzeugen unter 2.722 kg sogar mit  $1 \cdot 10^{-4}$  angegeben. Damit sind Echo-Flugzeuge unsicherer als Automobile. Dies wird vermutlich nur deswegen akzeptiert, weil das Verkehrsaufkommen mit diesen Flugzeugen im Vergleich zum Pkw gering ist. Steigt dieses jedoch an, so wird man die Sicherheit an der des Straßenverkehrs messen müssen. Ein »Equivalent Level Of Safety« (ELOS) wird gelten müssen. Hier könnte für Echo-Flugzeuge künftig eine Auftretenswahrscheinlichkeit für schwere Unfälle von kleiner  $1 \cdot 10^{-5}$  pro Flugstunde gefordert werden.

## 4. FUNKTIONELLE ANFORDERUNGEN AN EIN EASY HANDLING SYSTEM

### 4.1. Synthese der Anforderungen aus Kapitel 3

Zusammenfassend ergeben sich folgende Anforderungen an die Handhabung zukünftiger Individualflugzeuge:

A1:	Der Pilot hat geringe Flugerfahrung und verfügt nur über einen PPL ohne IR.
A2:	Der Pilot soll die Mission unter VMC und IMC bei Tag und Nacht durchführen können.
A3:	Der Vorbereitungsaufwand außerhalb des Flugzeugs soll selbst für eine Mission unter IMC nur ca. 10 Minuten betragen.
A4:	Der Vorbereitungsaufwand im Flugzeug soll selbst für eine Mission unter IMC nur ca. 10 Minuten betragen.
A5:	Die Wahrscheinlichkeit eines schweren Unfalls pro Stunde mit dem Individualflugzeug unter IMC muss kleiner sein als $1 \cdot 10^{-5}$ .

Um diese Anforderungen erfüllen zu können, muss die Kompetenz des Piloten weitgehend an ein System übergeben werden. Ein solches System soll im Weiteren als Easy Handling System (EHS) bezeichnet werden.

### 4.2. Kernprobleme der Flugsteuerung/-führung bei heutigen Individualflugzeugen

Die hohen Anforderungen an die Missionsfähigkeit zukünftiger Individualflugzeuge, wie die Allwettertauglichkeit in Kombination mit den sehr hohen Sicherheitsanforderungen bei gleichzeitiger Forderung der Reduzierung von Ausbildungsaufwand und -kosten erscheinen zunächst als eher widersprüchlich. In der Vergangenheit wurde zur Erhöhung der Missionsfähigkeit und zur Reduzierung der Unfallraten in der Privatluftfahrt im Wesentlichen in drei Schritten vorgegangen:

1. Technische Verbesserungen an Zelle und Triebwerk,
2. Einführung neuer Flugzeugsysteme und
3. Höherer Ausbildungsstand der Piloten.

Diese Punkte führten letztlich aber zu immer mehr und nicht weniger Ausbildungsaufwand. Dies ist auch ein Kern-problem heutiger FbW-Steuerungen, wie sie bei modernen Verkehrsflugzeugen Anwendung finden. So wird unter anderem in [18] festgestellt wird, Folgendes: „... höherer Automatisierungsgrad verlangt eine höhere Qualifizierung und damit höheren Trainingsaufwand für das Personal. Die Gründe liegen auf der Hand:

- Im Störfall benötigt der Pilot tiefere Subsystemkenntnisse.
- Besonders bei Langstreckenpiloten verkümmern die manuellen fliegerischen Fähigkeiten (zur Landung), die bei Störfällen besonders gebraucht werden könnten.“ [8]

Der richtige Umgang mit Störfällen, wie die Degradation in das »Direct Law«, welches die Steuerflächen quasi proportional zu den Side-Stick-Ausschlägen verfährt, oder ein Triebwerksausfall, müssen deswegen von Piloten durch intensives Training erlernt werden.

Hier soll nun ein neuer Weg eingeschlagen. Nicht die Qualifikation der Piloten soll erhöht werden, sondern ein neuer Systemansatz soll die Handling Qualities (HQ) der Individualflugzeuge für Piloten sowohl unter VMC als auch unter IMC signifikant verbessern. Dies soll nicht nur die Ausbildungszeiten und -kosten reduzieren, sondern bei gleichzeitiger Erhöhung der Missionsfähigkeit auch die Unfallraten reduzieren.

Im Wesentlichen können die Aufgaben eines Piloten heutiger Echo-Flugzeuge in vier Ebenen unterteilt werden:

1. Flugplanung unter Berücksichtigung der:
  - Geografischen Gegebenheiten,
  - Luftraumgestaltung für den Überlandflug und über Flugplätzen,
  - Zuständigkeiten für Freigaben (ATC),
  - Luftfahrerinformatoren (NOTAM),
  - Wetterinformationen (TAF, METAR),
  - Leistungsvermögen des Luftfahrzeuges,
  - Treibstoffmenge,
  - Masse und Schwerpunkt sowie
  - Ausweichflugplätze.
2. Systemmanagement und Umgang mit Funktionsdegradationen:
  - Vor dem Flug:
    - Feststellen des Systemstatus der Flugzeugsysteme (z.B. Motorölstand),
    - Ermittlung der Funktionsbereitschaft (z.B. Triebwerkstestlauf),
    - Systemsteuerung zur Sicherstellung der korrekten Funktionsweise (z.B. Warmlaufen des Triebwerks) und
    - Einstellen (Programmieren) der Systeme.
  - Im Flug:
    - Systemüberwachung über Anzeigesysteme (z.B. Zylinderkopftemperatur),
    - Schutz der Systeme vor Überlastung (z.B. maximale Drehzahl des Triebwerks),
    - Systemanpassungen (z.B. Gemischverstellung oder Tankumschaltung),
    - Bedienung von Systemen (z.B. Funk und Navigationshilfen) und

- Durchführen von Notfallmaßnahmen bei Systemfehlern (z.B. Leistungsreduktion bei Turboladerüberhitzung oder Notlandung bei Triebwerksausfall).

