

# Innovation im Fokus

Informationen zu Forschung, Entwicklung und Validierung

## In dieser Ausgabe:

- Kopplung zwischen einem OptimalControl-MATLAB-Framework und dem Realzeitsimulator NEWSIM
- Data Envelopment Analysis – Vorschlag einer neuen Methodik zum Performancevergleich der Flugsicherungen
- 3D-Entwicklungen im Towersimulator: Die virtuelle Sicht aus der Towerkanzel
- Bewertung von Multi-Touch Gesteneingaben am Lotsenarbeitsplatz
- Bewertung von Fluglärmprognosetools unter Verwendung von ATM-Simulationsdaten



**DFS** Deutsche Flugsicherung

## Vorwort der Herausgeber

Günter Achatz, Ralf Bertsch, Dr. Volker Heil

Liebe Leserinnen und Leser von „Innovation im Fokus“!

Eine neue und doch so bekannte Fachzeitschrift liegt vor Ihnen. Aus „TE im Fokus“ wurde „Innovation im Fokus“.

„Da hätten die doch gleich drauf kommen können“, werden Sie sich denken. Denn es ging schon immer und es geht auch weiterhin um die Zukunft, um Neuerungen, Ansätze und Ergebnisse angewandter Forschung und Entwicklung, um Innovationspotenziale und deren Validierung, also die schrittweise, möglichst frühzeitige Prüfung der Praxistauglichkeit und somit auch besonders gerne um vollbrachte Innovationen.

Wir haben nunmehr das Ziel „Innovation“ in den Vordergrund gestellt. Und wir sind ganz bewusst und endgültig von einem direkten Bezug zu einer Organisationseinheit der DFS weggegangen. Schließlich ist Innovation unser aller Thema und nicht nur das von einem Bereich.

Inhaltlich beschäftigt sich die Zeitschrift bevorzugt mit Informationen zu Forschung, Entwicklung und Validierung mit Beteiligung und dem großen Wissen der DFS, ist jedoch grundsätzlich auch offen für weitergehende Beiträge. Schon in der Vergangenheit haben nicht nur nationale Förderprojekte die Grenzen einer DFS-Fixierung gesprengt, sondern europäische Förderprojekte bis hin zu SESAR und das eine oder andere Projekt mit Beteiligung US-amerikanischer Partner schon seit Jahren die internationale Bühne eröffnet. Dennoch wird der Umfang der Publikation nicht ins Unendliche ausufern, wohl aber dem Trend – hoffentlich nicht nur eine Mode – zum Erschließen von Schlüsseltechnologien für den Einsatz in der Flugsicherung und zu mehr Innovation zum Nutzen unserer Kunden und zur Stärkung des Unternehmens folgen.

Wir hoffen weiterhin auf das Angebot interessierter Schreiber und werden sicherlich auch die Eine oder den Anderen ein wenig dazu motivieren.

Wir wünschen Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, viele lesenswerte Beiträge – denn dann sind wir alle mit der Zeitschrift zufrieden und können ihre Inhalte als erfolgreich validiert ansehen.

Günter Achatz, Volker Heil und Ralf Bertsch



---

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Übersicht der Artikel in diesem Heft .....                                                                       | 4  |
| Kopplung zwischen einem OptimalControl-MATLAB-Framework und dem Realzeitsimulator<br>NEWSIM .....                | 5  |
| David Olah, Dr. Matthias Poppe                                                                                   |    |
| Data Envelopment Analysis – Vorschlag einer neuen Methodik zum Performancevergleich der<br>Flugsicherungen ..... | 11 |
| Jörg Buxbaum, Thomas Standfuß                                                                                    |    |
| 3D-Entwicklungen im Towersimulator: Die virtuelle Sicht aus der Towerkanzel .....                                | 17 |
| Eric Becker, Andreas Türk                                                                                        |    |
| Bewertung von Multi-Touch Gesteneingaben am Lotsenarbeitsplatz .....                                             | 20 |
| Dr. Konrad Hagemann, Andreas Udovic                                                                              |    |
| Bewertung von Fluglärmprognosetools unter Verwendung von ATM-Simulationsdaten .....                              | 28 |
| Stefan Schwanke, Lukas Sapok                                                                                     |    |
| Impressum .....                                                                                                  | 43 |

Die Autoren sind, soweit nicht anders gekennzeichnet, Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der DFS. Die Rechte an den Artikeln liegen bei den jeweiligen Autoren.

---

## Übersicht der Artikel in diesem Heft

**David Olah, Dr. Matthias Poppe: Kopplung zwischen einem OptimalControl-MATLAB-Framework und dem Realzeitsimulator NEWSIM** - Seit 2011 befasst sich der Forschungsbereich der DFS mit der Optimierung von Trajektorien. Im Zuge dieser Forschungsarbeit wurde ein Algorithmus in MATLAB in Form eines MATLAB-Frameworks entwickelt, das für vordefinierte Szenarien optimale Trajektorien bestimmt. Dieses Szenario wird mithilfe des MATLAB-Frameworks in ein Optimalsteuerungsproblem überführt, das optimale und konfliktfreie Routen berechnet. Aber erst die Kopplung mit dem Realzeitsimulator NEWSIM ermöglicht die Evaluation des Algorithmus in einem realistischen Umfeld. Ein entwickelter Automatikmodus setzt das Ergebnis mit Hilfe von erzeugten Pilotenkommandos um.

**Jörg Buxbaum, Thomas Standfuß: Data Envelopment Analysis – Vorschlag einer neuen Methodik zum Performancevergleich der Flugsicherungen** - Steigende Luftverkehrszahlen und wachsender Kostendruck in der Airline-Industrie führen seit Mitte der neunziger Jahre verstärkt zu Bestrebungen, die betriebliche Leistungsfähigkeit der monopolistisch agierenden Flugsicherungsdienstleister (ANSP) miteinander zu vergleichen. Konzentrierten sich initial die Untersuchungen auf Unterschiede zwischen Europa und USA, hat sich seit 1998 ebenfalls eine vergleichende, detaillierte Betrachtung von Performance-Kennwerten der ANSP innerhalb Europas etabliert. Der Artikel geht auf die Herausforderung von Performancevergleichen ein und beschreibt die Methodik der Data Envelopment Analysis.

**3D-Entwicklungen im Towersimulator: Die virtuelle Sicht aus der Towerkanzel** - In der DFS sind etliche Towersimulatoren zur Aus- und Weiterbildung der Lotsen im Einsatz. Neben den umfangreichen technischen Lösungen zur Projektion werden zusätzlich die 3D-Modelle der verschiedenen Flughäfen benötigt. Bis zur Entstehung eines Flughafens in der virtuellen Welt ist einiges an Vorarbeit notwendig, für die die DFS seit neustem zwei Alternativen mit sehr unterschiedlichem Arbeits- und Zeitaufwand besitzt. Die jeweils gewählte Alternative hängt davon ab, ob eine schnelle (aber etwas einfachere) oder eine hochwertige (aber aufwändigere) Lösung angestrebt wird. Der Artikel gibt einen Überblick dazu.

**Dr. Konrad Hagemann, Andreas Udovic: Bewertung von Multi-Touch Gesteneingaben am Lotsenarbeitsplatz** - Im Bereich der Unterhaltungselektronik ist Multi-Touch Gestensteuerung von z.B. Smartphones und Tablets inzwischen zu einer Selbstverständlichkeit geworden. In einer Studie wurde die Gebrauchstauglichkeit eines neuartigen Multi-Touch-basierten Anzeige- und Bedienkonzepts für die Anflug- und Streckenkontrolle (TMA/ACC) des Flugverkehrs untersucht. Die bisherigen Touch-Eingabe-Lösungen in der Flugsicherung bestehen zumeist in zusätzlicher Gerätschaften, um laufende technische Systeme in ihrer Sicherheit möglichst unbeeinträchtigt zu lassen. Die vorliegende Untersuchung hat gezeigt, dass es mit Bezug zu Multi-Touch Gestenbedienung durchaus lohnenswert sein könnte, hier über einen größeren Integrationsschritt nachzudenken.

**Stefan Schwanke, Lukas Sapok: Bewertung von Fluglärmprognosetools unter Verwendung von ATM-Simulationsdaten** - Eines der Ziele bei der Planung, Entwicklung und Erprobung von Luftraumänderungen oder Flugverfahren durch die DFS ist neben Sicherheit, Leistungsfähigkeit und Kosteneffizienz die Minimierung von Umweltauswirkungen. Ein wichtiges Instrument dabei sind ATM-Simulationen. Dabei werden von der DFS sowohl Schnellzeitsimulationen als auch Echtzeitsimulationen eingesetzt. Es wurden verschiedene Berechnungsvorschriften und Lärmprognosesoftware auf ihre Eignung für diesen Zweck untersucht. Die Ergebnisse der Arbeit sollen die DFS bei der Auswahl und Verwendung eines geeigneten Programms und dessen Einbindung in die vorhandene Infrastruktur unterstützen. Vorliegender Artikel berichtet über den derzeitigen Stand dieser Untersuchung.

# Kopplung zwischen einem OptimalControl-MATLAB-Framework und dem Realzeitsimulator NEWSIM

David Olah, Dr. Matthias Poppe

## Einleitung

Seit 2011 befasst sich der Forschungsbereich der DFS mit der Optimierung von Trajektorien. Im Zuge dieser Forschungsarbeit wurde ein Algorithmus in Form eines MATLAB-Frameworks entwickelt, welcher für vordefinierte Szenarien optimale Trajektorien bestimmt. Dabei werden vorgegebene Staffelungsabstände eingehalten und die Trajektorien an Hand einer Kostenfunktion (z.B: kürzester Weg, geringer Delay oder geringster Verbrauch) optimiert. Ein solches Flugsicherungsszenario besteht aus folgenden Komponenten:

- Geometrische Ausdehnung des Sektors (zweidimensional)
- Definition der Luftfahrzeuge
- Definition der Flugpläne

Dieses Szenario wird mithilfe des MATLAB-Frameworks in ein Optimalsteuerungsproblem überführt, das für jedes Luftfahrzeug eine optimale und konfliktfreie Route berechnet [1], [2], [3]. Eine Kopplung mit dem Realzeitsimulator NEWSIM<sup>1</sup> ermöglicht nun die Evaluation des Algorithmus in einem realistischen Umfeld, in dem Flugzeuge sich auch entsprechend ihres jeweiligen Flugzustands etc. bewegen. Ein entwickelter Automatikmodus setzt das Ergebnis der Steuerung mit Hilfe von erzeugten Pilotenkommandos um. Diese Kopplung wurde im Rahmen einer studentischen Arbeit entwickelt [4] und wird in diesem Artikel vorgestellt.

## Realisierte Lösung

Die Interaktion der beiden Komponenten ist in Abbildung 1 veranschaulicht. Die Flugpläne des Air Traffic Simulators NEWSIM werden über eine Konverter-Schnittstelle an MATLAB übergeben. Nach Ermittlung der Lösung durch das MATLAB-Framework wird diese Lösung an den NEWSIM so übergeben, dass die

simulierten Luftfahrzeuge den berechnen Flugrouten folgen.

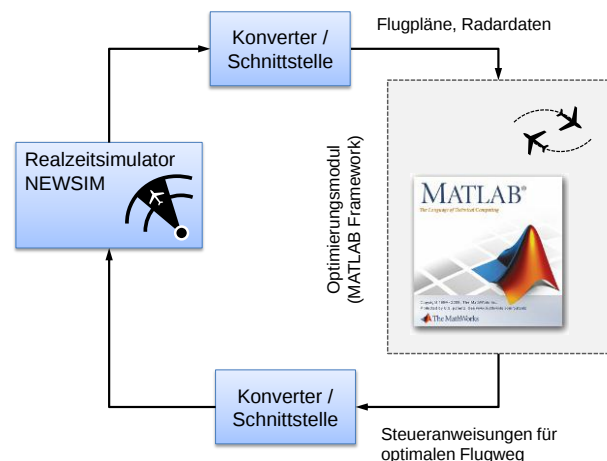


Abb. 1: Prinzip der Integration von MATLAB in NEWSIM

Für die Überprüfung der realisierten Schnittstelle standen einige Testszenarien zur Verfügung. Abbildung 2 zeigt ein einfaches Szenario, welches aus vier Luftfahrzeugen besteht, die sich alle in derselben Flugfläche befinden. Zur gleichen Zeit tritt aus jeder Himmelsrichtung jeweils ein Luftfahrzeug in den Sektor ein und plant einen Austritt auf der gegenüberliegenden Seite des Sektors (Entry Flight Level = Exit Flight Level). Es ist offensichtlich, dass dieses Szenario eines Eingriffes bedarf, da alle Luftfahrzeuge durch den Mittelpunkt des Sektors fliegen möchten und es dadurch mindestens zu einer Staffelungsunterschreitung kommt.

Diesen Eingriff leistet das MATLAB-Framework und erzeugt für das vorliegende Szenario die in Abbildung 2 sichtbaren Trajektorien.

Für die Ermittlung der Lösungs-Trajektorien greift das Framework auf eine vereinfachte Repräsentation des physikalischen Modells zurück. Bisher konnte diese Lösung nur stand-alone überprüft werden. Durch die

<sup>1</sup> NEWSIM ist der en-route ATC-Simulator der DFS und wird für Trainings-, Ausbildungs- und Forschungszwecke verwendet, siehe z.B. [5]

Kopplung mit dem Realzeitsimulator NEWSIM soll der OptimalControl-Algorithmus in einem realistischeren Umfeld getestet werden, sodass abgeschätzt werden kann, ob die ermittelten Lösungstrajektorien auch praktikabel und in einer Simulation umsetzbar sind.

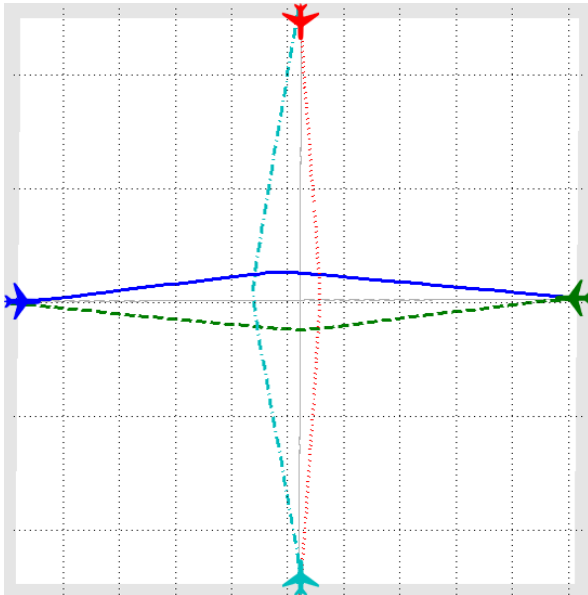


Abb.2: Prinzip: Lösung des MATLAB-Frameworks für ein einfaches Szenario

Es wurde eine Schnittstelle implementiert, die den Datenaustausch zwischen MATLAB-Framework und NEWSIM leistet. Diese Schnittstelle besitzt zwei zentrale Aufgaben. Zum einen muss die Schnittstelle das

Framework mit den NEWSIM-Daten initialisieren, damit es für die Ausgangssituation eine möglichst genaue Annäherung an das NEWSIM-Szenario besitzt und dieses Szenario hinsichtlich optimaler Trajektorien berechnet werden kann. Zum anderen kommuniziert die Schnittstelle das Ergebnis zurück an den NEWSIM, sodass eine Umsetzung und Überprüfung des Ergebnisses möglich wird.

## Initialisierung des MATLAB-Frameworks

Das MATLAB-Framework vereint mehrere mathematische Lösungsverfahren unter einer gemeinsamen Schnittstelle. Die Art der Dateninitialisierung ist für jedes Verfahren identisch. Es liegen Datenstrukturen innerhalb des Frameworks vor, die die Sektorausdehnung, die Luftfahrzeuge und die Flugpläne beinhalten.

Die Kernproblematik der Initialisierung besteht in der Transformation der NEWSIM-Daten, so dass diese in dem für das MATLAB-Framework notwendigen Format vorliegen. Tabelle 1 zeigt die unterschiedlichen Datenrepräsentationen des NEWSIMs und des Frameworks.