3. Flugsteuerung und Flugbereichseinhaltung:
  - Steuerung des Flugzeuges unter Einhaltung des zulässigen Flugbereichs,
  - Überwachung der Flugzeuginstrumente (z.B. Fahrtmesseranzeige),
  - Überwachung des Luftraums zur Vermeidung von gefährlichen Annäherungen an andere Luftverkehrsteilnehmer und
  - Navigation.
4. Flugführung und Flugmanagement:
  - Kommunikation mit den Flugsicherungsstellen (Einholen von Freigaben),
  - dreidimensionale Routenführung des Flugzeuges und
  - Einhalten von zeitlichen Vorgaben.

#### 4.3. Neue Philosophien für die Flugsteuerung/-führung von Individualflugzeugen

Die o.a. Liste zeigt, dass der Pilot umfangreiches Wissen und Können über die gesamte Phase des Fluges mit Vorbereitung aufweisen muss. Setzt man dieses spezielle Wissen zukünftig nicht mehr in diesem hohen Maße voraus, so ist dies, insbesondere für Flüge unter IMC, nur über eine weitgehende Automatisierung der einzelnen Aktivitäten über den gesamten Flug mit Vorbereitung möglich. Eine Philosophie zur Umsetzung dessen könnte folgendermaßen lauten:

- Die Mensch-Maschine-Schnittstellen dienen schwerpunktmäßig der Routenführung.
- Die Routenführung wird weitgehend automatisch ermittelt und dem Piloten dargestellt.
- Die wesentliche Aufgabe des Piloten ist die Überwachung der Route. Seine Eingriffe sollen ausschließlich Routenmodifikationen darstellen.
- Alle Regelkreise zur fliegerischen Einhaltung der Route werden automatisiert.
- Der Pilot kann per Side Stick Controller jederzeit die manuelle Steuerung übernehmen und das Flugzeug im Rahmen der gültigen Flugbereichsgrenzen und eines gültigen Routenbereichs frei steuern. Allerdings wird ihm die Autorität entzogen, sobald das Flugzeug Gefahr läuft, die gültigen Grenzen zu verlassen. Dafür sorgen automatisch eine im Hintergrund ständig mitlaufende Flight Envelope Protection (FEP) und eine Route Envelope Protection (REP).

Damit die Kompetenzen des Piloten weitgehend an das EHS abgetreten werden können, sollen folgende Anforderungen gelten:<sup>2</sup>

- Die Flugvorbereitung soll weitgehend automatisiert werden. Dies soll außerhalb des Flugzeuges mit einer EHS-ähnlichen PC-basierten Software erfolgen.
- Die ergänzende Vorbereitung im Flugzeug einschließlich aller Freigaben soll vom EHS weitgehend automatisch, datenbusbasiert unter automatischem Zugriff auf eine allgemein gültige Datenbasis (SESAR, etc.) erfolgen.
- Das EHS soll automatisch eine Hochfahrprozedur mit automatischen Systemtests durchführen.

<sup>2</sup> Der unmittelbare Start- und Landevorgang werden in diesem Beitrag nicht betrachtet.

- Das EHS soll automatisch eine Leistungsdiagnose aller Flugzeugsysteme und des Gesamtflugzeuges durchführen (Abflugmasse, Dichtehöhe, usw.).
- Das EHS soll eine automatische Überlastbegrenzung für alle Flugzeugsysteme bereitstellen.
- Die Grundbetriebsart des EHS soll immer eine automatische Flugführung sein.
- Eine manuelle Steuerung soll abgesichert durch die FEP und REP allzeit zur Verfügung stehen.
- Es soll keine funktionellen Degradationen aufgrund von Systemfehlern geben.

BILD 6 soll die Kompetenzverteilung zwischen Pilot und Easy Handling System verdeutlichen.

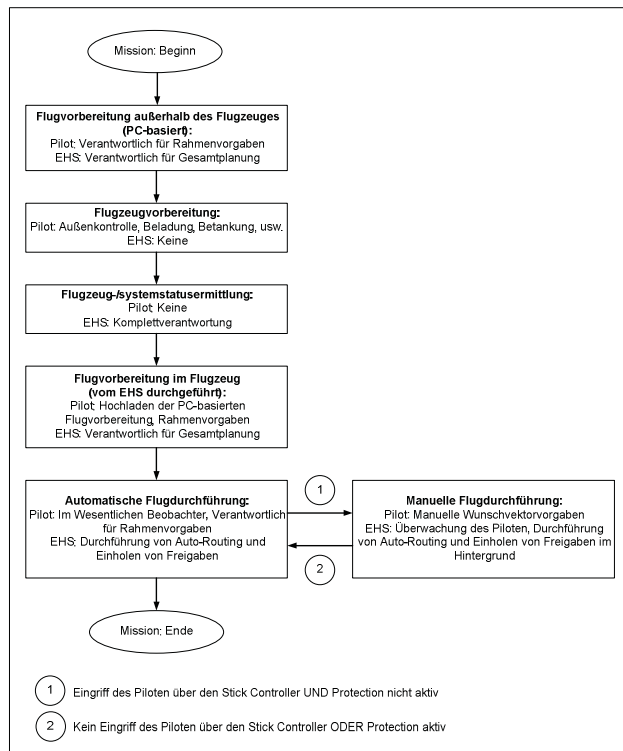


BILD 6. Kompetenzverteilung im EHS

## 5. MÖGLICHES EASY HANDLING SYSTEM

Die Grundbetriebsart soll der automatische Flugführungsmodus sein. Dieser führt alle für den Flug relevanten Aufgaben durch. Der Pilot muss die Eckdaten der Route vorgeben und die vom System ermittelte Route bzw. Adaption bestätigen. Die Verantwortung liegt dabei bei der automatischen Flugführung. Diese umfasst:

- Automatische Routenermittlung unter Berücksichtigung von Pilotenvorgaben, Geographie und Luftraumtopologie, Flugverkehr, Wetter, Leistung und Gewicht des Flugzeuges, Treibstoffvorrat, usw. und automatische die Flugdurchführung.

Betätigt der Pilot den Side Stick, so wird die manuelle Steuerung aktiviert. In diesem Fall beginnt die Routenermittlung mit einer vorausschauenden Ermittlung einer neuen Route mit dem noch gültigen Ziel als Endpunkt. Ausgangspunkte für die nun kontinuierlich ablaufende Routenanpassung sind die aktuelle Position und der aktuelle Bewegungsvektor des Flugzeuges sowie die ursprünglich gewählte Route. Die vorausschauende

Route wird den sich ändernden Ausgangspunkten laufend angepasst und am Display dem Piloten dargestellt. Nach der Deaktivierung des manuellen Steuermodi wird wiederum in den automatischen Flugführungsmodus geschaltet und so das Flugzeug entlang der zuletzt berechneten Route automatisch bis zum Ziel geführt.

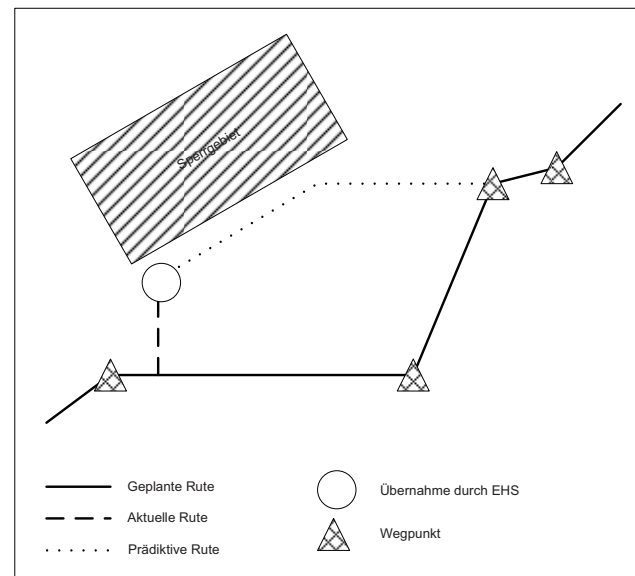


BILD 7. Auto-Routing Adaption im EHS

Die am Start oder im Flug durchgeführte Routenermittlung berücksichtigt die REP. Das bedeutet, es wird immer eine bzgl. Flugzeuleistung (einschließlich Treibstoffvorrat), Geographie, Luftraum und Verkehr gültige Route ermittelt. Steuert der Pilot im manuellen Steuermodus das Flugzeug, z.B. auf ein Sperrgebiet zu, so spricht die REP an. Sie erzwingt ein Umschalten in den automatischen Führungsmodus. Das Flugzeug wird so entlang der aktuell berechneten gültigen Route geführt. Im Falle des Erreichens der Routenbegrenzung wird die zu fliegende Route automatisch sukzessiv vorausschauend (prädiktiv) so adaptiert, dass die ermittelte Route dem Kommando des Piloten ohne Verletzung der Routenbegrenzung entspricht. Das Flugzeug fliegt in diesem Fall die ermittelte Route automatisch ab. Die Eingaben des Piloten wirken sich unmittelbar auf die kontinuierlich durchgeführte Routenadaption aus.

Zur Gewährleistung der sicheren Handhabung des Flugzeuges durch den Piloten wird im Hintergrund immer die FEP gerechnet. Im Falle des Erreichens der Flugbereichsbegrenzung oder dem Erreichen von Leistungsgrenzen des Flugzeuges werden Kommandoeingaben des Piloten vom EHS automatisch begrenzt bzw. so überdrückt, dass die Einhaltung des Flugbereichs gewährleistet ist. Im Rahmen dieser Einschränkung steuert der Pilot das Flugzeug weiterhin manuell.

BILD 8 illustriert ein mögliches Steuerungsprinzip für ein zukünftiges Individualflugzeug.

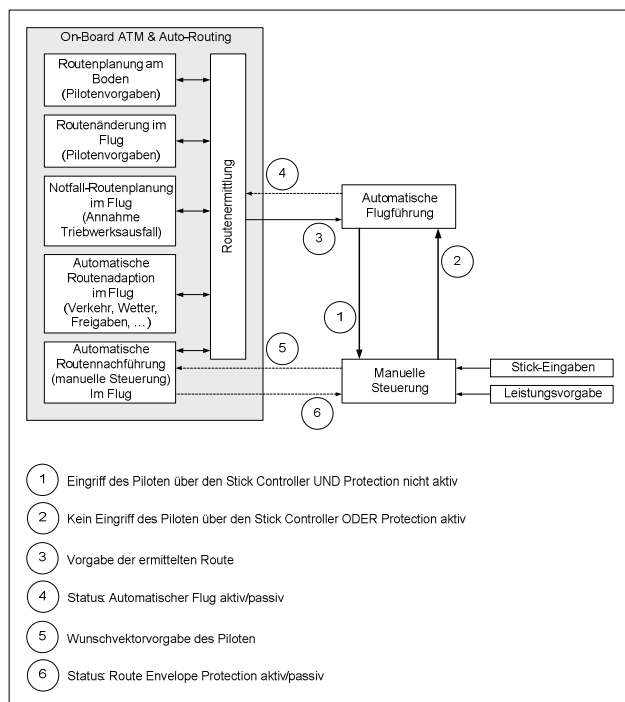


BILD 8. Steuerungsprinzip des EHS

In Sonder- und Notsituationen, wie z.B. bei einem Triebwerksausfall, kann der Pilot über einen Knopf im Cockpit ein Emergency Routing (ER) aktivieren. Dabei wird die Auto-Routing Funktion kriterienbezogen einen geeigneten Notlandeplatz und eine dahinführende Notfallflugroute, welche vollautomatisch bis in den Endanflug abgeflogen wird, ermitteln. Die Landung inklusive Endanflug bis einschließlich zum Aufsetzen und Ausrollen wird ebenfalls vollautomatisch erfolgen. Bei dieser Funktion handelt es sich um ein reines Notverfahren, das nur in seltenen Notfällen, mit ansonst (ohne ER) üblicherweise katastrophalen Folgen, angewandt wird. Die Notfallführung und -landung kann deshalb ausschließlich anhand flugzeugseitiger Empfänger und globaler Einrichtungen (z.B. GNSS) bzw. Sensoren (Inertialdaten, Radarhöhe, usw.), sowie digitalen on-board Luftfahrt Datenbanken mit aktuellen Informationen basieren.