Für die Initialisierung wird aus Performancegründen vorausgesetzt, dass ein Sektor nur aus genau einem Airspace Block (ASB) besteht, da die Herleitung eines Sektors aus mehreren ASB's und ihre Beschreibung mittels Polynomen nicht trivial ist und deshalb in dieser Arbeit nicht umgesetzt wurde.

| Thema        | NEWSIM                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | MATLAB-Framework                                                                                                                                                                                          |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sektor       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sektor besteht aus mehreren Airspace Blocks (ASB)</li> <li>- jeder ASB besitzt eine zweidimensionale Koordinatenliste</li> <li>- jeder ASB besitzt eine obere und untere Abgrenzung</li> <li>- Längenangaben in Nautischen Meilen</li> </ul>                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sektor besteht aus zweidimensionaler Koordinatenliste</li> <li>- Längenangaben in Meter</li> </ul>                                                               |
| Luftfahrzeug | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aircraft-Model von NEWSIM besitzt verschiedene Geschwindigkeitsdarstellungen</li> <li>- Einheiten sind: Knoten, Mach</li> <li>- Geschwindigkeitstypen: Indicated Air Speed (IAS), Calibrated Air Speed (CAS), True Air Speed (TAS), Ground Speed (GS)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Definiert durch Name, Minimal-, Maximal- und Nominalgeschwindigkeit</li> <li>- Geschwindigkeit in m/s</li> <li>- Kein definierter Geschwindigkeitstyp</li> </ul> |
| Flugplan     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 4D-Profil aus Flight Management System (FMS)</li> <li>- Boden-Flugplan aus dem ATM-System</li> </ul>                                                                                                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Flugplan besteht aus: Sektoreintrittskordinate, -zeit, -geschwindigkeit und Sektoraustrittskordinate und -geschwindigkeit</li> </ul>                             |

Tabelle 1: Gegenüberstellung von Datenrepräsentationen

Für die Geschwindigkeitsrepräsentation der Luftfahrzeuge des NEWSIMs wird Ground Speed (GS) verwendet. Dies ist derzeit allerdings nur möglich, da die Szenarien als zusätzliche Einschränkung keinen Wind aufweisen dürfen. Dadurch entspricht die Ground Speed der True Air Speed (TAS), da gilt:  $GS = TAS + \text{Windgeschwindigkeit}$ .

Für die Repräsentation des Flugplans wird ein Hybrid aus 4D-Profil des FMS (Flight Management Systems) im Flugzeug und aus dem ICAO-Flugplan am Boden verwendet. Da beobachtet wurde, dass die Geschwindigkeiten des Boden-Flugplans (TAS) nicht immer genau genug sind<sup>2</sup>, werden die Geschwindigkeiten der Luftfahrzeuge zu den bestimmten Ein- und Austrittskoordinaten des Sektors dem 4D-Profil entnommen.

Durch die beschriebene Datentransformation ist es möglich, ein NEWSIM-Szenario im MATLAB-Framework abzubilden. Dies schafft die Basis für eine Umsetzung des Ergebnisses, wie bereits zuvor beispielhaft in Abbildung 2 zu sehen war.

## Umsetzung des MATLAB-Ergebnisses

Die Umsetzung des Ergebnisses basiert wie die Initialisierung auf den vorliegenden Datenstrukturen des Frameworks, die als Schnittstelle für die verschiedenen Lösungsverfahren dient.

Es liegen mehrere  $m \times n$ -Lösungsmatrizen vor, wobei  $m$  die Anzahl der Zeilen und  $n$  die Anzahl der Spalten ausdrückt. Darüber hinaus ist  $m$  die Anzahl der Zeitschritte auf der Zeitleiter des Szenarios und  $n$  die Anzahl der Luftfahrzeuge, die in dem jeweiligen Szenario enthalten sind.

Für jede Steuergröße (Geschwindigkeit, Heading, Flughöhe) existieren zwei solcher Matrizen, da das Ergebnis einerseits in Form von Momentandaten und andererseits in Steueranweisungen vorliegt. Die Momentandaten stellen die tatsächlichen Werte der Steuergrößen zu einem definierten Zeitpunkt dar, während die Steueranweisungen aussagen, zu welcher Zeit ein bestimmter Wert instruiert werden soll. Weist ein Luftfahrzeug beispielsweise eine Geschwindigkeit von 250 Knoten auf und soll die Geschwindigkeit auf 265 Knoten erhöht werden, so erhält das Luftfahrzeug sofort eine Steueranweisung von 265 Knoten. In den Momentandaten taucht die Angabe von 265 Knoten

deutlich später auf, da sich die Geschwindigkeit nicht sprunghaft, sondern nur graduell erhöht.

Basierend auf den Steueranweisungsmatrizen wurde ein NEWSIM-Automatikmodus entwickelt, der eine Liste von Pilotenkommandos entgegennimmt und diese zur gewünschten Zeit umsetzt. Die Pilotenkommandos ergeben sich aus der Steueranweisungsmatrix.

Es stellte sich heraus, dass das vielversprechendste Lösungsverfahren des MATLAB-Frameworks (ffhyp-Lösungsansatz) die Matrizen der Steueranweisungen nicht befüllt. Stattdessen stellt es das Ergebnis nur in Form von Momentandaten bereit. Hier sind zwei Möglichkeiten vorhanden, wie der Automatikmodus dennoch das Ergebnis des MATLAB-Frameworks umsetzen kann. Entweder werden die Momentandaten als Steueranweisungen interpretiert oder die Steueranweisungen müssen aus den Momentandaten erzeugt werden. An dieser Stelle muss also eine Entscheidung getroffen werden. Eine möglichst genaue Umsetzung kann durch die Interpretation der Momentandaten als Steueranweisungen erfolgen. Liegt der Fokus jedoch auf Kommunizierbarkeit und somit auf einer geringeren Anzahl von Steueranweisungen, so muss dies bei der Erzeugung der Steueranweisungen berücksichtigt werden.

Der entwickelte Algorithmus, der eine kontrollierte Erzeugung von Steueranweisungen leistet, ist in Abbildung 3 zu sehen.

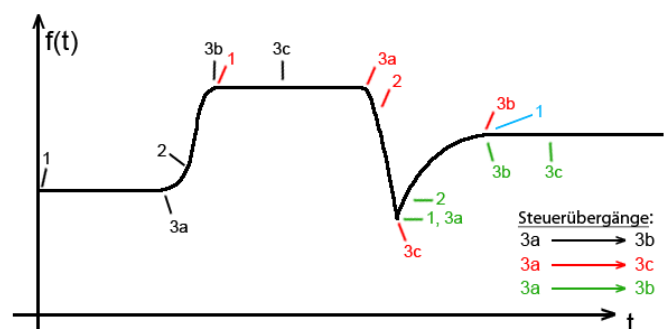


Abb. 3: Veranschaulichung des Algorithmus zur Erzeugung von Steueranweisungen (Steuerschritte siehe unten)

Es ist eine kontinuierliche Funktion zu sehen, die durch wenige Steueranweisungen erzeugt werden soll. Der Algorithmus bedient sich zweier Schwellenwerte  $\varepsilon_m$  und

<sup>2</sup> Diese gilt nur für den *Requested Flight Level (RFL)* falls nicht anders angegeben in Feld 15 des ICAO Flugplans.

$\varepsilon_w$ , wobei  $\varepsilon_m$  für diejenige Steigung steht, die für einen horizontalen Verlauf (somit gilt  $\varepsilon_m \approx 0$ ) steht und  $\varepsilon_w$  derjenige Wert ist, der eine Steuerveränderung erkennt. Durch  $\varepsilon_w$  können insignifikante Steuerveränderungen ignoriert werden, wodurch die Anzahl der Steueranweisungen reguliert werden kann.

Der Algorithmus setzt sich aus drei Schritten zusammen, die in Abbildung 3 zu sehen sind.

1. Der aktuelle Wert ( $f(x_0)$ ) wird als Ausgangswert  $f(x_a)$  gespeichert
2. Neue Steuerveränderung wird registriert, wenn die Differenz des aktuellen Werts und des Ausgangswert größer als der Schwellenwert ist ( $|f(x_0) - f(x_a)| > \varepsilon_w$ )
3. Beginn und Ende der Steuerveränderung wird ermittelt
  - a. Ausgehend von 2 nach links wandern (maximal bis zum Ausgangswert), bis ein horizontales Steigungssegment ( $m < \varepsilon_s$ ) gefunden wird.
  - b. Ausgehend von 2 nach rechts wandern, bis ein horizontales Steigungssegment ( $m < \varepsilon_s$ ) gefunden wird.
  - c. Ausgehend von 2 nach rechts wandern, bis ein Vorzeichenwechsel gefunden wird.
4. Die erkannte Steueranweisung beginnt bei Zeitpunkt 2 und endet bei dem früheren Ereignis von 3b oder 3c, wie in der rechten unteren Ecke von Abbildung 3 angedeutet ist.

Die aufgezählten Schritte stellen eine Iteration dar. In der gezeigten Abbildung wurden vier Iterationen durchgeführt, wobei jede Iteration durch eine unterschiedliche Beschriftungsfarbe gekennzeichnet ist. Die letzte Iteration erkennt keinen Steuerübergang, weshalb nur der erste Schritt durchgeführt wird.

Durch die Anpassung der beiden Schwellenwerte kann die Anzahl und das Timing der Steueranweisung konfiguriert werden. Dadurch kann man eine Präferenz von Genauigkeit oder Kommunizierbarkeit berücksichtigen. Für jede Steuergröße (Steuerkurs, Flughöhe, Geschwindigkeit) können unterschiedliche  $\varepsilon_w$ -Schwellenwerte verwendet werden, sodass eine Geschwindigkeitsveränderung beispielsweise erst ab 10 Knoten und eine Steuercursänderung beispielsweise bereits ab 5 Grad erkannt werden kann.

Auf den nachfolgenden Abbildungen sind die vom zuvor gezeigten MATLAB-Ergebnis gehörigen Lösungs-

Umsetzungen, die durch den entwickelten Automatikmodus realisiert wurden, zu sehen.

Abbildung 4 zeigt die vom Simulator erzeugten Radarplots (screen copy) bei Realisierung des oben erwähnten NEWSIM-Automatikmodus unter Verwendung der Momentandaten als Pilotenkommandos. Das bedeutet, dass dies die genaueste Approximation des MATLAB-Ergebnisses ist. Allerdings werden dabei eine Vielzahl von Steuerkommandos erzeugt (in der Größenordnung von ca. 100 pro Szenario), was nicht wirklich praktikabel ist.

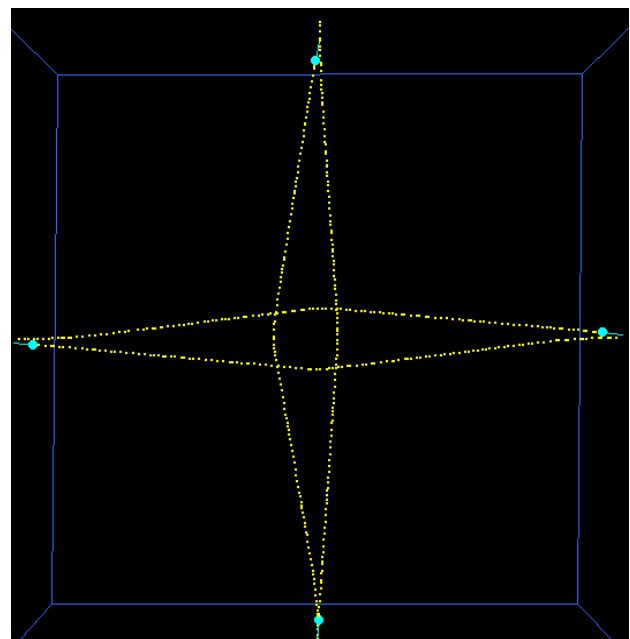


Abb.4: NEWSIM-Umsetzung mit Momentandaten-Interpretation (viele Steuerkommandos)

Eine Lösung, die für die Pilotenkommandos den zuvor dargestellten Algorithmus verwendet, ist in Abbildung 5 zu sehen. Hier werden deutlich weniger Pilotenkommandos erzeugt, und dadurch kann man Abweichungen gegenüber Abbildung 4 erkennen, da die Flugzeuge jetzt nur noch zu wenigen Zeitpunkten in ihrem Steuercurs beeinflusst werden.

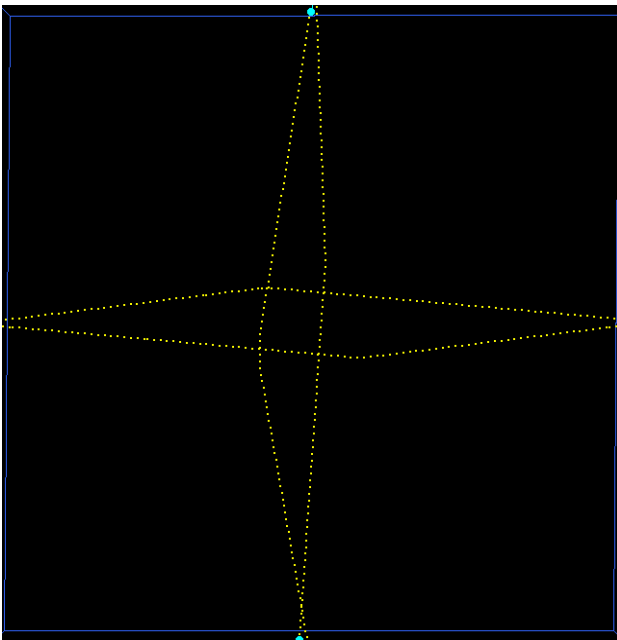


Abb. 5: NEWSIM-Umsetzung mit Erzeugung von weniger Steuerkommandos (s. Abb. 3)

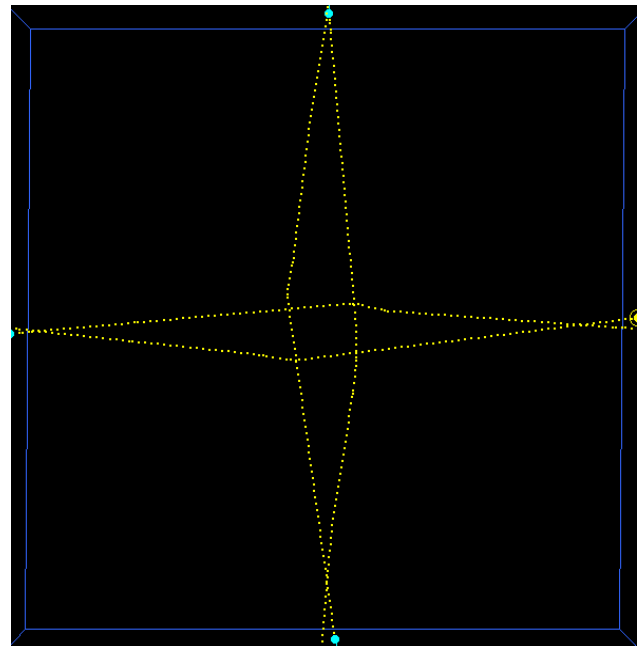


Abb. 6: NEWSIM-Umsetzung mit Erzeugung von Pilotenkommandos und wiederholter Berechnung von Lösungen

Eine weitere Funktionalität der entwickelten Kopplung ist, während der Durchführung eines Szenarios den Lösungsalgorithmus des MATLAB-Frameworks mehrfach auszulösen und das Ergebnis durch Steuerkommandos umzusetzen. Dies ist in Abbildung 6 daran zu erkennen, dass mehrere Knicke in den Flugbahnen zu sehen sind. In diesem Fall wurde alle drei Minuten das Szenario neu berechnet. Schnelle Umsetzungen des MATLAB-Ergebnisses resultieren in den dargestellten Knicken.

Bei dieser kontinuierlichen Neuberechnung konnte eine Besonderheit der Implementierung des MATLAB-Algorithmus entdeckt werden. Die Tatsache, dass das Framework die Orientierung der Luftfahrzeuge nicht kennt, führt zu wechselhaften Neuausrichtungen der Lösungstrajektorien. Das Framework geht davon aus, dass das Flugzeug von der aktuellen Position auf kürzestem Wege zu seinem Austrittspunkt fliegt.

Die Neuberechnung der Lösung ist eine zusätzliche Option, die notwendig wird, wenn eine Flugwegsüberwachung meldet, dass das Flugzeug sich nicht an die vorher gegebenen Anweisungen gehalten hat und eine Abweichung einen bestimmten Schwellwert überschritten hat. Diese Überwachung ist bisher noch nicht implementiert, aber notwendig für eine spätere Umsetzung.