### 5.1. Erwartete Verbesserungen durch das EHS

BILD 9 zeigt ganz allgemein in Anlehnung an [19] den Informationsfluss im Cockpit und das Entstehen von Stress. Dabei entsteht gerade beim Fliegen unter IMC für weniger geübte Privatpiloten speziell im Single Pilot Betrieb, aber auch in kontrollierten Lufträumen unter VMC, hoher Stress. Dies ist durch die dick eingerahmten Blöcke und dicken Pfeile dargestellt.

BILD 9 zeigt außerdem den Stressfall bei bisherigen Systemen. In diesen Systemen ist ein Auto-Routing nicht vorhanden. Hier wirkt sich der Stress bei IMC und bzgl. Führung im kontrollierten Luftraum unter VMC unmittelbar auf den Piloten aus. Zudem wurde angenommen, dass es keine automatische Flugbereichsüberwachung gibt. Das bedeutet, dass der Pilot sich zusätzlich um die Einhaltung des gültigen Flugbereichs kümmern muss.

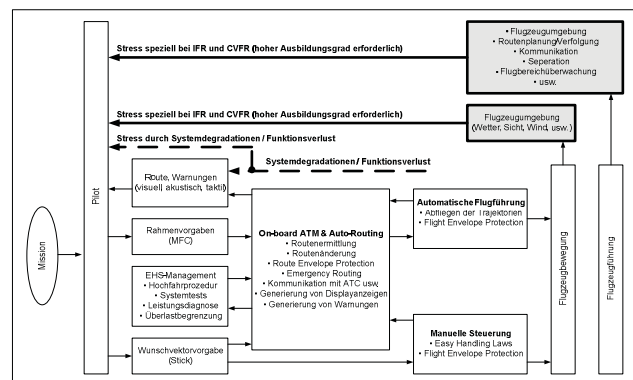


BILD 9. Informationsfluss und Entstehung von Stress

Bei automatischer Flugführung gibt der Pilot Eingaben quasi nur auf Routing-Ebene. Die automatische Flugführung ermittelt dann jeweils eine in jeder Hinsicht gültige Route, die vom Autopilot abgeflogen wird. Der Pilot beobachtet im Wesentlichen die Position des Flugzeugs auf der Route und eventuell den übrigen Luftverkehr. In den unteren Ausführungsebenen als auch auf der Kontaktebene mit dem ATC/ATM ist der Pilot nicht mehr unmittelbar engagiert. Genau dies sind die Ebenen, welche Können und Erfahrung erfordern und immer wieder Stress im Cockpit verursachen. Das manuelle Fliegen mit EHS erfolgt automatisch abgesichert durch die automatische FEP und REP. Damit ist ein Easy Handling in jeder Hinsicht gegeben. Die Stresserzeuger bei Systemen ohne diese EHQ sind nicht involviert.

### 5.2. Sicherheitsklassifizierung der EHS-Funktionalität

Nach [17] sind 10 % aller fatalen Unfälle von einmotorigen Flugzeugen unter 2.722 kg auf Fehlerzustände zurückzuführen, die durch Flugzeugsysteme verursacht werden, also zurückzuführen auf Fehlereffekte auf Systemebene (=FE\_SYS). Daraus folgt mit  $P\{(schwerer\_Unfall)/h\} < 1 \cdot 10^{-5}$  für die Auftretenswahrscheinlichkeit aller Fehlereffekte:

$$P\left\{\bigcup_{i=1}^{Alle} [(FE\_SYS_{(i)} \rightarrow CAT)/h]\right\} < 1 \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

Nach [20], kann ein Echo-Flugzeug in fünf Systeme aufgeteilt werden, die spezifischen Funktionen übernehmen (Flugzeugzelle, Cockpitinstrumente, Flugsteuerung, Elektrik und Triebwerk). Hier soll die Zelle von der Betrachtung ausgeschlossen werden, da ein Versagen dieser auch bei der Formulierung der Forderungen in [17] nicht berücksichtigt wurde. Als unabhängiges, also nicht primär zum EHS gehörendes System, bleibt nur noch das Antriebssystem. Zum Antriebssystem zählen das Triebwerk inklusive Propeller, Getriebe und Kraftstoffanlage. Auf Grund der Komplexität und des Umfangs des EHS werden dem EHS 80 % des zu verteilenden Sicherheitsbudgets zugeschrieben. Die restlichen 20 % entfallen auf das Antriebssystem. Damit ergibt sich mit (1) für das EHS:



$$P\left\{\bigcup_{i=1}^{Alle} [(FE\_EHS_{(i)} \rightarrow CAT) / h]\right\} < 8 \cdot 10^{-7} \quad (2)$$

und für das Antriebssystem:

$$P\left\{\bigcup_{i=1}^{Alle} [(FE\_ENG_{(i)} \rightarrow CAT) / h]\right\} < 2 \cdot 10^{-7} \quad (3)$$

Die Forderung (3) stellt jedoch für einmotorige Flugzeuge ein Problem dar. Nach [20] gilt für Kolbenmotorflugzeuge für den gesamten Antriebsstrang (Flugmotor + Tanksystem + Propeller):

$$P\{\text{Triebwerksausfall} / h\} < 3,62 \cdot 10^{-5} \quad (4)$$

Die Kritikalität des Ereignisses »Triebwerksausfall« ist für Echo-Flugzeuge bei Flügen am Tage bei guter Sicht und über einfachem Gelände heute als MAJOR klassifiziert. Bei zukünftigen Individualflugzeugen mit EHS muss dieser Fall aber de facto als CATASTROPHIC (CAT) eingestuft werden, da ein Großteil der Flüge in der Nacht oder unter IMC durchgeführt werden wird. Damit würden einmotorige Flugzeuge der Sicherheitsanforderung (3) nicht genügen. Hierzu bietet das EHS dahingegen einen Ausweg, dass es im Falle eines Triebwerksausfalls mit einer automatischen Landung für Sicherheit sorgt. Als Konsequenz muss ein Triebwerksausfall nur in Kombination mit gleichzeitigem Verlust des ER als CAT eingestuft werden. Somit ist selbst im Fall eines Antriebsverlustes durch Triebwerksausfall die Sicherheitsvorgabe erfüllt. Dies würde auch ein klares Argument für die Aufhebung des kommerziellen Betriebes von einmotorigen Flugzeugen unter IFR in Europa bedeuten, denn ein ELOS zu zweimotorigen konventionellen Flugzeugen wäre hergestellt.

### 5.3. Evaluierung der EHS-Funktionalität

Zusammengefasst weisen die EHQ für das vorgeschlagene EHS folgende Kerneigenschaften auf:

- E1: Nach der Vorgabe von Start und Ziel mit eventuellen Optimierungskriterien (möglichst schnell und möglichst energiesparend) wird die Ermittlung einer gültigen Route vom System vor dem Start durchgeführt und im Flug adaptiert.
- E2: Basis für die Flugführung ist eine automatische Führung des Flugzeuges entlang einer Route. Der Pilot kann zwar die manuelle Steuerung und Führung des Flugzeuges übernehmen. Dies geschieht jedoch überwacht durch zwei mitlaufende Schutzfunktionen:
  1. Flight Envelope Protection (FEP) und
  2. Route Envelope Protection (REP).
 Damit ist sowohl die Gefahr des Verlustes eines sicheren Flugzustandes als auch des Verlusts einer sicheren Flugführung (Flugroute) durch das System abgefangen.
- E3: Das Ermitteln einer Flugroute könnte auch dahingehend erweitert werden, dass die Route so ausgelegt wird, dass möglichst flächendeckend jeweils eine flugplatzorientierte Notlandung möglich wäre. Die Ermittlung der Emergency Route wäre damit ebenfalls eine Aufgabe des Auto-Routings.

- E4: Das System weist funktionell keine fehlerbedingten Degradationen auf.
- E5: Automatischer System-IBIT mit automatischer Dispatchability Ermittlung und Reporting.
- E6:  $P\{\text{Verlust der EHS-Funktionalität}\} < 8 \cdot 10^{-7}$  für eine einstündige Mission.

Damit ergibt sich folgendes Resultat:

- R1: A1 ist erfüllt durch E1, E2, E3, E4, E5.
- R2: A2 ist erfüllt durch E2, E3 und E4.
- R3: A3 kann erfüllt werden durch E1, E2, E3 und E4.
- R4: A4 kann erfüllt werden durch E2 und E5.
- R5: A5 ist erfüllt durch E4 und E6.

### 5.4. Kostenanforderung an das EHS

In [13] wurde eine Abschätzung der Kosten heutiger Flugsteuerungs- und Avioniksysteme in Echo-Flugzeugen durchgeführt. Ein Vergleich der Anschaffungskosten für Echo-Flugzeuge hat ergeben, dass sich der prozentuale Anteil der Kosten für Flugsteuerungs- und Anzeigesysteme am Gesamtflugzeugpreis in den letzten 20 Jahren mehr als verdreifacht hat. Waren diese Anfang der 80er noch bei ca. 10 % so können sie heute bei gut ausgestatteten Flugzeugen bereits mehr als 30 % der Gesamtflugzeugkosten betragen. Vor allem Autopilotensysteme, Wetterradar, TCAS, und digitale Displays haben die Kosten in die Höhe getrieben. Die ermittelten Kosten belaufen sich bereits durchschnittlich auf rund 104.000 Euro. Geht man davon aus, dass diese Entwicklung weiter anhält, und berücksichtigt man, dass mit Einführen eines modernen Individualflugzeugs als ergänzende Alternative zum Automobil einerseits ein deutlicher Mehrwert gegeben wäre, andererseits einige heute eingebaute Systeme durch die Ausstattung mit einem EHS überflüssig werden würden, so ist zu erwarten, dass auch hier eine Bereitschaft vorhanden sein wird nochmals ca. 25 % höhere Anschaffungskosten zu akzeptieren.

## 6. KERNANFORDERUNGEN AN EINE FLY-BY-WIRE-PLATTFORM

### 6.1. Notwendigkeit einer FbW-Plattform

Die beiden zentralen Fragen, die sich bei der Realisierung der Easy Handling Qualities (EHQ) stellen, sind:

1. Bedarf es unbedingt eines Fly-by-Wire-Systems?
2. Wenn ja: Kann dies ein Fly-by-Wire-System mit einem mechanischem Backup sein?

Basis der EHQ ist die automatische Steuerung. Eine weitere Grundlage der EHQ ist, dass sie dem Piloten bei manueller Steuerung in immer gleicher Form zur Verfügung stehen, also ohne funktionelle Degradation bei Systemfehlern. Dies erfordert konsequenter Weise ein vollautoritäres, allzeit aktives Fly-by-Wire-System. Nur damit sind Anforderungen wie

- kein degradationsbedingtes zyklisches Pilotentraining oder
- transparente Systemkomplexität

zu erfüllen. Damit ist aber der Sinn für ein mechanisches Back-Up-System nicht mehr gegeben. Des Weiteren erfordert die Anforderung »kein degradationsbedingtes zyklisches Pilotentraining« vom Fly-by-Wire-System ein besonders effizientes Systemmanagement, welches seinerseits wieder besondere Systemstrukturen erfordert,

um so die vorhandenen Systemressourcen optimal nutzen zu können. Ferner wäre ein System mit einer »No Degradation Philosophy« nur mit einem erheblichen Redundanzaufwand umzusetzen. Dies ist mit einem mechanisch-elektronisch kombinierten System unmöglich.