## Gründe für Abweichungen

An der Abbildung der NEWSIM-Umsetzung ist zu erkennen, dass es Abweichungen zu dem berechneten Ergebnis des MATLAB-Frameworks gibt.

Gründe für die Abweichungen sind:

- NEWSIM verwendet ein deutlich komplexeres Luftfahrtmodell als das MATLAB-Framework.
- Konvertierungen und Rundungsvorgänge (für die Erzeugung der Pilotenkommandos) führen zu Genauigkeitsverlust
- Das MATLAB-Framework ignoriert bei den verwendeten Lösungsansätzen Eintritts- und Austrittsgeschwindigkeit der Luftfahrzeuge. Stattdessen nimmt das Framework an, dass das Luftfahrzeug während der gesamten Simulation Nominalgeschwindigkeit besitzt.
- Die Lösung des MATLAB-Frameworks beginnt bereits außerhalb des Sektors. Dadurch kommt es zu früheren Steuerkursänderungen.

## Fazit und Ausblick

Trotz der aufgezeigten Abweichungen war die Kopplung zwischen MATLAB-Framework und NEWSIM erfolgreich. Die entwickelte Schnittstelle ermöglicht die Umsetzung des MATLAB-Ergebnisses in einem realistischen Umfeld

und kann in Zukunft als Forschungswerkzeug im Feld von „OptimalControl“ verwendet werden.

Relevante Themen, bei denen diese Kopplung durchgeführt verwendet werden kann, sind beispielsweise die Erweiterung der Lösungsstrategie in einen dreidimensionalen Raum oder die Verkürzung der Lösungsdauer.

Die Einführung von Flughöhen stellt kein großes Hindernis dar, da die Schnittstelle möglichst aufwärtskompatibel entwickelt wurde. Natürlich ist eine notwendige Modifikation der Schnittstelle für zukünftige Änderungen nicht völlig ausgeschlossen.

Unabhängig davon ist es dank der entwickelten Schnittstelle möglich die Umsetzung des NEWSIMs für die Bewertung einer optimalen Trajektorie zu Rate zu ziehen. Darüber hinaus können die Steueranweisungen in einer Realzeitsimulation hinsichtlich der Kommunizierbarkeit getestet werden.

Somit ist nicht nur die MATLAB-Darstellung ausschlaggebend für eine Bewertung der Lösungstrajektorien, sondern letztendlich die Umsetzung innerhalb des NEWSIMs. Mit dieser Arbeit konnte ein wichtiger Schritt hin zu einem realistischeren Umfeld und einer späteren Validierung gemacht werden.

## Referenzen & Literatur

|     |                                                                                                                                                                                                                |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [1] | Hochstrasser, Markus: A Unified MATLAB-Framework for Nonlinear Optimization of Mixed Integer Optimal Control Problems in Air Traffic Separation Management, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2013 |
| [2] | Hochstrasser, Markus ; Poppe, Dr. M.: Erweiterung in der Trajektorien-Optimierung mehrerer Flugzeuge mit Hilfe der optimalen Steuerung. 2013. in: „TE im Fokus 2013/01“                                        |
| [3] | Lepojec, Milena; Poppe, Dr. M.: Mehrkriterielle Optimierung: Ein Ansatz zur Automatisierung in der Flugsicherung. 2012. In: „TE im Fokus 2012/01“                                                              |
| [4] | Olah, David: Entwicklung eines OptimalControl-Automatikmodus für den Flugsicherungssimulator NEWSIM, Bachelorarbeit, 2014                                                                                      |
| [5] | Jan Fiegert, Ralph Kar, Peter Krauspe: NEWSIM-Weiterentwicklung - Vom großen Realzeitsimulator zum „Training in the Cloud“, 2012. In „TE im Fokus 2012/01“                                                     |

## Abkürzungen

|        |                                  |
|--------|----------------------------------|
| FMS    | Flight Management System         |
| GS     | Ground Speed                     |
| IAS    | Indicated Air Speed              |
| NEWSIM | DFS new generation ATC simulator |
| TAS    | True Air Speed                   |

# Data Envelopment Analysis – Vorschlag einer neuen Methodik zum Performancevergleich der Flugsicherungen

Jörg Buxbaum, Thomas Standfuß

## Vorwort

Thomas Standfuß war bis Ende Mai 2014 bei der DFS tätig, nachdem er sein Masterstudium am Institut für Wirtschaft und Verkehr der TU Dresden abgeschlossen hatte [1]. Basierend auf seinen Arbeiten untersucht die DFS derzeit, ob die Data Envelopment Analysis als neuartige Form der Performance-Analyse einen komplementären Mehrwert zu bestehenden Verfahren bietet. Dieser Artikel stellt diese Methodik vor.

## Einleitung

Steigende Luftverkehrszahlen und wachsender Kostendruck in der Airline-Industrie führen seit Mitte der neunziger Jahre verstärkt zu Bestrebungen, die betriebliche Leistungsfähigkeit der monopolistisch agierenden Flugsicherungsdienstleister (ANSP) miteinander zu vergleichen. Konzentrierten sich initial die Untersuchungen auf Unterschiede zwischen den Pauschalkennzahlen der ANSP in Europa und der Flugsicherungsorganisation FAA in den USA, hat sich seit 1998 ebenfalls eine vergleichende, detaillierte Betrachtung von Performance-Kennwerten der ANSP innerhalb Europas etabliert.

Vorrangiges Ziel dieser Vergleiche ist die Ermittlung, welche Flugsicherungsorganisation in welchen Domänen welches Verhältnis von Aufwand zu Nutzen bietet. Das sich daraus ergebene Ranking kann zum einen verwendet werden, um Druck auf minderproduktive bzw. mindereffiziente Organisationen auszuüben. Zum anderen kann es als Grundlage dienen, konkrete Maßnahmen für Produktivitäts- und Effizienzverbesserungen abzuleiten, beispielsweise durch die Einführung neuer Technik, dem Neuentwurf von Lufträumen, einer Verbesserung von Arbeitsweisen und der Organisation der Flugverkehrskontrolle. Weiterhin kann der Vergleich dazu dienen, die „optimale“ Aufwand-Nutzen-Relation einzelner Betriebsteile oder ANSP in Berücksichtigung (zu definierender) unveränderbarer Rahmenbedingungen abschätzen zu können.

Der vergleichenden, auch grenzüberschreitenden Leistungsmessung von ANSPs kommt insbesondere deswegen eine besondere Rolle zu, da die Dienstleistung der Flugsicherung als „essential service“ in der Luftfahrt

## Definition von Produktivität und Effizienz [1]

Unter Produktivität versteht man im Allgemeinen einen Quotienten aus Nutzen und Aufwand (oder Output zu Input). Je größer dieser Wert des Quotienten wird, desto höher ist die Produktivität. Die Effizienz beschreibt ebenfalls die Relation von Nutzen und Aufwand, allerdings hinsichtlich eines wirtschaftlichen Prinzips. Man unterscheidet hier das Maximal- und das Minimal-Prinzip: Entweder wird bei gegebenem Aufwand der Nutzen maximiert oder der fixe Nutzen mit einem minimalen Einsatz an Produktionsfaktoren realisiert.

Diesen Sachverhalt spiegelt die technische Effizienz wieder. Hat das Unternehmen zudem die optimale Betriebsgröße erreicht, gilt es als skaleneffizient. Nutzt es dazu noch die optimale, kostengünstigste Aufwand-Nutzen-Kombination, agiert es allokativ effizient. Das Produkt aus allen drei Faktoren bildet die „Totale ökonomische Effizienz“. In diesem Artikel geht es jedoch primär um die ersten beiden Faktoren.

mangels relevanter Konkurrenz im Streckenbereich keine anderweitige Reflektion ihrer Performanz zur Verfügung steht. In einem herkömmlichen Marktumfeld wären z.B. der Produktmarktanteil und dessen Entwicklung ein solider Indikator für die Unternehmensleistung bzw. deren Effizienz.

## Herausforderung von Performancevergleichen

Es existieren verschiedene Möglichkeiten, die Effizienz von Unternehmen oder deren Einheiten zu bestimmen. Man unterscheidet hier primär zwischen stochastischen und deterministischen sowie zwischen parametrischen und nicht-parametrischen Methoden. Welche gewählt wird hängt maßgeblich von den vorhandenen Daten und dem Analysezweck ab.

In Vergangenheit wurde beispielsweise in den EUROCONTROL-ACE-Reports [2] ein zweidimensionales Analyseschema verwendet, um die Flugsicherungsunternehmen zu bewerten und zu vergleichen. Zweidimensional heißt, ein Output wurde einem

bestimmten Input gegenüber gestellt: z.B. Anzahl der kontrollierten Flugstunden pro Lotsenstunde. Allerdings hat in der Realität ein Großteil der Unternehmen mehrere Produktionsfaktoren und auch mehrere Outputs, so dass sich bei Untersuchung einer Zahl  $n$  Input-Output-Verhältnisse ein Ranking mit  $n$  Abfolgen ergibt, die selten identische Platzierungen der betrachteten Betriebseinheiten zum Resultat haben.

Eine isolierte, vergleichende Betrachtung einzelner Input-Output-Verhältnisse birgt das Risiko, andere, gleichsam bedeutende und damit in Verbindung stehende Input-Output-Verhältnisse außer Acht zu lassen. Ergebnis einer derartigen Betrachtung ist ein scheinbar „für alle“ erreichbares Optimum, das durch den Leistungsführer in dieser isolierten Domäne vorgegeben wird.

Beispiel:

Im Ranking der europäischen Gate-to-Gate-Kosten ([2], Seite 18, siehe Abbildung 1) rangiert die DFS auf Platz sechs. Fünf betrachtete ANSP weisen höhere Kosten pro Flugstunde auf, 31 ANSP niedrigere Kosten. Daraus unmittelbar zu schließen, dass der ANSP mit den geringsten Kosten pro Flugstunde (EANS / Estland) als Benchmark gesehen werden kann, lässt weitere Output-Faktoren außer Acht, wie z.B. den Anteil der verzögerungsfrei geführten Flüge pro Luftraumeinheit. Ebenso würde nicht betrachtet, dass die Kontrolle von Flugverkehr in Gebieten höchster Verkehrsdichte bzgl.

Überflügen und Verkehr, der im Bereich des ANSPs startet oder landet, andere technische und betriebliche Ansprüche an die ANSP richten, die wiederum mit Aufwand und damit finanziellem Einsatz verbunden sind. Ebenfalls unbeleuchtet bleiben Faktoren, die aufgrund nationaler, ökonomischer Rahmendbedingungen die Kosten mit diktieren, ohne von den ANSP beeinflusst werden zu können (z.B. Durchschnittslöhne, Lebenshaltungskosten). Derartige Analysen bedürfen also stets weiterer Erklärung und Interpretation. Wird dieser Aspekt vernachlässigt, drohen Trugschlüsse und Fehlinterpretation.

## Die Data Envelopment Analysis (DEA)

Als Mittel, unter Berücksichtigung mehrerer Input-Output-Verhältnisse globale Effizienzwerte für abgeschlossene Betriebseinheiten oder ganze ANSPs aufzuzeigen, wurde für eine Performance-Untersuchung im Kontext von Flugsicherungsdienstleistungen die so genannte Data Envelopment Analysis (DEA) [5] verwendet. Im Bereich der Flugsicherung wurde sie bisher nicht angewendet, wohl aber für Verkehrsflughäfen [4]. Eine DEA erlaubt – je nach Datenumfang – die Berücksichtigung mehrerer Inputs und/oder mehrerer Outputs [4]. Die betrachteten Unternehmen bzw. deren Einheiten werden auch als Decision Making Unit (DMU) bezeichnet.

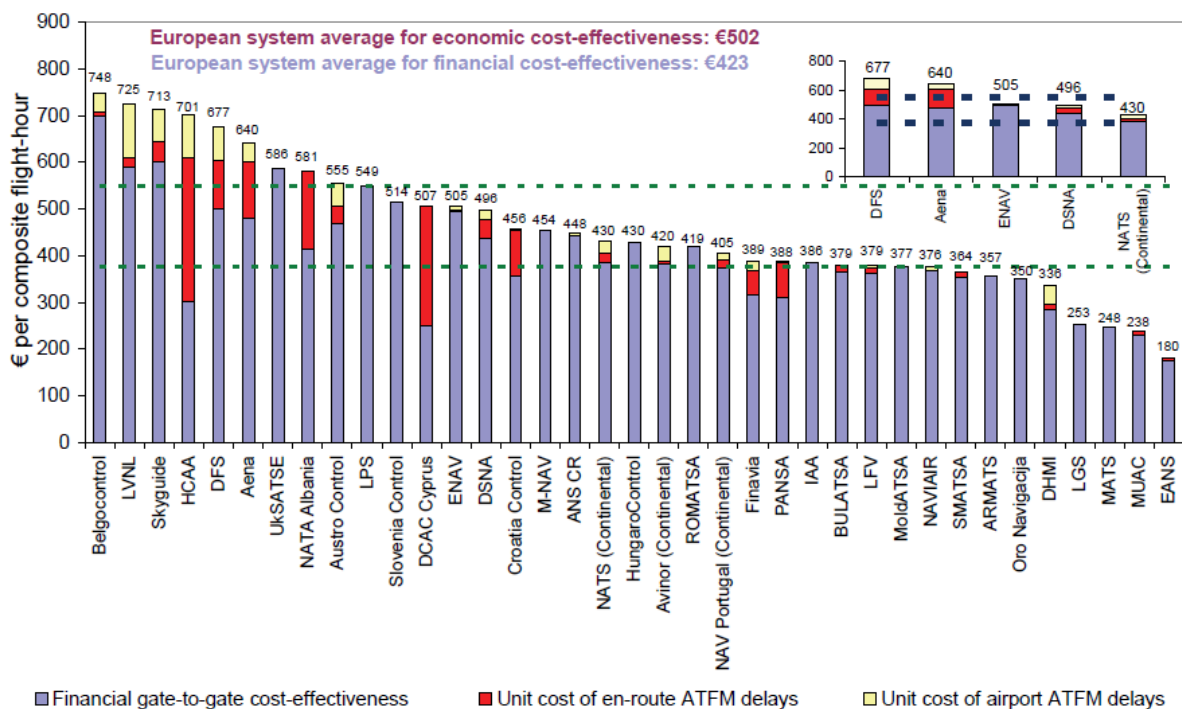


Abb. 1: Rangfolge der „Economic gate-to-gate cost-effectiveness indicators“ in Europa, 2011 (© European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL), [2])

## Funktionsweise einer DEA

Basis einer aussagekräftigen und validen Effizienzanalyse ist eine hohe Datenqualität. Die Daten müssen vollständig, d.h. für alle DMUs und über den kompletten, betrachteten Zeitraum lückenlos verfügbar sein. Zudem sollten sie in der gleichen Art und Weise erhoben werden. Der Aufbau einer Datenbank ist somit ein entscheidendes Element, der unter Umständen, inklusive Data Mining, sehr viel Zeit in Anspruch nehmen kann.

Die gewählte Kombination der für die Analyse verwendeten Inputs und Outputs kann mittels des Korrelationskoeffizienten erfolgen. Er beschreibt den linearen Zusammenhang zwischen zwei Merkmalen. Es ist zu beachten, dass kein verhältnismäßig großer Zusammenhang zwischen den Datensätzen der einzelnen Faktoren besteht. Dies kann über diverse statistische Methoden realisiert werden. Er sollte also möglichst nahe 0 sein. Es werden jeweils zwei Input- oder Output-Datensätze der DMUs miteinander verglichen.

Im nächsten Schritt kann nun die DEA durchgeführt werden. Um die Effizienz messen zu können muss zunächst eine Produktionsfunktion bestimmt werden (Funktionale Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Einsatz an Produktionsfaktoren und damit realisierbarer maximaler Ausbringungsmenge bei gegebener Technologie, [6]). Dafür werden die Input- und Outputfaktoren mittels mathematischer Optimierung derart gewichtet, dass der Quotient aus Output zu Input maximiert wird. Dieses Maximierungsproblem wird für jede DMU, unter Berücksichtigung aller anderen DMUs, einzeln gelöst. Für jede DMU werden so ein virtueller Input und ein virtueller Output errechnet. Grafisch gesehen entsteht eine zweidimensionale Abbildung von

virtuellen Input-Output-Kombinationen aller DMUs (siehe Abbildung 2).