## 6.2. Spezielle Anforderungen an die Energieversorgung

Ein Kernpunkt der rein elektrischen Energieversorgung ist die sichere Bereitstellung einer ausreichenden Energiemenge über die Batterien im Falle eines Motor- oder Generatorsausfalls in großer Flughöhe. Zum Zeitpunkt des Ausfalls von Motor oder Generatoren muss in den Batterien insgesamt soviel Energie abgespeichert sein und zu diesem Zeitpunkt auch entnehmbar zur Verfügung stehen, dass sie für die Versorgung der elementaren Avionik einschließlich der Stellenergie für die Steuerflächen bis zur sicheren Landung ausreicht. Für die Batterien muss ein Motorsausfall bzw. ein Generatorsausfall auf maximaler Flughöhe als dimensionierend betrachtet werden. Für die Dauer eines Gleitfluges von maximaler Flughöhe auf Meereshöhe mit anschließender Außenlandung oder Anflugverfahren mit Landung (beim Generatorsausfall) müssen die Batterien mindestens Energie liefern. Diese Höhe ist für die DA40-V1 in [21] mit 16.400 ft (5.000 m) angegeben und das Gleitverhältnis mit 8,9. Nimmt man vereinfacht für kleine Sinkwinkel an, dass der Sinus des Sinkwinkels gleich dem Tangens des Sinkwinkels ist, so ergibt sich bei der Geschwindigkeit für bestes Gleiten (60 kt) eine Sinkrate von 608 ft/min und damit eine Sinkflugdauer von ca. 27 Minuten. Berücksichtigt man Unsicherheiten und Dauer für ein Anflugverfahren, so kann gefordert werden, dass die Batterien die Plattform für eine Dauer von mindestens 30 Minuten mit Energie versorgen müssen.

## 6.3. Anforderungen an die Plattformersicherheit

Die Plattform wird zunächst in sechs wesentliche Teilsysteme unterteilt. Diese sechs Teilsysteme sind:

- Der Plattformkern (zentrales Rechnersystem),
- die Energieversorgung und -Verteilung,
- die Plattformkommunikation (zentrale Datenbusse),
- die Plattformaktuatorik,
- die Plattformsensorik und
- das Human-Plattform-Interface.

Der Ausfall der FbW-Plattform ist gleich zu setzen mit dem Ausfall des EHS. Daraus folgt:

$$P\left\{\bigcup_{i=1}^{Alle} [(FE\_Plattform_{(i)} \rightarrow CAT) / h]\right\} < 8 \cdot 10^{-7} \quad (5)$$

Wird (5) nun auf die o.a. sechs Plattform-Teilsysteme sowie auf einen noch unbekannten Rest komplexer Querzusammenhänge und spezieller Fehlerfälle gleichmäßig verteilt so folgt daraus die in BILD 10 dargestellte Aufteilung des Sicherheitsbudgets.

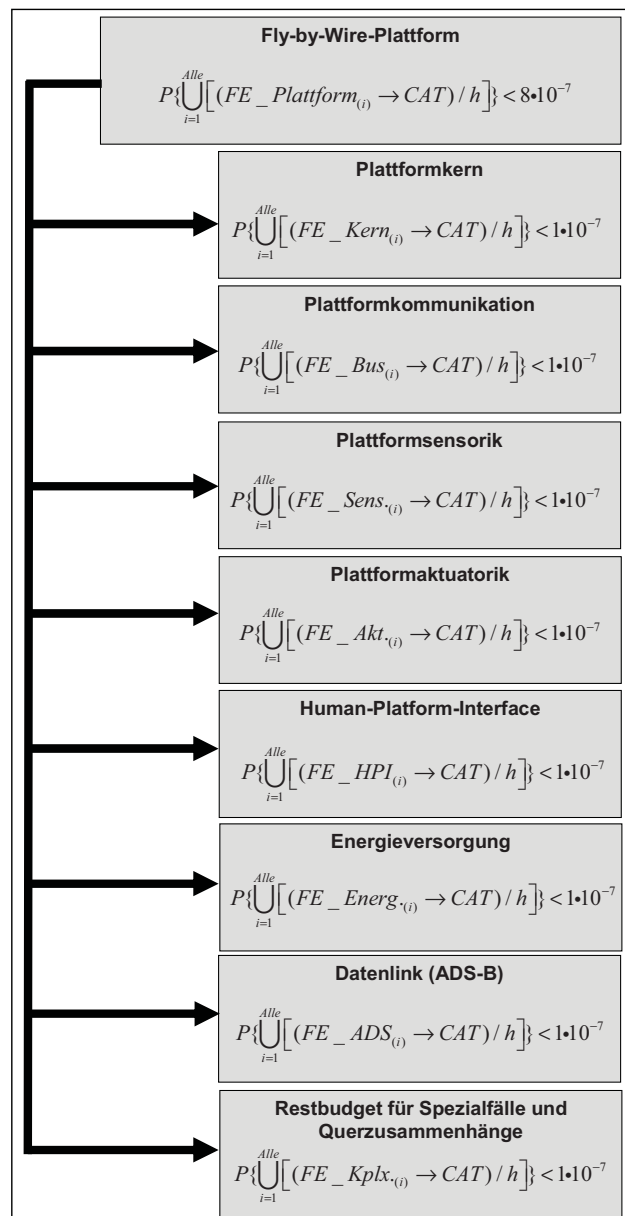


BILD 10. Verteilung des Plattform-Sicherheitsbudget

## 6.4. Kostengetriebene Anforderungen

Maßgebend für die Topologie der Plattform ist neben den Anforderung an Funktion und Sicherheit auch die Anforderungen nach »Low Cost Potential«, und zwar sowohl bzgl. der Serien- als auch der Entwicklungskosten. Dabei sind gerade Letztere wegen des hohen Zertifizierungsaufwandes von großer Bedeutung. Die Plattform soll die Basis für die Umsetzung der Funktionen bilden. Die Kosten der Plattform müssen dabei klein gehalten werden. Aus diesem Grund müssen Redundanzen funktionsübergreifend nutzbar sein. Bei den erforderlichen gerätetechnischen Einrichtungen muss es sich vorwiegend um kostengünstige Serienkomponenten handeln (COTS). Die Gesamtkosten setzen sich hier zusammen aus den wiederkehrenden Kosten (Recurring Costs, RC) und den Einmalkosten (Non-Recurring Costs, NRC) bezogen auf die Stückzahl (Number, N).

$$C_{pro\_System} = RC + \frac{NRC}{N} \quad (6)$$

Um die Kosten möglichst gering zu halten, muss eine Verteilung der Einmalkosten inklusive der Zertifizierungskosten auf mehrere Anwendungen ermöglicht werden. Das Problem im Flugzeugbau sind die geringen Stückzahlen pro Flugzeugtyp. Bei geringen Stückzahlen

ist der Anteil  $\left(\frac{NRC}{N}\right)$  signifikant.

Die zwei wesentlichen RC-Aspekte sind:

1. Minimaler Aufwand an Hardware (HW) durch optimale Nutzung redundanter Ressourcen. Dies geschieht auf folgende Weise:
  - Optimale Nutzung redundanter HW-Ressourcen durch »dynamisches Ressource-Sharing«. Dahinter verbirgt sich eine dynamische Reallokation von SW-Funktionen auf redundante HW-Ressourcen im Falle eines Fehlers mit dem Ziel, mit der vorhandenen korrekten Rest-HW einen möglichst hohen Funktionslevel in der Plattform sicherzustellen.
  - Integrierte Nutzung unterschiedlicher Sensoren zur Ermittlung der Flugzeuglage und Flugzeugposition.
  - Effiziente Nutzung redundanter HW-Ressourcen, indem der Plattformkern Zugriff hat auf alle Sensordaten und Aktuatoren.
2. Einsatz von Kernkomponenten wie Datenbusse aus dem Automotivbereich und Erreichen der vorgegebenen Sicherheitsanforderungen über Systemstruktur und Systemfunktionalität.

Die zwei wesentlichen  $\left(\frac{NRC}{N}\right)$ -Aspekte sind:

1. Klare Verteilung von Intelligenz:
  - Verlagerung relevanter Intelligenz in die Komponenten (z.B. Verwendung von Smart-Aktuatoren)
  - Verlagerung der gesamten Plattformintelligenz (einschließlich Redundanzmanagement) in den universal einsetzbaren Plattformkern mit virtueller Simplex-Schnittstelle zu den eigentlichen Steuer- und Führungsfunktionen (Applikationen)
2. Die Managementaufgaben der Plattform einschließlich des Redundanzmanagements werden getrennt von den eigentlichen Steuer- und Führungsfunktionen.
  - Die Implementation von Applikationen basiert auf einer virtuellen Simplex-Schnittstelle zwischen Plattform-Management und den Applikationen.
  - Die Applikationen sehen die Plattformredundanz nicht. Sie können »simplex minded« entwickelt werden.
  - Das Plattform-Management basiert auf einem weitreichend universellen Ansatz, der von der jeweiligen Anwendung weitgehend unabhängig ist.

Zusammengefasst bedeutet dies:

1. Senkung der RC pro Plattform wird im Wesentlichen erreicht durch Senkung des HW-Bedarfs pro Plattform.
2. Senkung  $\left(\frac{NRC}{N}\right)$  wird im Wesentlichen erreicht

durch:

- Hochgradige Wiederverwendbarkeit von Komponenten für unterschiedliche Flugzeugtypen,
- hochgradige Wiederverwendbarkeit des aufwendigen Plattform-Managements und
- Vereinfachung der Entwicklung der spezifischen Führungs- und Steuerfunktionen durch die Möglichkeit des »Simplex Minded Design«.

## 7. BEISPIELHAFTE PLATTFORM

Eine beispielhafte FbW-Plattform die diesen Anforderungen genügt wurde bereits im Rahmen der DGLR-Jahrestagung 2005 in [22] dargestellt. BILD 11 zeigt hier nochmals schematisch diese Plattform.

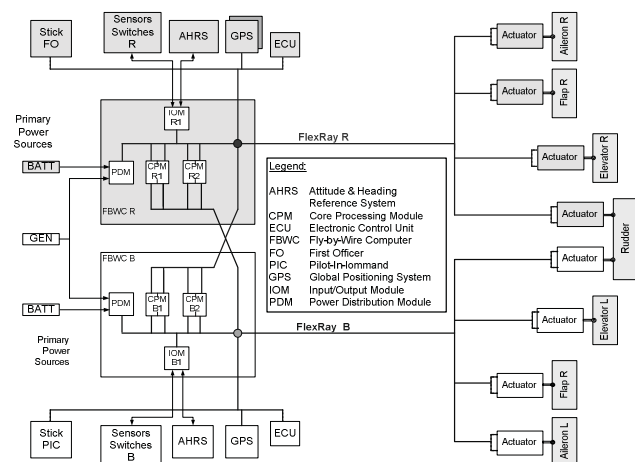


BILD 11. Beispielstruktur einer FbW-Plattform [22]

Der Kern der Plattform reduziert sich vor dem Hintergrund des massiven Einsatzes von »Smart-Aggregaten« auf generische Rechneinheiten (CPM) mit Schnittstellen zum Plattformbus. Dabei ist die ganze Plattform streng in zwei Hälften geteilt. Jede der zwei Seiten basiert auf einem eigenen FlexRay-Bus. Dabei handelt es sich um einen duplex ausgeführten Bus. Dass heißt, der FlexRay Bus ist ein in sich aus zwei Kanälen aufgebauter Bus. Der Bus arbeitet nach dem sog. »Time Triggered Verfahren«. Die Busse beider Plattformhälften sind nicht miteinander gekoppelt oder synchronisiert. Die einzigen auf beide Busse zugreifenden Einheiten sind die zentralen Rechneinheiten. Alle Aggregate sind einer Plattformseite zugeordnet und werden nur mit deren Bus verbunden. Die CPM haben Zugriff auf beide Busse. Dabei arbeiten sie im Normalbetrieb synchron zum Bus ihrer Seite, aber asynchron zum Bus der Gegenseite. Zur Erzeugung einer konsistenten Datenbasis zwischen den CPM werden die entscheidungsrelevanten Daten sowohl auf dem eigenen Bus als auch auf dem Bus der anderen Seite übertragen. [22]