Bildet man die Produktionsfunktion anhand der Regressionsgeraden (blau) würde das bedeuten, dass alle Firmen oberhalb „übereffizient“ agieren. Aber in der Realität gibt es so etwas wie eine Übereffizienz natürlich nicht. Daher errechnet die DEA eine Randproduktionsfunktion (grün), die nur die optimalen Kombinationen verbindet. Alle DMUs auf dieser Linie bekommen den Wert 1 oder 100%. Sie arbeiten technisch effizient.

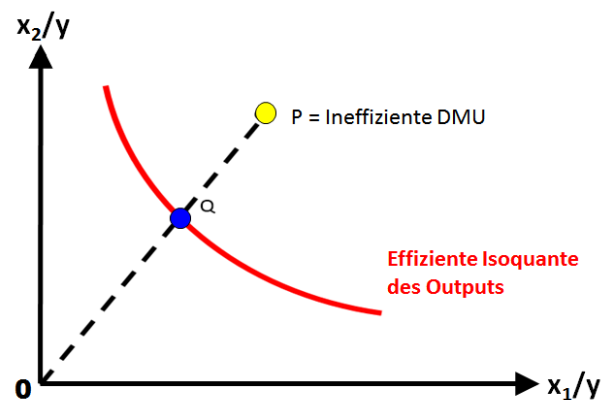


Abb. 3: Distance Function an einem Beispiel mit zwei Inputs ( $x_1, x_2$ ) und einem Output ( $y$ ). Der Grad an technischer Effizienz wird über den Quotienten der Entfernungen  $OQ/OP$  errechnet.

Die DEA ist eine vergleichende Effizienzanalyse, d.h. die Effizienzwerte der DMUs werden in Relation zueinander betrachtet. Für die DMUs unterhalb des effizienten Randes wird der Grad an Effizienz bestimmt, der einen Wert zwischen 0 und 1 annimmt. Das geschieht über Distance Functions (vergleiche Abbildung 3), mittels

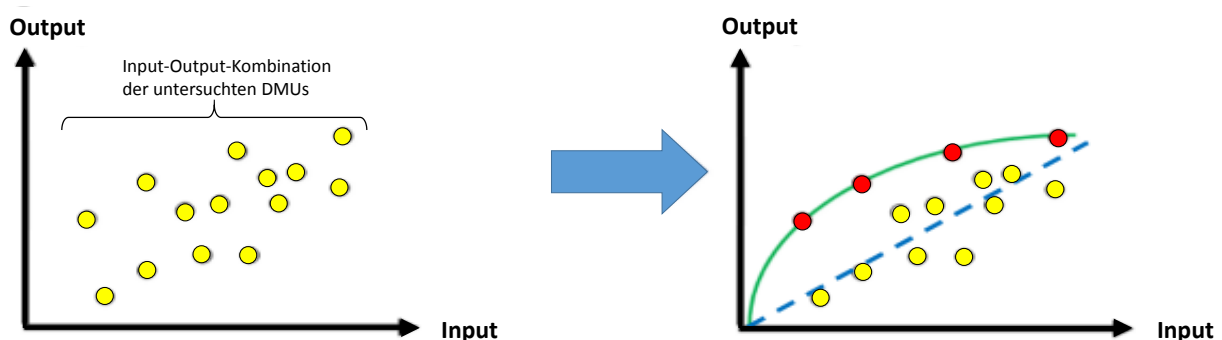


Abb. 2: Durch die Verbindung aller DMU mit maximalem Verhältnis von Output zu Input ergibt sich die Randproduktionsfunktion (rechte Grafik, grüne Linie). Die blau eingezeichnete Linie stellt die Regressionsgerade dar, die allerdings nur eine bedingte Aussagekraft hat.

derer der Abstand zur Randproduktionsfunktion kalkuliert wird.

Wichtig ist hier die Art der DEA. Diese kann input- oder outputorientiert sein. Das richtet sich maßgeblich danach, was für die DMU besser beeinflussbar ist. Der Output einer Flugsicherung ist von dieser selbst nicht aktiv veränderbar. Die Nachfrage wird maßgeblich von den Fluggesellschaften bestimmt. Die Flugsicherung kann die Kontrolle eines Fluges nicht ablehnen, sondern höchstens zeitlich verzögern (ATFM-Delay). Dagegen kann ein Flugsicherungsunternehmen z.B. bestimmen, welchen Umfang an Personal und welche Kategorie an technischer Ausrüstung sie nutzen will. Der Input ist demnach eher veränderbar und die DEA daher inputorientiert. Ein ineffizienter ANSP würde daher versuchen, den Aufwand an Produktionsfaktoren bei konstantem Output zu senken. Graphisch betrachtet wäre das in dem Beispiel eine Verschiebung der DMU nach links, bei Outputorientierung nach oben (siehe Abbildung 4).

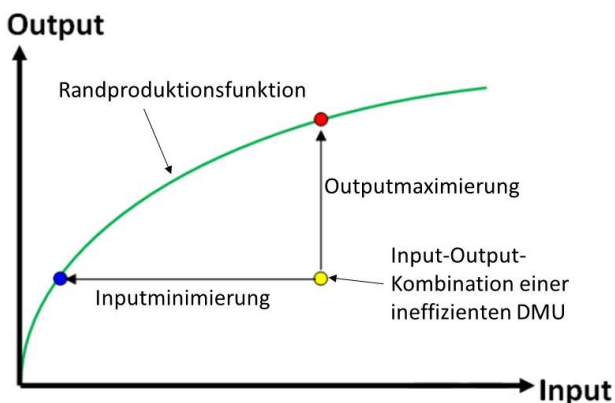


Abb. 4: Input-Output-Kombination einer ineffizienten DMU

Der gelbe Punkt stellt die Input-Output-Kombination einer ineffizienten DMU dar. Die grüne Linie zeigt die Randproduktionsfunktion. Um die Effizienz zu steigern würde bei Outputmaximierung das Unternehmen versuchen, die Position des roten Punktes zu erreichen, bei Inputminimierung die des blauen Punktes.

## Zeitlicher Bezug der Untersuchungen

Grundsätzlich wird eine DEA Jahr für Jahr durchgeführt. Man wird in einer periodischen Betrachtung jedoch feststellen, dass die gebildete Produktionsfunktion nicht fix ist, sondern sich über die Zeit verschiebt (siehe Abbildung 5).

Aus dieser Verschiebung kann man die so genannten Malmquist-Indizes (MI) ablesen, [6]). Das wären im Einzelnen die Änderungsraten der technischen und skalaren Effizienz sowie der Totalen Faktorproduktivität (TFP). Ein Wert größer 1 symbolisiert dabei ein Wachstum eines Indizes, ein Wert kleiner 1 einen Rückgang.

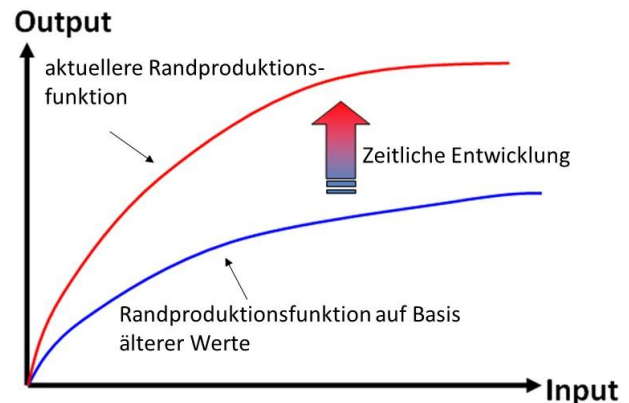


Abb. 5: Veränderung der Produktionsfunktion über die Zeit

Die „Totale Faktorproduktivität“ ist ein Maß für die Entwicklung der Produktivität einer DMU. Sie misst den Teil des Wachstums, welcher nicht auf eine Veränderung des Einsatzes der Produktionsfaktoren zurückzuführen ist. Sie unterliegt verschiedenen Einflüssen, wird aber häufig als ein Ausdruck des technologischen Fortschritts und der Effizienzsteigerung angesehen.

Es ist sichtbar, dass man aus einer DEA sehr viele Informationen ziehen kann. Die technische und skalare Effizienz der DMU, die Skaleneffekte unter denen sie arbeitet, die eben besprochenen Änderungsraten sowie ggf. die allokativen Effizienz (allokativ Effizienz ist gegeben, wenn das Unternehmen die kostengünstigste Inputkombination wählt, um den Output zu produzieren). Das heißt, wenn der soziale Überschuss bei gegebenen Kosten, gegebener Nachfrage und Qualität usw. maximal ist [8]. Der Vorteil der DEA ist eben grade nicht einfach die Feststellung „du bist ineffizient“, sondern die Aussage, ob es an den Mengen, Kosten oder der Betriebsgröße liegt.

## Einfluss von exogenen Effekten

Unter exogenen Effekten versteht man Effekte, auf die eine Flugsicherung wenig oder gar keinen Einfluss hat: Größe und Komplexität des Luftraumes, Traffic Mix, sozio-ökonomische Faktoren, Wettereinflüsse, Betriebskonzepte etc. Der Einfluss dieser Effekte wird

im zweiten Teil der Analyse bestimmt. Denn bisher weiß man zwar, welche Firmen effizient agieren und welche nicht, die Vollständigkeit an Information über die Gründe hierfür ist nicht gegeben. Dafür wird nun eine so genannte Tobit-Regression durchgeführt [7]. Das Tobit-Verfahren ist eine Form der multivarianten Regressionsanalyse. Dabei werden die Daten zensiert, was eine Prognose ungültiger Werte verhindern soll. Zum Beispiel darf in der Regressionsgerade kein negativer Effizienzwert existieren

Durch die Regressionsanalyse kann bestimmt werden, welche Faktoren in welcher Intensität und in welche Richtung (positiv oder negativ) auf die Effizienz einwirken. Die Werte der im ersten Schritt berechneten Effizienzwerte bilden dabei die abhängige Variable  $y$ . Die unabhängigen Variablen  $x_1$  bis  $x_n$  sind die Einflussfaktoren. Berechnet werden  $a_1$  bis  $a_n$  durch Statistiksoftware wie z.B. SPSS®. Sie geben den Einfluss der jeweiligen unabhängigen Variablen auf die Effizienzwerte wieder.

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots a_nx_n$$

Hierbei kann man nicht nur lineare Zusammenhänge unterstellen, sondern u.a. auch quadratische oder logarithmische. Dies ist vor allem dann interessant, wenn der Einfluss des Faktors auf die Effizienz als nicht linear angesehen wird. Es wird getestet, welches Modell am besten die empirisch gewonnenen Daten abbildet. Dazu dienen statistische Tests zur Modellgüte. Diese kann u.a. durch die Eliminierung statistisch nicht signifikanter Variablen erhöht werden. Das Optimum ist also eine Regressionsfunktion, die eine hohe Modellgüte aufweist und bei der für möglichst viele Variablen statistische Signifikanz nachgewiesen werden kann.

### Interpretation der Ergebnisse und Ableitung von Maßnahmen

Der letzte große Schritt ist die Interpretation der Ergebnisse und die anschließende Ableitung von Maßnahmen. Für den Ökonom beginnt hier der wohl spannendste Teil, da viele Gebiete der Wirtschaftstheorie eine Rolle spielen können. Der Anspruch besteht darin, auch weniger plausible Zusammenhänge deuten und erklären zu können. Ziel ist es aber hauptsächlich, Maßnahmen zu Effizienzsteigerung für das Unternehmen abzuleiten.

Aus der DEA erhält man bereits Aussagen darüber, welche Inputs in welchem Umfang gesenkt werden

müssten, um technische Effizienz zu erreichen. Die Angabe der Skaleneffizienz gibt Auskunft darüber, ob durch eine Vergrößerung des Unternehmens effizienter gearbeitet werden könnte oder das Unternehmen ggf. schon seine optimale Betriebsgröße überschritten hat. Sie bietet zudem den direkten Vergleich zu anderen Unternehmen und öffnet dadurch neue Perspektiven und Verbesserungspotentiale.

Die Regression gibt maßgeblich Informationen über exogene Effekte. So kann u.a. wetterbedingte Ineffizienz nicht der Flugsicherung zur Last gelegt werden und dient so auch der Argumentation für oder gegen Maßnahmen. Zudem bietet sie die Möglichkeit, die gewichtigen Faktoren zu erkennen und entsprechend zu verändern. Hat eine Variable kaum oder wenig Einfluss, wird auch deren Veränderung wenig effektiv sein.

Dieses Verfahren ist wissenschaftlich fundiert und hat bereits in zahlreichen ökonomischen Analysen zu adäquaten Ergebnissen geführt. Angewendet wurde diese Methodik bisher u.a. im Erziehungswesen, der Forstwirtschaft, bei Banken, aber auch im Luftverkehr hinsichtlich der Effizienzmessung von Airlines und Flughäfen. In einer Untersuchung zum Thema „Wissenschaftliche Analyse der Entgeltregulierung deutscher Verkehrsflughäfen“ wurde die DEA bspw. genutzt, um den Einfluss verschiedenen Regulierungstypen (z.B. Price-Cap) auf die Produktivität zu bestimmen [3]. In einer weiteren Studie wurde mittels DEA-Methodik die Effizienzverluste durch Kapazitätsengpässe und Nachtflugverbote nachgewiesen [4].

### Status und Ausblick

Aktuell wird in der DFS mittels der DEA im direkten Vergleich zu herkömmlichen Untersuchungsmethoden ermittelt, ob diese neuartige Form der Performance-Analyse einen komplementären Mehrwert an Erkenntnissen bergen kann, um zielgerichtete Ansätze zu schaffen, Aufwand und Nutzen im Rahmen der Flugsicherungsdienstleistung in ein optimales Verhältnis zu setzen.

Die Datenbanken befinden sich derzeit im Aufbau und die ersten Modelle der DEA wurden gerechnet. Dabei sollen verschiedene Ebenen betrachtet werden. Sowohl auf ANSP-Ebene (Vergleich von ANSP im FABEC), als auch auf Kontrollzentralebenen oder sogar Ebene der Einsatzberechtigungsgruppen ist eine Analyse möglich. Diskutiert wird auch, ob die DEA auch auf Einzelsektoren als Betrachtungsrahmen angewendet werden kann. Die Erkenntnisse werden mitentscheiden, ob weitergehende Untersuchungen, wie sie z.B. aktuell zwischen der PRU,

dem FABEC und der FAA diskutiert werden, die DEA als Analyse-Instrumentarium berücksichtigen werden.

Die Ergebnisse sind komplex wie aussagekräftig und die Einarbeitung aller aufgezeigten Punkte würde den Rahmen dieses Artikels sprengen. Daher ist geplant, die Anwendung dieser Methodik auf Flugsicherungsdienstleister in einer der folgenden Ausgaben von „Innovation im Fokus“ zu beschreiben und näher auf Ergebnisse und deren Analyse einzugehen.

## Referenzen

|     |                                                                                                                                                                                                                             |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [1] | Standfuß, Thomas: „Effizienz und Skaleneffekte europäischer Flugsicherungen“, Masterarbeit, Institut für Wirtschaft und Verkehr, TU Dresden, 2013                                                                           |
| [2] | ATM Cost-Effectiveness (ACE) 2011 Benchmarking Report with 2012-2016 outlook, Performance Review Unit (PRU), April 2013                                                                                                     |
| [3] | Albrecht, Lars: "Wissenschaftliche Analyse der Entgeltregulierung deutscher Verkehrsflughäfen", Band 12 von Dienstleistungsmanagement in Theorie und Praxis, Logos Verlag Berlin GmbH, 2014, ISBN 3832536396, 9783832536398 |
| [4] | Albrecht, Lars: "DEA-Effizienzvergleich deutscher Verkehrsflughäfen in den Bereichen Passagier und Fracht", Band 28 der Schriftenreihe Logistikforschung, Hrsg. Matthias Klumpp, Essen, 2012, ISSN 1866-0304                |
| [5] | W.W. Cooper (2006): Introduction to Data Envelopment Analysis and Its Uses. Springer 2006.                                                                                                                                  |
| [6] | Springer Gabler Verlag (Herausgeber), Gabler Wirtschaftslexikon, <a href="#">Stichwort: Produktionsfunktion</a>                                                                                                             |
| [7] | Springer Gabler Verlag (Herausgeber), Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Tobit-Modell                                                                                                                                    |
| [8] | Prof. Dr. Christian von Hirschhausen: Regulierungsmanagement“, Technische Universität Dresden, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Public Sector Management, Vorlesung 2.2, 2005                                            |

## Abkürzungen

|       |                                                |
|-------|------------------------------------------------|
| ACE   | ATM Cost Effectiveness                         |
| ANSP  | Air Navigation Service Provider                |
| ATFM  | Air Traffic Flow Management                    |
| DEA   | Data Envelopment Analysis                      |
| DMU   | Decision Making Unit                           |
| EANS  | Estonian Air Navigation Service                |
| FAA   | Federal Aviation Administration                |
| FABEC | Functional Airspace Block (FAB) Europe Central |
| PRU   | Performance Review Unit                        |
| SPSS® | Statistiksoftware der Firma IBM                |
| TFP   | Totale Faktorproduktivität                     |

## 3D-Entwicklungen im Towersimulator: Die virtuelle Sicht aus der Towerkanzel

Eric Becker, Andreas Türk

### Einleitung

In der DFS sind rund 45 Tower- und Centersimulatoren zur Aus- und Weiterbildung der Lotsen im Einsatz. Der augenfälligste Unterschied zwischen diesen beiden Simulatortypen ist die Nachbildung der dreidimensionalen Sicht auf das virtuelle Geschehen am Flughafen bei den Towersimulatoren.