## ABKÜRZUNGEN

ATC	Air Traffic Control
ATM	Air Traffic Management
GA	General Aviation
BRD	Bundesrepublik Deutschland
C	Costs
CAT	CATASTROPHIC
COTS	Component Of The Shelf
CPM	Core Processing Module
CS	Certification Specification
DGLR	Deutsche Gesellschaft für Luft und Raumfahrt
EASA	European Aviation Safety Agency
EHS	Easy Handling System
EHQ	Easy Handling Qualities
ELOS	Equivalent Level Of Safety
ER	Emergency Routing
EU	European Union
FbW	Fly-by-Wire
FE	Failure Effect
FEP	Flight Envelope Protection
GNSS	Global Navigation Satellite System
HW	Hard Ware
IBIT	Initial Built In Test
ICAO	International Civil Aviation Organisation
IFR	Instrument Flight Rules
ILS	Institut für Luftfahrtssysteme
ILS	Instrument Landing System
IMC	Instrument Meteorological Conditions
METAR	Meteorological Aerodrome Report
MIV	Motorisierter Individualverkehr
N	Number
NOTAM	Notice To Air Men
NRC	Non-Recurring Costs
OPS	Operational Standards
PC	Personal Computer
Pkw	Personenkraftwagen
RC	Recurring Costs
REP	Route Envelope Protection
SESAR	Single European Sky ATM Research Programme
SW	Soft Ware
TAF	Terminal Aerodrome Forecast
VFR	Visual Flight Rules
VMC	Visual Meteorological Conditions

## ABBILDUNGEN

- BILD 1. Einteilung der Allgemeinen Luftfahrt
- BILD 2. Entwicklung der Verkehrsleistung nach [9]
- BILD 3. Auswirkungen des Mobilitätsbedarfs
- BILD 4. Bedarf schneller Individualverkehrsmittel
- BILD 5. Unfallwahrscheinlichkeit mit Pkw nach [14]
- BILD 6. Kompetenzverteilung im EHS
- BILD 7. Auto-Routing Adaption im EHS
- BILD 8. Steuerungsprinzip des EHS
- BILD 9. Informationsfluss und Entstehung von Stress
- BILD 10. Verteilung des Plattform-Sicherheitsbudget
- BILD 11. Beispielstruktur einer FbW-Plattform [22]

## TABELLEN

- TAB1. Luftfahrzeugbestand in der BRD im Jahr 2007 [2]
- TAB2. Sinnvoller Reisekorridor für Echo-Flugzeuge

## SCHRIFTTUM

- [1] N.N.: „Operation of Aircraft“, Annex 6, International Civil Aviation Organization, Montreal 1998

- [2] N.N.: „Bestand an Luftfahrzeugen in der Bundesrepublik Deutschland“, Statistiken, Luftfahrt Bundesamt, Braunschweig 2008
- [3] A. Dühne: „Technik-Markt-Studie zu den Marktaussichten und Bewertung des möglichen Marktpotentials von Kleinflugzeugen mit Fly-by-Wire Flugsteuerungssystem“, Studienarbeit, Institut für Luftfahrtssysteme der Universität Stuttgart, Stuttgart 2006
- [4] N.N.: „Certification Specifications for Normal, Utility, Aerobatic, and Commuter Category Aeroplanes CS-23“, EASA, Brüssel 2003
- [5] A. Fitschen et al.: „Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2005. Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen“, Bundesanstalt für Straßenwesen, Hamburg 2008
- [6] P. Meusbürger: „Lexikon der Geographie“, Berlin 2002
- [7] D. Marsh: „Getting to the Point: Business Aviation in Europe“, Eurocontrol, 2006
- [8] N.N.: „Anforderungen der Geschäftsluftfahrt an eine zukunftsfähige Flughafen-Politik – am Beispiel des Flughafens Berlin-Tempelhof“, German Business Aviation Association, Berlin 2002
- [9] V. Gollnick: „Untersuchung zur Bewertung der Transporteffizienz verschiedener Verkehrsmittel“, Dissertation, Lehrstuhl für Luftfahrttechnik der Technischen Universität München, München 2004
- [10] L. R. Jenkinson et al.: „Civil Jet Aircraft Design“, Arnold Publishers, London 1999
- [11] N.N.: „Luftverkehr in Deutschland“, Mobilitätsbericht 2006, DFS Deutsche Flugsicherung, Langen 2007
- [12] N.N.: „Flugausfallstatistik LGM“, Luftfahrt Gesellschaft Mannheim, Mannheim 2008
- [13] T. Krieg: „Untersuchung neuer Möglichkeiten für einen optimalen Flugzeugentwurf und Flugbetrieb durch den Einsatz flugzeugübergreifender Fly-by-Wire-Plattformen in der General Aviation“, Institut für Luftfahrtssysteme, Stuttgart 2008
- [14] N.N.: „Verkehrsunfälle“, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2007
- [15] M. Armbruster: „Eine flugzeugübergreifende X-by-Wire Plattform zur Ausführung umfassender Fahr- und Assistenzfunktionen“, Institut für Luftfahrtssysteme, Stuttgart 2009
- [16] N.N.: „Jahresbericht 2006 – Unfälle und Störungen beim betrieb ziviler Luftfahrzeuge“, Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung, Braunschweig 2007
- [17] N.N.: „Advisory Circular AC No 23.1309-1C“, Federal Aviation Administration, 1999
- [18] H. Hanke: „Einflüsse digitaler Glas-Cockpits von Verkehrsflugzeugen auf das Qualifikationsprofil von Piloten“, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz 2003
- [19] G. E. Cooper et al.: „The Use of Pilot Rating in the Evaluation of Aircraft Handling Qualities“, NASA TN D-5153, 1969
- [20] D. Pettit et al.: „General Aviation Aircraft Reliability Study“, FDC/NYMA Inc., Hampton, Virginia 2001
- [21] N.N.: „Flughandbuch DA40-V1“, Diamond Aircraft, Wiener Neustadt 1998
- [22] G. Konrad et al.: „Easy Control System für Flugzeuge der General Aviation“, DGLR-Jahrestagung, Friedrichshafen 2005