Die Sicht aus einer Towerkanzel kann im Simulator auf verschiedene Arten realisiert werden: von einfachen Schreibtisch-Monitoren bis hin zu einem komplexen Projektionssystem mit 360° Panoramadarstellung [1]. Neben den umfangreichen technischen Lösungen zur Projektion werden zusätzlich die 3D-Modelle der verschiedenen Flughäfen benötigt. Schließlich sollen die Towerlotsen auch im Simulator „ihren“ Heimatflughafen optisch wiedererkennen.

Einige der seit geraumer Zeit verwendeten 3D-Szenarien waren nicht mehr „state of the art“ und ließen auch wichtige Details vermissen. Seit 2012 erneuert daher das Produktmanagement für die Towersimulatoren sukzessive diese 3D-Szenarien anforderungsgerecht. Ziel ist es, eine möglichst realistische Abbildung der Außensicht wiederzugeben und damit die Simulationsqualität weiter zu verbessern. Daneben ist es unerlässlich, diese 3D-Szenarien in regelmäßigen Abständen an die technischen Fortschritte anzupassen. Immer leistungsstärkere Graphikrechner und modernere Visualisierungssysteme können immer größere Mengen an Polygonen verarbeiten und führen zu einem stetig wachsenden Detaillierungsgrad. Einfarbige konturlose

Rechtecke wurden durch komplexe voluminöse Objekte ersetzt. Einfache Fototapeten zur Abbildung des Horizonts weichen nunmehr dreidimensional modelliertem Terrain. Unzählige zusätzliche Details wie Flughafenfahrzeuge, Gepäckwagen, Container und Bäume, die auf den ersten Blick unwesentlich erscheinen, lockern das gesamte Erscheinungsbild auf. Animierte Objekte wie rotierende Radarantennen, Autobahnverkehr, pendelnde S-Bahnen und vorbeirauschende ICE-Züge lassen die Szenerie lebendig werden und intensivieren das immersive Gefühl in der virtuellen Towerkanzel.

Nach Frankfurt (EDDF) und den in der Ausbildung genutzten fiktiven Flughäfen Langen (EDDY) und Newport (EDDZ) hat zuletzt der neue Hauptstadtflughafen „Berlin Brandenburg Airport – Willy Brandt“ (EDDB) im Towersimulator seinen virtuellen Betrieb aufgenommen, s. Abbildung 1.

Bis zur Entstehung eines solchen Flughafens in der virtuellen Welt ist jedoch einiges an Vorarbeit notwendig. Dafür besitzt die DFS seit neuestem zwei Alternativen mit sehr unterschiedlichem Arbeits- und Zeitaufwand. Die jeweils gewählte Alternative hängt davon ab, ob eine schnelle (aber etwas einfachere) oder eine hochwertige (aber aufwändigere) Lösung angestrebt wird

### Professionelle 3D-Entwicklung

Zunächst muss vor Ort umfassendes Fotomaterial angefertigt werden. Dabei wird einerseits die Rundumsicht vom Tower zu verschiedenen Tages- und



Abb. 1: Blick auf das neue virtuelle BER Hauptterminal

Nachtzeiten aufgenommen, s. Abbildung 2. Zudem werden die Details umliegender Gebäude, Lichtmasten, Fluggastbrücken etc. fotografiert. Die Grundlage zur Modellierung der Flughafenumgebung sind Luftbildaufnahmen und Satellitenbilder mit Höhenprofildaten.



Abb. 2: Fototermin auf der Außenbalustrade Tower BER

Auf der Basis des viele Gigabyte umfassenden Datenmaterials beginnt dann die eigentliche Modellierung der Szenerie mit Hilfe professioneller 3D-Software, wie z.B. Maya® der Firma Autodesk. Diese spezielle und zeitaufwendige Art der 3D-Entwicklung für die Towersimulation wird von der Graphikabteilung der Firma UFA Inc., dem Software-Hersteller und strategischen Partner für die Tower- und Centersimulatoren der DFS übernommen. Abbildung 3 zeigt das beeindruckende Ergebnis dieses allerdings auch äußerst zeitaufwändigen Prozesses.

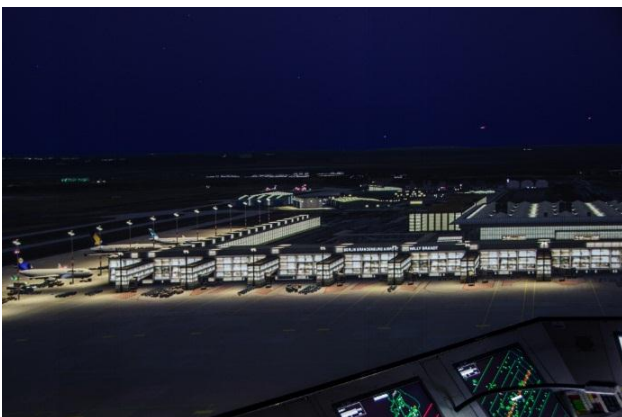


Abb. 3: Blick auf das virtuelle BER Terminal aus der Towerkanzel im TOSIM 3D-1 (Akademie)

### 3D Prototyping

Ende 2013 hat das Simulatorzentrum der DFS zudem erfolgreich ein neues Software-Tool eingeführt, mit dem insbesondere generische 3D Szenarien auch in Eigenregie erstellt werden können. Auch diese Software wurde von UFA Inc. geliefert. Der sogenannte „ATEditor3D“ ist vergleichsweise einfach und intuitiv zu bedienen und ermöglicht die Gestaltung neuer Airports in kurzer Zeit. Auf Grundlage vorhandener zweidimensionaler Airportkarten erzeugt die Software zuerst einmal automatisch die passende 3D Umgebung samt den Landebahnen, Rollwegen, Fahrstraßen und der passenden Lichtpunkte für die Befeuerung, s. Abbildung 4.

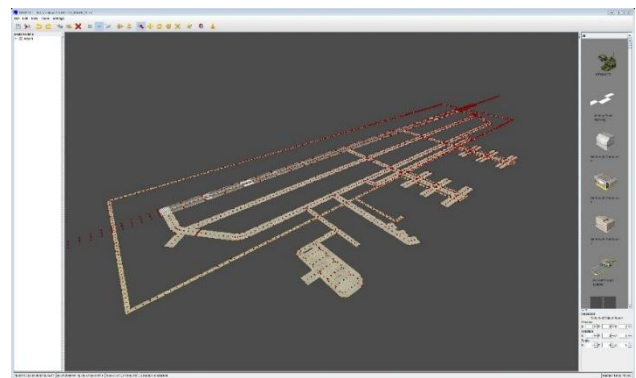


Abb. 4: Von ATEditor3D erzeugtes 3D Airport-Layout

Im nächsten Schritt kann dann ein Geländemodell mit Höhenprofil zum Beispiel aus vorhandenen Satellitendaten importiert und relativ zu diesem 3D Layout platziert werden, s. Abbildung 5.

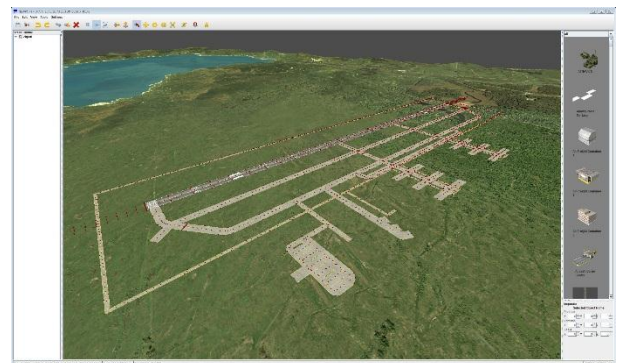


Abb. 5: Importiertes Geländemodell mit Höhenprofil

Die so entstandene 3D Szenerie wird nun aus einer umfangreichen Palette an 3D Objekten „mit Leben

gefüllt“. Über unterschiedlichste Flughafengebäude wie Terminal, Tower und Hangar bis hin zu Fabrik-, Industrie- und Wohngebäuden ist alles vorhanden. Mit realistisch platzierten Fahrzeugen, Gepäck- und Transportwagen (s. Abbildung 6) bis hin zu rotierenden Radaranlagen sowie der entsprechenden Vegetation entsteht so vergleichsweise schnell das Gefühl für einen echten Flughafen.



Abb. 6: Platzierung und Skalierung der diversen 3D Objekte aus der ATEditor3D Datenbank

ATEditor3D ersetzt keine professionelle 3D Software, da die verfügbaren 3D Objekte nicht verändert werden können. Die Software ist aber sehr gut geeignet, um in kurzer Zeit einen stimmigen generischen Airport zu erstellen und damit flexibel auf kurzfristige und spezielle Kundenanforderungen reagieren zu können.

In der DFS ist der fiktive Flughafen Newport (EDDZ) als generischer Flughafen für die Aus- und Weiterbildung an

kleineren Plätzen im Einsatz. Da Newport schon sehr in die Jahre gekommen war, lag die Entscheidung nahe, dem Airport mit Hilfe von ATEditor3D anforderungsgerecht zu überarbeiten.

Damit ist nun auch die erste 3D-Szenerie aus „DFS-Eigenproduktion“ im Towersimulator im Einsatz. Das Ergebnis ist in Abbildung 7 zu sehen und steht der „Konkurrenz“ aus der professionellen 3D-Produktion auf den ersten Blick in nichts nach. Im Trainingsbetrieb sind beide Alternativen gleichermaßen geeignet, sofern keine detailgetreue Nachbildung von Gebäuden und sonstigen 3D-Objekten notwendig ist. Dies ist aktuell mit ATEditor3D noch nicht umsetzbar. Eine mögliche Lösung wäre eine entsprechende Software-Erweiterung, mit der z.B. zusätzliche 3D-Objekte auch aus externen Quellen importiert werden können. Damit wäre dann auch der detailgetreue Nachbau eines realen Flughafens möglich.

Mit welcher Variante die nächsten anstehenden Projekte (nach aktueller Planung sind das die Flughäfen München und Düsseldorf) realisiert werden, wird das Produktmanagement noch entscheiden.

### Referenzen

- |     |                                                                                                                                                                             |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [1] | Andreas Türk, Sylvia Dietz-Kullmann, Torsten Ehret und Oliver Ruehl: Überblick und Einsatzgebiete der Towersimulatoren in der DFS. DFS, TE im Fokus 1/2011. ISSN 1861-6364. |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

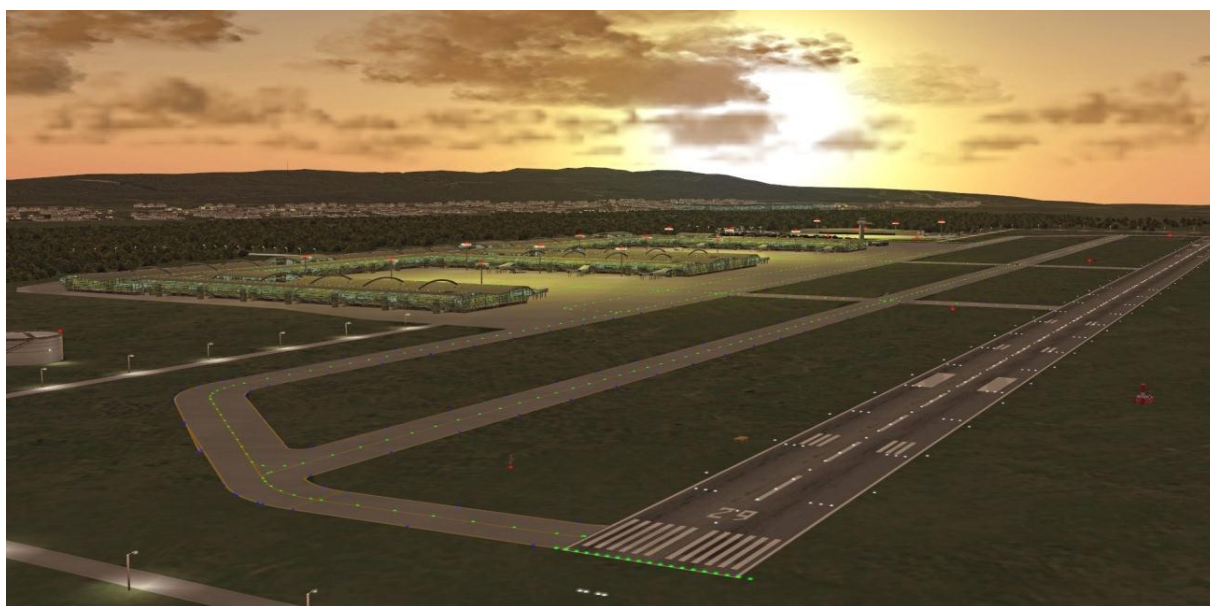


Abb. 7: Ergebnis: Blick auf EDDZ in der Abenddämmerung aus östlicher Richtung

# Bewertung von Multi-Touch Gesteneingaben am Lotsenarbeitsplatz

Dr. Konrad Hagemann, Andreas Udovic

### Abstract

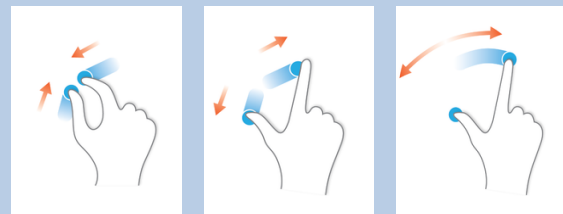
Mit der vorliegenden Studie wurde die Gebrauchstauglichkeit (Usability) eines neuartigen Multi-Touch-basierten Anzeige- und Bedienkonzepts für die Anflug- und Streckenkontrolle (TMA/ACC) des Flugverkehrs mithilfe eines Mock-Ups und einer einfachen Simulationsaufgabe untersucht. Das Konzept sah eine direkte Manipulation grafischer Objekte am Radarbildschirm vor. Über eine vergleichende Messung mit einem traditionellen Referenzsystem mit Maus und Tastatur, sowie anhand der Rückmeldungen und Simulationsdaten aus einer Stichprobe von 14 Fluglotsen aus verschiedenen DFS Niederlassungen konnten erste Rückschlüsse auf den zu erwartenden Nutzen hinsichtlich einer verbesserten Usability und Entlastung des Lotsen aufgrund der Multi-Touch Bedienung mit Gesten gezogen werden. Die frühzeitige gemeinsame Betrachtung mit potentiellen späteren Nutzern anhand von Mock-Ups ermöglicht eine kosteneffiziente und systematische Bewertung innovativer Ansätze für Zukunftskonzepte in der DFS und eine frühzeitige Identifikation von Problemen bei der Gebrauchstauglichkeit. Spätere Weiterentwicklungen können auf den gesammelten Erkenntnissen aufbauen, die in Form eines SESAR-Berichtes zusammen mit weiteren Technologiescreenings umfassend dokumentiert wurden.

### Einleitung

Im Bereich der Unterhaltungselektronik ist die Multi-Touch Gestensteuerung technischer Geräte, wie Smartphones und Tablets, inzwischen für viele Menschen aufgrund alltäglicher Verwendung zu einer Selbstverständlichkeit geworden. Die Interaktion mit dem Gerät beruht dabei überwiegend auf einer Bedienphilosophie der direkten Manipulation, d.h. auf dem Display dargestellte graphische Objekte werden mit einem oder mehreren Fingern unter Einsatz von schnell erlernbaren Gesten bedient (siehe Abbildung im Kasten rechts).

Die Produkte werden mit dem Versprechen umworben, die Bedienung schneller, direkter und intuitiver zu gestalten. Ferner existieren zahlreiche Studien, die eine ganze Reihe an Einsatzmöglichkeiten und potentiellen Vor- und Nachteilen dieser Technologie untersucht haben (siehe SESAR, 2014, Abschnitt 2.1.3 für eine Auswahl).

Ein **Multi-Touch-Screen** (englisch *touch* = berühren; Bildschirm mit Mehrfingergestenerkennung) ist eine besondere berührungsempfindliche Oberfläche für die Eingabe von Daten mit Hilfe von Gesten. Der Touchscreen erkennt gleichzeitig *mehrere* Berührungen, meist mit den Fingern, womit mehr Bedienmethoden zum Einsatz kommen können als bei Systemen, die nur einen einzigen Berührungspunkt gleichzeitig erfassen können.



Beispiele für Multi-Touch Gesten „pinch to zoom“ und „rotate“.

Der aus dem Englischen stammende Begriff **Mock-up** wird meist für ein maßstäblich gefertigtes Modell bzw. eine Nachbildung zu Demonstrationszwecken benutzt. Mock-ups werden insbesondere in frühen Entwicklungsphasen eingesetzt, um Anforderungen an die Benutzeroberfläche in Zusammenarbeit mit Auftraggeber und Anwendern besser ermitteln zu können.

Quelle: Wikipedia

Die Annahme liegt nahe, dass kommende Generationen diese Form der Mensch-Computer Interaktion als eine Art Standard für die Bedienung technischer Geräte kennenlernen werden, da sie unmittelbar damit aufwachsen. Mit aktuellen Notebooks und PC-Bildschirmen beginnt der Techniktrend „Multi-Touch“ nun mehr und mehr vom Unterhaltungssektor auch in den professionellen Bereich überzugreifen.

Bereits 2012 wurde an dieser Stelle über die Ergebnisse einer Masterarbeit zum Thema Multi-Touch-Gesteneingabe berichtet (Wald, Buxbaum, Konopka, 2012). Damals wurde mittels eines Notebooks mit Touch-Display ein Konzept untersucht, bei dem vereinzelt Anweisungen vom Lotsen per Fingergesteneingabe direkt in einem simplifizierten Radardisplay vorgenommen werden konnten. Hieran wurde ein synthetisches Sprachausgabesystem gekoppelt, das die Eingaben in akustische Anweisungen

für Piloten übersetzte. Trotz eingeschränkter Funktionalitäten, einer eher kleinen Stichprobe sowie einem bewusst spielerisch aufgesetzten Szenarios lieferte die Arbeit Argumente, die für einen potentiellen Nutzen moderner Multi-Touch Gesteneingaben am Lotsenarbeitsplatz sprachen. Mit der vorliegenden Untersuchung sollen anhand einer breiteren Lotsenstichprobe, einer näher am Betrieb liegenden Simulationsaufgabe und einem Referenzsystem die damaligen Ergebnisse einer vertiefenden Untersuchung unterzogen werden.

In der Flugsicherung gehören Geräte mit berührungsempfindlicher Eingabemöglichkeit seit vielen Jahren zur vorhandenen Gerätelandschaft am Lotsenarbeitsplatz. Die Eingabe im Sprachvermittlungssystem (SVS) erfolgt über Touch Input Display (TID) und im elektronischen Streifensystem PSS über Stift. Multi-Touch-Gesten finden dabei jedoch weitestgehend keine Verwendung. Der Fokus bei den bisherigen Lösungen liegt vielmehr auf der Bereitstellung von Shortcuts zu wichtigen Funktionen, die somit über „tap“ (einzelnes Berühren) einfach und schnell zu erreichen sind. Auch komplexere Eingaben werden in dieser Form realisiert, so können z.B. verknüpfte Anweisungen mittels mehrerer „taps“ zusammengestellt und dann an das System übergeben werden. Die Bereitstellung dieser Funktionalität erfolgte in der Vergangenheit bei der Flugsicherung meist über die Beistellung eines eigenen weiteren Gerätes, wie z.B. eines Touch-Displays als Streifenbay, um bestehende zertifizierte Systeme, nicht zuletzt aus Sicherheitsgründen, möglichst unangetastet zu belassen. Dabei handelt es sich beispielsweise bei den momentan im Einsatz befindlichen 2Kx2K Radarbildschirmen um besonders ausfallsichere und qualitativ hochwertige Speziallösungen für den ATC-Bereich. Mit Blick auf die rasante technische Entwicklung am Markt für Monitore (wie auch bei anderen technischer Gerätschaften) sollte dennoch geprüft werden, inwieweit Standardprodukte anstelle von Sonderanfertigungen Verwendung finden können, da erstere aufgrund eines breiteren Marktes schnelleren Innovationszyklen unterliegen und dabei teilweise auch wesentlich preisgünstiger angeboten werden können. Für den Einkäufer muss dabei stets der Gesamtarbeitsplatz des Lotsen mit seinen unterschiedlichsten Gerätschaften im Blickfeld der Betrachtung liegen.

Das in der vorliegenden Machbarkeitsstudie verfolgte Konzept blickt über bisherige Ansätze in der DFS hinaus und forscht dabei in Richtung eines integrierten Arbeitsplatzes. Über eine direkte Multi-Touch-Bedienung

am Radarbildschirm soll eine möglichst vollständige Nutzung der berichteten Vorteile der Gebrauchstauglichkeit (Usability) der Multi-Touch Gestentechnologie für die Flugverkehrskontrolle ermöglicht werden. Das in der Untersuchung verwendete Multi-Touch-Bedienkonzept wurde am DLR Institut für Flugführung entwickelt (Gürlük & Uebbing-Rumke, 2013). Die Studie ist Bestandteil einer Reihe von Untersuchungen im Rahmen des EU-geförderten SESAR Projektes WP10.10.2 „CWP Human Factors Design“. Ziel dieser Aktivitäten, die von der DFS zusammen mit dem DLR Institut für Flugführung, weiteren ANSPs und Industriepartnern durchgeführt wurden, war es, innovative Technologien hinsichtlich ihres Reifegrades und potentiellen Nutzens aufzuspüren, zu prüfen und Empfehlungen für deren potentiellen Einsatz am TMA/ACC Lotsenarbeitsplatz zu formulieren (siehe z.B. Hagemann, Uebbing-Rumke, Gürlük, Lambrecht, 2011).

Der vorliegende Bericht beschreibt die Ergebnisse des unter der DFS Federführung liegenden Anteils an einer größeren Gesamtstudie, bei der verschiedene Multi-Touch-Bedienansätze parallel untersucht wurden. In einem zweiten Teil der Untersuchung, zu dem aus Platzgründen an dieser Stelle leider nicht weiter eingegangen werden kann, wurde das prototypische System eines europäischen ATC Systemherstellers basierend auf indirekter Multi-Touch Gesteneingabe über ein zweites Display untersucht. Weitere Details, inklusive der Ergebnisse können dem Projektbericht (SESAR, 2014) entnommen werden.

Bei der an dieser Stelle berichteten Untersuchung wurde in Beobachtungen und Interviews erhoben, inwieweit das Bedienkonzept von den teilnehmenden Lotsen als grundsätzlich arbeitbar und akzeptabel empfunden wurde. Dazu wurden in Form eines hypothesentestenden Ansatzes die folgenden Annahmen untersucht:

- Gegenüber traditionellen Eingabesystemen wird für die Verwendung von Multi-Touch Gestensteuerung bei der Lotsenkontrollaufgabe eine positivere Einschätzung der allgemeinen Usability und User Experience (Nutzungserleben, siehe z.B. Hassenzahl, Eckoldt & Thielsch, 2009) erwartet.
- Das Arbeiten mit Multi-Touch Gestensteuerung soll gegenüber dem Referenzsystem zu einer mentalen Entlastung des Lotsen führen.
- Multi-Touch Gestensteuerung soll zu einem schnelleren und effizienteren Arbeiten, was in einer erhöhten Leistungsgüte in der Flugverkehrskontrollsimulation beobachtbar ist, führen.

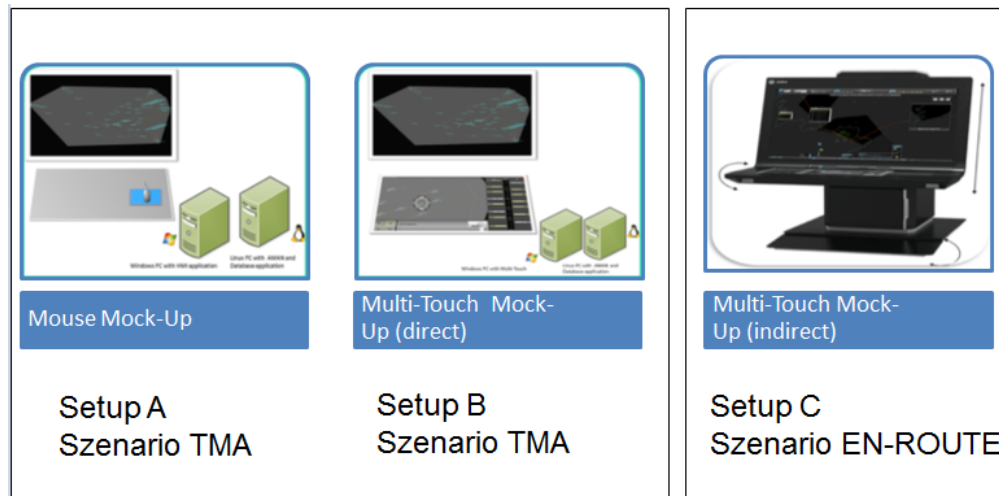


Abb. 1: Drei verschiedene experimentelle Setups. Nur die Ergebnisse zu Setup A und B sind Bestandteil dieses Berichts.

## Methode

**Stichprobe:** Eine breite Stichprobe von insgesamt 14 DFS Fluglotsen (Alter 22-59, davon 2 weiblich, 13 mit aktiver Lizenz) mit unterschiedlichen Einsatzberechtigungen (6 = Frankfurt Approach, 2 = München Approach, 6 = Oberer Luftraum (UAC Karlsruhe)) nahmen an der Untersuchung beim DLR in Braunschweig teil.

**Experimentelle Setups:** Pro Versuchstag wurden 2 Teilnehmer parallel an insgesamt 3 verschiedenen Setups mit z.T. unterschiedlichen Aufgabenszenarien getestet (s. Abbildung 1).

- In Setup A (Referenz) erfolgte die Bedienung klassisch über Computermaus und direkte Labelinteraktion in Anlehnung an bestehende DFS-Systeme.
- In Setup B (direkte Multi-Touch Bedienung) erfolgte die Bedienung direkt am zu manipulierenden graphischen Objekt auf dem Radarbildschirm. Zusätzlich wurde ein Bildschirm bereitgestellt, welcher der Darstellung eines größeren Ausschnitts der Luftlage diente, da auf dem Multi-Touch Display gleichzeitig nur ein Ausschnitt präsentiert werden konnte. Im Versuch selber spielte diese weitere Reserveanzeige jedoch so gut wie keine Rolle, wie durch die Aussagen der Probanden bestätigt wurde.
- In Setup C (indirekte Multi-Touch Bedienung) erfolgte die Anzeige auf einem großen Luftlagedisplay während die Bedienung über ein

Multi-Touch Bildschirm, der in die Tischplatte integriert war (vergleichbar zu einer Touchpad-Bedienung am Notebook) vorgenommen wurde.

**Aufgabenszenarien und Funktionsumfang:** Während Setup A und B gleiche Aufgaben (Feederposition Anflugkontrolle Frankfurt) und einen vergleichbaren Funktionsumfang aufwiesen, absolvierten die Teilnehmer in Setup C ein schrittweises computergestütztes Tutorial mit einem En-Route-Szenario und hatten somit die Möglichkeit, die dort implementierten 11 Multi-Touch Gesten auszuprobieren und zu bewerten. In Setup B standen den Probanden insgesamt 3 Multi-Touch Gesten mit 6 Funktionen zur Bearbeitung des 25-minütigen Aufgabenszenarios zur Verfügung. In Setup A stand ein zum Setup B vergleichbarer Funktionsumfang zur Bedienung mit Maus und Tastatur zur Verfügung. In den Simulationen wurde ein Datalink Zukunftsszenario angenommen und daher auf den Einsatz von Sprechfunk verzichtet.

**Ablaufplanung und Versuchsdesign:** Die Reihenfolge der experimentellen Sessions wurde über die Probanden ausbalanciert, um Reihenfolgeeffekte zu vermeiden. Tab. 1 zeigt einen Überblick über einen Versuchstag.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Szenarien, Aufgaben und Aufbauten zwischen Setup A und B auf der einen und Setup C auf der anderen Seite ist kein direkter Vergleich zwischen allen drei Setups möglich. Die Frage inwieweit das eine Multi-Touch Bedienkonzept dem anderen vorzuziehen wäre, lässt sich somit mit dieser Untersuchung nicht beantworten. Jedoch lassen sich unabhängig voneinander die Vor- und Nachteile der verschiedenen Ansätze ermitteln.

| Zeit          | Aktivität                |
|---------------|--------------------------|
| 09:00 – 09:40 | Willkommen               |
| 09:40 – 10:55 | Experimentelle Session 1 |
| 10:45 – 10:55 | Pause                    |
| 10:55 – 12:00 | Experimentelle Session 2 |
| 12:30 – 12:30 | Debriefing 1             |
| 12:30 – 13:30 | Mittagspause             |
| 13:30 – 14:35 | Experimentelle Session 3 |
| 14:35 – 15:15 | Debriefing 2             |
| 15:15 – 16:05 | Gesamt-Debriefing        |

Tab. 1: Zeitplan für den Versuchsablauf eines Tages. Pro Tag wurden zwei Probanden parallel in jeweils unterschiedlichen, räumlich getrennten Sessions getestet.

| Abhängige Variablen                 | Messgrößen                                                                                                                                                                               |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lotsen-performance                  | Simulationsparameter: mittlere Separation, Anzahl Separationsverletzungen, Anzahl Landungen                                                                                              |
| Mentale und physische Beanspruchung | NASA Task Load Index (TLX) "raw" (Hart & Staveland, 1988)                                                                                                                                |
| Usability und User Experience       | DLR Usability Fragebogen, System Usability Scale (SUS, Brooke, 1996),<br>User Experience Questionnaire (UEQ, Laugwitz, Held & Schrepp, 2008),<br>Beobachtungen und Debriefing-Interviews |

Tab. 2: Liste der abhängigen Variablen und Operationalisierung in der Untersuchung

Im Sinne der o.g. Hypothesen wurden somit Setup A (Referenz) und B (Multi-Touch) hinsichtlich Lotsenperformance, mentaler und physischer Workload und Usability (inkl. User Experience) verglichen. Für diese beiden Setups waren Aufgabenszenarien, Funktionsumfang und Simulationsumgebung gleich, lediglich das Bedienkonzept war verschieden (unabhängige Variable). Tabelle 2 listet die verschiedenen abhängigen Variablen und deren Operationalisierung für die Messung auf.

Für die statistische Analyse der Fragebogendaten wurden T-Tests für abhängige Stichproben durchgeführt solange für die Daten eine statistische Normalverteilung zugrunde gelegt werden konnte (Kolmogoroff-Smirnov-Test). Wo diese Voraussetzung nicht gegeben war, wurde der non-parametrische Wilcoxon-Test gerechnet.

Neben dem Einsatz von Fragebogen wurden Aussagen zu Erfahrungen mit dem jeweiligen System in Einzel-Nachbesprechungen im Anschluss an die jeweiligen Sessions (Debriefings) in Form von strukturierten

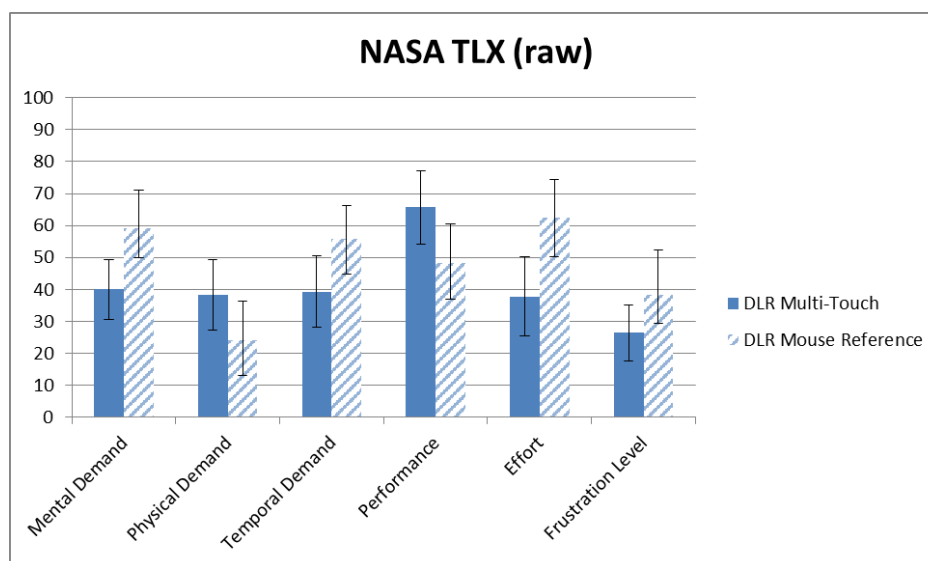


Abb. 2: NASA TLX Rohskalenwerte in Prozent. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler.

Interviews erfasst. Zum Abschluss eines Tages wurden beide Teilnehmer zusammen vom Untersucherteam in einem Gesamt-Debriefing befragt. Darüber hinaus wurden die Teilnehmer während der Versuche dazu angeregt, „laut zu denken“. Die gesammelten Äußerungen wurden in Beobachtungsprotokollen dokumentiert, analysiert und zusammengefasst.

## Ergebnisse „NASA Task Load Index“

Abbildung 2 zeigt die mittleren Skalenwerte des NASA-Task Load Index (NASA TLX).

Nahezu alle Subskalen zeigen niedrigere Belastungswerte für den Multi-Touch Mock-Up im Vergleich zur Referenz mit der Maus (mental demand:  $z=-2,3$ ;  $p=,02^*$ ; effort:  $z=-2,3$ ;  $p=,02^*$ ; temporal demand:  $T=,786$ ;  $p=,45$ ). Lediglich die physische Beanspruchung wird mit dem Multi-Touch Mock-Up als schlechter eingestuft als bei der klassischen Mausbedienung, was auf den Umstand zurück geführt werden kann, dass der Multi-Touch Mock-Up aufgrund fehlender Integration in einen Arbeitstisch im Stehen bedient werden musste. Abgesehen davon geben die Werte allerdings insgesamt Hinweise auf eine erleichterte Aufgabenbearbeitung mittels Multi-Touch-Input.

## Ergebnisse „Usability“

Für eine allgemeine Einschätzung der Gebrauchstauglichkeit bietet die Methode „System Usability Scale“ (SUS) einen prozentualen Gesamtwert, wobei 100% für ein ideales System ohne Nutzungsprobleme und Werte unter 50% für eine nicht akzeptable Nutzbarkeit stehen.

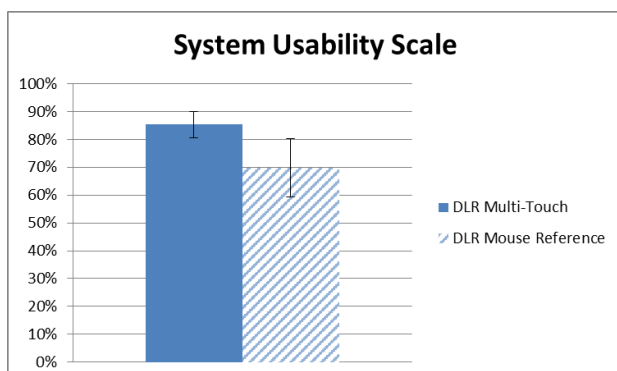


Abb. 3: System Usability Scale (SUS) Score. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler.

Wie in Abbildung 3 dargestellt, zeigte sich für den Multi-Touch Mock Up ein signifikant höherer SUS-Mittelwert

(85% = „excellent“) im Vergleich zum Referenzsystem (70% = „good“,  $z=2,45$ ;  $p=,01^*$ ).

Die Antworten zu den Fragen des allgemeinen DLR Usability Fragebogens wurden zu 7 Usability Faktoren zusammengefasst (siehe Abbildung 4) und die Werte zeigen einen Trend hin zu einer positiveren Bewertung für den Einsatz von Multi-Touch bezüglich Erwartungskonformität, Fehlertoleranz, Aufgabenangemessenheit und Kontrollierbarkeit. Andererseits ergaben die Einschätzungen zur Individualisierbarkeit sowie der physischen Arbeitsbelastung einen schlechteren Wert, der im letzteren Fall statistisch signifikant war ( $z=-2,45$ ;  $p=,01^*$ ). Ersteres mag auf den geringen Funktionsumfang und eingeschränkte Einstellungsmöglichkeiten zurückzuführen sein, während letzteres auf den Umstand zurückzuführen ist, dass der Mock-Up im Stehen bedient werden musste (s.o.).

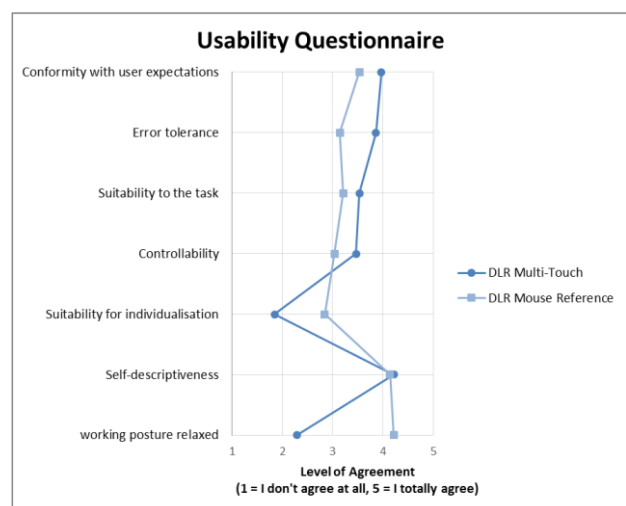


Abb. 4: Usability Bewertungen aus dem DLR Usability Fragebogen.

Der positive Trend für die Bedienung mit Multi-Touch gegenüber der klassischen Bedienung mit der Maus wird durch die hier nicht weiter dargestellte Usability-Einschätzung einzelner Funktionen überwiegend weiter bestätigt (siehe SESAR, 2014).

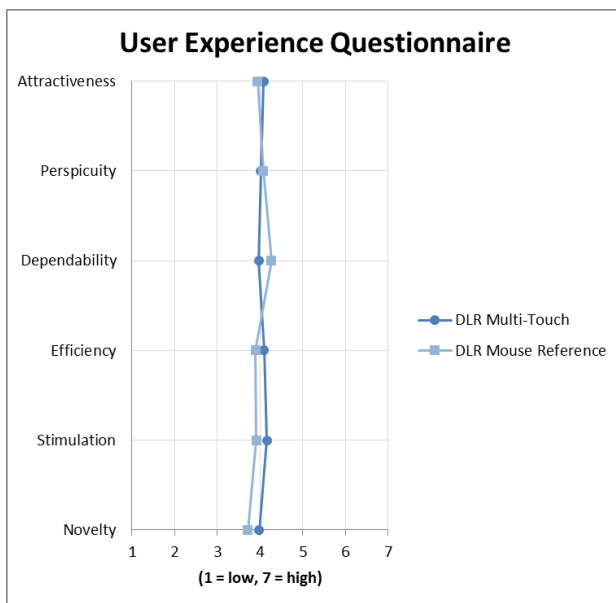


Abb. 5: Ergebnisse des User Experience Fragebogens (UEQ).

Der Fragebogen zur User Experience (UEQ) zeigt Werte die im Durchschnitt leicht positiv über der Mitte der Ratingskala lagen (siehe Abbildung 5). Signifikante Unterschiede zwischen den beiden Bedingungen ließen sich dabei aber nicht beobachten. Eine mögliche Interpretation wäre, dass die Multi-Touch-Bedienung für die Teilnehmer aufgrund des persönlichen, alltäglichen Umgangs mit Smartphone u.ä. Geräten nichts Außergewöhnliches darstellt und die Werte die Gewöhnung an diese Eingabemöglichkeit widerspiegeln.

### Ergebnisse „Human Performance“

Anhand der Simulationsdaten aus der Flugverkehrskontrollaufgabe wurde ein Gesamtindex für Human Performance errechnet, der sich aus den Parametern Staffellungsunterschreitung, Separationsverletzungen und Verkehrsdurchsatz ableitet. In der statistischen Analyse für den Gesamtindex ergaben sich keine signifikanten Unterschiede ( $z = -1.60$ ,  $p = n.s.$ ; für Details zur Berechnung siehe SESAR, 2014). Insgesamt weisen die Werte darauf hin, dass die Multi-Touch-Bedienung keinen nennenswert negativen Einfluss auf die Leistung der Probanden in ihrer Flugführungsaufgabe der Simulation hatte.

### Ergänzende Ergebnisse aus Beobachtungen und Debriefing-Interviews

Beobachtungen und Debriefings bestätigen die Daten aus den Fragebogen, weisen darüber hinaus aber auch auf einige wichtige Usability Issues und Verbesserungsmöglichkeiten hin. Im Folgenden eine Auswahl zentraler positiver (+) und negativer (-) Punkte (siehe SESAR, 2014 für eine umfassende Auflistung aus Beobachtungen und Debriefings):

- + Multi-Touch ist einfacher in der Anwendung
- + Multi-Touch ist schneller, insbesondere für das Eindrehkommando
- + Die Verwendung von Multi-Touch macht Spaß
- + Multi-Touch ist intuitiver
- + Multi-Touch ist innovativer (da Objekte direkt manipuliert werden)
- + Multi-Touch ist sicherer da einfach zu verwenden
- Controller sind nicht an eine stehende Arbeitsposition gewöhnt (überwiegend bemängelt worden, aber nicht durchgehend)
- Zooming und Panning Funktionalität wäre zu bevorzugen
- Multi-Touch sollte in einen Tisch eingebaut werden zusammen mit einem passenden Anstellwinkel

Weitere Punkte:

- Mock-Up kaum vorstellbar mit echten Verkehr
- Zu wenig Funktionalitäten sind implementiert
- Eine Verwendung von Datalink mit vernünftigen Antwortzeiten liegt weit in der Zukunft
- Das Multi-Touch Display war nicht groß genug für alle benötigten Informationen
- Information auf der Anzeige wurde von Menüs oder zu großen Icons (Kopfsymbol) verdeckt
- Information auf der Anzeige wurde von den Händen verdeckt
- Es ist nicht möglich, mehrere Kommandos in einem Label anzuweisen, was aber ggfs. als wünschenswert erachtet wurde.
- Es bestanden Zweifel darüber, ob es möglich sei, einen großen Luftraum wie im En-Route Bereich vorhanden mit direkten Eingaben zu bedienen und es wurde diskutiert wie groß das Display in diesem Falle sein müsste.
- Das „Verschmieren“ eines Touch Displays wurde als problematisch angesehen – „ich möchte das Display nicht alle 2 Stunden reinigen müssen“

- Die Infrarot-Technologie erlaubt eine reibungslose Eingabe mit den Fingern und ist komfortabel
- Das System erinnert an ein Spielzeug

### Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen der Untersuchung war es möglich, ein breites und repräsentatives Feedback von Lotsen verschiedenen Alters, unterschiedlicher Niederlassungen und Arbeitsplätzen in der DFS zu erhalten. Mittels eines einfachen Mock-Ups konnte das grundlegende Konzept für eine direkte Multi-Touch Gesteneingabe am Radarbildschirm veranschaulicht und anhand einer Simulationsaufgabe inklusive einer Referenzaufgabe mit herkömmlicher Mausbedienung verglichen werden. Dabei lag der Fokus auf einer Einschätzung der Machbarkeit, sowie auf der Bewertung potentiellen Nutzens, weniger aber auf einer produktnahen Qualifikation für den betrieblichen Einsatz in den nächsten Jahren.

Insgesamt lieferten die gesammelten Daten aus Beobachtungen, Interviews, Fragebogen und Simulationsaufzeichnungen ein grundlegend positives Gesamtbild der Usability, welche für die direkten Multi-Touch Gesteneingaben am Radarbildschirm höher bewertet wurde, als für die „klassische“ Bedienung über eine Computermouse. Für die Bearbeitung in einer stark vereinfachten Lotsenaufgabe weisen die Daten auf eine Erleichterung in Form reduzierter mentaler Beanspruchung, Anstrengung und zeitlicher Belastung gegenüber der Referenz hin. Die Analyse der Simulationsdaten zeigte keine signifikante Verschlechterung in der Leistung der Lotsen, was Hinweise darauf gibt, dass das System in ähnlicher Weise fehlerfrei zu arbeiten war, wie das Referenzsystem. Auch die Kommentare der Lotsen während der Simulationen und die Aussagen aus den Interviews am Ende der Simulationsläufe weisen darauf hin, dass der Einsatz von Multi-Touch Gesten am Lotsenarbeitsplatz grundsätzlich begrüßt und insbesondere die direkte Manipulation von Objekten am Radarbildschirm gegenüber einer indirekten Eingabe, d.h. via zusätzlichen Touch-Display, bevorzugt wurde. Mögliche Gründe hierfür können u.a. in der Konzentration von Blick, Finger und Aufmerksamkeit an einem Ort liegen, wodurch die Bedienung als einfacher empfunden wurde. Stellenweise wurde eine Überdeckung der Anzeige mit Menüs oder Symbolen bemängelt, die als zu groß empfunden wurden. Tatsächlich wurde der Multi-Touch-Bildschirm mit 32“ und der dabei verwendeten Auflösung als zu klein empfunden.

Darüber hinaus ermöglichte das spezifisch angepasste HMI-Design zusammen mit einer Reihe einfach gestalteter und daher leicht zu memorierenden Fingergesten eine intuitive und schnelle Bedienung, was sich zusätzlich positiv in der Bewertung durch die Teilnehmer niederschlug. Dieser Punkt sollte für zukünftige Entwicklungsarbeiten nicht unterschätzt werden. Eine bloße 1:1 Umsetzung herkömmlicher Menüstruktur ist kaum ausreichend, um Vorteile der Multi-Touch Gestenbedienung tatsächlich ausschöpfen zu können. Ferner sollten bei der Neugestaltung des Anzeige- und Bedienkonzeptes etablierte Gestaltungskonzepte berücksichtigt werden, um deren Erlern- und Abrufbarkeit zu erleichtern, z.B. „pinch-to-zoom“ (Auf- und Zuziehen) für Vergrößerung/Verkleinerung, „swipe“ (Wischen) für Blättern oder Verschieben, „hold“ (langer Druck) für Kontextmenüs etc.

Weiterhin wurde die zur Gestenerkennung eingesetzte Infrarottechnologie aufgrund der geringen Reibung mit der Displayoberfläche als komfortabler gegenüber der kapazitiven Technologie gelobt. Anfängliche Befürchtungen, es könnte aufgrund der erhöhten Sensitivität verstärkt zu Fehleingaben kommen, konnten nicht bestätigt werden.

Andererseits wurden durch die Untersuchung auch vorhandene Schwächen des Multi-Touch Mock-Ups, sowie Einschränkungen aufgrund der Untersuchung deutlich. Dies wurde insbesondere bei der mangelhaften ergonomischen Integration in den Arbeitsplatz (stehende Bedienung, dadurch u.a. auch Belastung im Nacken) und der geringen Funktionstiefe deutlich, die dem frühen Entwicklungsstand des Mock-Ups geschuldet sind. Künftige Untersuchungen sollten ergonomische Aspekte bei der Gestaltung des Mock-Ups besser berücksichtigen. Entgegen vorheriger Erwartungen wurden die Belastung für Hände und Arme allerdings eher als unproblematisch empfunden, was aber auch auf die kurze zeitliche Dauer der Simulation zurückzuführen sein kann.

Auch wurde das Datalinkszenario als zu weit in die Zukunft blickend bemängelt, vielmehr wurde an dieser Stelle die Untersuchung eines Übergangsszenarios mit Sprechfunk angeregt. Einige Aussagen der Teilnehmer weisen darauf hin, dass das verwendete Szenario trotz der zugrunde gelegten Simulation mit dem Realzeitsimulator des DLR (4D-CARMA) die Realität nur sehr eingeschränkt widerspiegelte. Für künftige Untersuchungen sollte daher zur Verbesserung der Validität und Generalisierbarkeit der Ergebnisse auf ein realitätsnäheres Aufgabenszenario geachtet werden.

Nichtsdestotrotz lieferte die Untersuchung zahlreiche Hinweise auf mögliche Verbesserungen des Mock-Up HMIs (siehe SESAR, 2014) und einige grundlegende Aspekte konnten in Form erster Guidelines für die Gestaltung von Multi-Touch Gestensystemen abgeleitet werden. Mit zunehmender Funktionstiefe wird die Herausforderung insbesondere in klaren Gesten und einer übersichtlichen Menügestaltung liegen. Dabei ist es auch denkbar, dass eine Lösung bevorzugt werden wird, die einen kombinierten Einsatz von Multi-Touch für die häufigsten Eingaben und dazu erweiterte Eingabemöglichkeiten mit Maus, elektronischem Stift o.ä. vorsieht.

Die bisherige Integration innovativer HMI-Lösungen in der Flugsicherung besteht zumeist im Beistellen zusätzlicher Gerätschaften, um laufende technische Systeme in ihrer Sicherheit möglichst unbeeinträchtigt zu lassen (z.B. AMAN, PSS, 2-TID<sup>1</sup>). Die vorliegende Untersuchung hat gezeigt, dass es mit Bezug zu Multi-Touch Gestenbedienung durchaus lohnenswert sein könnte, hier über einen größeren Integrationsschritt nachzudenken, um eine volle Nutzung der Möglichkeiten dieser Technologie am Lotsenarbeitsplatz zu erreichen. Anhand der Ergebnisse dieser Untersuchung konnten diesbezüglich erste Erfahrungen gesammelt und in Form von Guidelines für kommende Weiterentwicklungen dokumentiert werden. Die Zusammenarbeit zwischen Forschungsinstitut, Systemhersteller und ANSP hat sich im vorliegenden Beispiel als ideale Konstellation für die Arbeit an Innovationsthemen für die DFS erwiesen.

## Referenzen

- Brooke, J. (1996). "SUS: A "quick and dirty" usability scale". In: Usability evaluation in industry, Jordan, P. W., Thomas, B. A. Weerdmeester & McClelland, I. L. (Eds.). London: Taylor & Francis, pp. 189–194.
- Gürlük, H. & Uebbing-Rumke, M. (2013) „Bedienkonzept Multi-Touch HMI für Feeder Lotsen“, DLR Internal Report IB-112-2013-24.
- Hagemann, K. Uebbing-Rumke, M., Gürlük, H. Lambrecht, J. (2011). Ergonomische Bewertung eines Quad HD Monitors für den TMA/ACC Lotsenarbeitsplatz. *TE im Fokus*, 01/11, Langen: Deutsche Flugsicherung.
- Hart, S.G., & Staveland, L.E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P.A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), *Human mental workload* (pp. 139–183). Amsterdam: North-Holland.
- Hassenzahl, M., Eckoldt, K. & Thielsch, M. T. (2009). User Experience und Experience Design - Konzepte und Herausforderungen. In H. Brau (Hrsg.), *Usability Professionals 2009. Berichtband des siebten Workshops des German Chapters der Usability Professionals Association e.V.* (S. 233 - 237). Stuttgart: Fraunhofer-Verlag.
- Laugwitz, B., Held, T. & Schrepp, M. (2008). User Experience Questionnaire. In A. Holzinger (Ed.): *USAB 2008, LNCS 5298*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- SESAR (2014). Innovation Analysis Report 2013. Deliverable 10.10.02-D93.
- Wald, D., Buxbaum, J., Konopka, J (2012). Innovative Mensch-Maschine Interaktionsmöglichkeiten in der Flugverkehrskontrolle. *TE im Fokus*, 1/12, Langen: Deutsche Flugsicherung.

---

<sup>1</sup> DFS-interne prototypische Entwicklung

# Bewertung von Fluglärmprognosetools unter Verwendung von ATM-Simulationsdaten

Stefan Schwanke, Lukas Sapok

## 1. Einleitung

Vorliegender Artikel basiert auf einer Masterarbeit, die bei der DFS in Zusammenarbeit mit der TU Darmstadt, Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik, durchgeführt wurde [1]. Die Arbeit führt frühere Arbeiten im Projekt iPort<sup>1</sup> (innovativer Airport) fort, beispielsweise zu Schadstoffemissionen [2], [3]. Sofern sich die Qualität der Simulationsergebnisse in diesem Bereich nachweislich verbessern lässt, ist eine Erweiterung der Schnell- und Realzeit-Simulationsumgebung im Forschungszentrum vorgesehen, um belastbare Aussagen zu Umweltaspekten (Lärm- und Schadstoffemissionen) bereits frühzeitig in Simulationen zu ermöglichen. Diese Ergänzung der bisherigen Standardauswertungen [4] soll weit vor Inbetriebnahme oder Änderung von Systemen, Prozessen oder Verfahren stattfinden, erste umweltrelevante (positive oder negative) Trends bei der Gegenüberstellung von Verkehrsszenarien und Kontrollverfahren aufzeigen und die spätere Entscheidungsfindung unterstützen. Dabei sollen die hier aufgezeigten Analysemöglichkeiten durchaus ergänzend zu weiteren, etablierten Untersuchungen mit Fluglärmbezug sein.

## 2. Ausgangslage, Motivation und Vorgehensweise

Fluglärm im Umfeld von Flughäfen ist, noch vor lokaler Luftqualität, die negativste vom Menschen wahrgenommene Umweltauswirkung des zivilen Luftverkehrs. Dies spiegelt sich auch in der Tatsache wider, dass sich die Fluglärm(schutz)kommissionen (FLK), die eigentlich Kommissionen „zum Schutz gegen Fluglärm und gegen Luftverunreinigungen durch Luftfahrzeuge“ sind (LuftVG §32b Absatz 1 Satz 1), praktisch ausschließlich mit Fluglärm beschäftigen. Vor allem bei Neu- und Ausbaurvorhaben von Flughäfen gibt es Widerstand von sich betroffen fühlenden Anwohnern, die immer mehr die Einführung von auch die

Flugsicherung betreffenden Lärminderungs-möglichkeiten bei An- und Abflügen (z.B. durch kontinuierliche Steig- und Sinkprofile, Anheben des Gleitpfads, Umfliegen von dichtbesiedelten Gebieten) durchsetzen wollen. Es sollte an dieser Stelle aber auch erwähnt werden, dass nicht alle Maßnahmen in gleichem Ausmaß und auch nicht in allen Gebieten um einen Flughafen lärmreduzierend wirken. Es kann sogar Bereiche geben, in denen es im Vergleich zu vorher lauter werden kann.

Damit die Fluglärmbelastung nicht in gleichem Maße wie der Luftverkehr ansteigt, müssen Fluggesellschaften, Flughäfen, Flugzeughersteller und Flugsicherungen auf nationaler und internationaler Ebene erlassene Vorschriften zur Begrenzung von Lärmimmissionen einhalten. Lärmreduktionsmaßnahmen sind von der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation ICAO im so genannten „Balanced Approach“ [5] zusammengefasst und enthalten genau in der Reihenfolge die Hauptelemente:

- Lärmreduktion an der Quelle (z.B. Triebwerke)
- Gestaltung der Flächennutzung um einen Flughafen (z.B. Lärmschutzzonen)
- Flugbetriebsverfahren zur Lärmreduktion (z.B. Start-/Landeverfahren)
- Flugbetriebsbeschränkungen (z.B. Nachtflugverbot)

Eines der Ziele bei der Planung, Entwicklung und Erprobung von Luftraumänderungen oder Flugverfahren durch die DFS ist neben Sicherheit, Leistungsfähigkeit und Kosteneffizienz die Minimierung von Umweltauswirkungen. Dies wird durch das Luftverkehrsgesetz<sup>2</sup> [6] und diverse EU-Richtlinien gefordert (z.B. SES, Single European Sky, [7]). Im speziellen Fall der lärmfachlichen Abwägung von Flugrouten wird das Vorgehen vom Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung (BAF) im Benehmen mit dem

---

<sup>1</sup> iPort war ein national gefördertes Projekt im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms LuFo IV (Laufzeit: 01.01.2009 – 31.12.2012).

<sup>2</sup> LuftVG §29b Absatz 2: „Die Luftfahrtbehörden und die Flugsicherungsorganisation haben auf den Schutz der Bevölkerung vor unzumutbarem Fluglärm hinzuwirken.“

Umweltbundesamt überwacht und die Flugverfahren schlussendlich per Rechtsverordnung festgelegt.

Ein wichtiges Instrument bei der Entwicklung von Flugbetriebsverfahren (nicht nur BAF-pflichtige) sind ATM-Simulationen. Dabei werden von der DFS sowohl Schnellzeitsimulationen als auch Realzeitsimulationen eingesetzt. Aufgrund der zunehmenden Relevanz von Umweltbelastungen auch für die Flugsicherung soll Fluglärm zukünftig auch bei ATM-Simulationen Berücksichtigung finden.

Es wurden deshalb verschiedene Berechnungsvorschriften und Lärmprognosesoftware auf ihre Eignung für diesen Zweck untersucht. Insbesondere die Nutzbarkeit von individuellen Simulationsergebnissen (4D-Trajektorien, also: dreidimensionale Positionsinformation mit Zeitstempel) auf Basis der verwendeten Flugleistungsmodellierung, die von Standardwerten der Tools abweichen können, war von Bedeutung. Für ein Beispielszenario wurden die Ergebnisse einer Realzeitsimulation als Eingangsdaten für die Lärmprognose verwendet. Diese wurden für das jeweilige Tool / Werkzeug angepasst. Gegebenenfalls für die Berechnung fehlende Daten, wie Schubstärke und Triebwerkszuordnung, mussten ergänzt werden. Die Ergebnisse der Arbeit sollen die DFS bei der Auswahl und

Verwendung eines geeigneten Programms und dessen Einbindung in die vorhandene Infrastruktur unterstützen. Vorliegender Artikel berichtet über den derzeitigen Stand dieser Untersuchung.

### 3. Verfahren und untersuchte Programme zur Prognose von Fluglärm

Einführend werden Grundlagen und die allgemeinen Vorgehensweise in der Fluglärmprognose vorgestellt. Die Methoden und Richtlinien der Flugleistungs- und Fluglärmrechnung, die bei den untersuchten Programmen zum Einsatz kommen, werden kurz vorgestellt, um die Funktionsweise der Software nachvollziehen zu können.

#### 3.1 Allgemeines Vorgehen

Der prinzipielle Aufbau eines Fluglärmmodellierungssystems ist in Abb. 1 dargestellt. Alle Verfahren haben grundsätzlich dieselben Bausteine. Sie setzen sich aus einem Eingabe- bzw. Datenaufbereitungsteil, Berechnungsteil und Ausgabe- oder Weiterverarbeitungsteil zusammen. Zur Erstellung von Lärmkarten werden zwei Arten von Daten benötigt. Zum einen sind das die Flugzeuginformationen, die sich aus akustischen Werten und Leistungsdaten

zusammensetzen und meist unmittelbar im Programmkern verankert sind. Jeder Flugzeugtyp kann durch einen eigenen Datensatz repräsentiert werden oder flugzeugtechnisch und akustisch ähnliche Flugzeugtypen werden in einem Datensatz mit charakteristischen Durchschnittswerten zusammengefasst. Zum anderen benötigt man Infrastruktur- und Szenariodaten, die den Flughafen und die im Betrachtungszeitraum stattfindenden Flugbewegungen beinhalten. Die Beschreibung des Flughafens beschränkt sich meist auf den Referenzpunkt und die Lage der Start- und Landebahnen, welche jeweils die Anfangs- bzw. Endpunkte der Flugtrajektorien bilden<sup>3</sup>. Die Beschreibung der Flugbewegungen kann sich je nach Datenquelle und Dateiformat stark

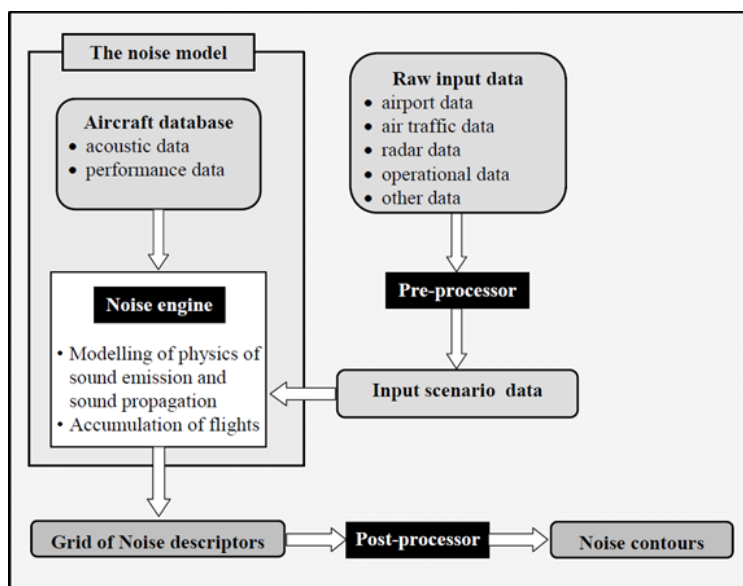


Abb. 1: Bestandteile eines Fluglärmmodellierungssystems [8]

<sup>3</sup> Viele Fluglärmprognosemodelle können den durch Triebwerkstests, APU-Einsatz oder anderen Quellen (z.B. Bodenfahrzeuge) verursachten Lärm nicht ermitteln; diese Lärmemissionen, genauso wie die von militärischem

Luftverkehr, finden daher im Rahmen der vorliegenden Untersuchung keine Beachtung.

unterscheiden, da beispielsweise dafür aufgezeichnete Radardaten (z.B. FANOMOS), Simulationsdaten oder programminterne Standardflugverfahren verwendet werden können, so dass ein mehr oder weniger aufwendiges „Preprocessing“ vor der Lärmrechnung notwendig ist. Die Fluglärmrechnung modelliert anschließend die Entstehung und Ausbreitung des Schalls mit Hilfe der definierten Eingangsdateien sowie den hinterlegten akustischen und flugphysikalischen Datenbanken und akkumuliert den Lärm aus allen Flugbewegungen an jedem zuvor festgelegten Immissionspunkt (siehe auch Gleichung 2) eines Standardgitters. Auf Basis dieser Information kann entweder direkt oder indirekt über eine Konturflächenbildung eine Gewichtung mit Bevölkerungs(dichte)daten im „Postprocessing“ vorgenommen werden.

### 3.2 Flugleistungs- und Fluglärmrechnung

#### 3.2.1 Flugleistungsrechnung

Flugleistungsmodelle werden zur Beschreibung des Flugverhaltens von Luftfahrzeugen verwendet und sind damit, neben dem Flugzustand, unmittelbar relevant für die Fluglärmrechnung. Sie bilden die Grundlage für Simulationen und Trajektorienvorhersage. Je nach Anwendungsgebiet unterscheiden sich die Modelle in Genauigkeit, Komplexität und Rechenaufwand. Die Skala reicht von sehr genauen Modellen mit sechs Freiheitsgraden z.B. für das Pilotentraining von Luftverkehrsgesellschaften bis hin zu einfachen Punktmassenmodellen ohne rotatorische Freiheitsgrade. In den ATM-Simulationen der DFS kommt zur Beschreibung der Flugbewegungen meistens das Totalenergiemodell BADA zum Einsatz, das von EUROCONTROL gepflegt und weiterentwickelt wird. Die Datenbank besteht aus ASCII-Dateien, die sowohl Standardflugprofile als auch Koeffizienten für die Flugleistungsrechnung enthalten. Die zum Zeitpunkt des Artikels aktuelle BADA-Version 3.11 unterstützt 150 Flugzeugmodelle direkt, weitere 255 Modelle werden über eine Äquivalenzliste unterstützt, die ähnlichen Flugzeugtypen ein direkt modelliertes Flugzeug zuweist [9]. Auf diese Weise sind 99,85 % aller Flugbewegungen in Europa abgedeckt [10]. Parallel zu BADA 3.x, das in den Simulatoren zum Einsatz kommt, gibt es seit kurzem die BADA 4-Familie, die weniger Flugzeugtypen enthält, aber umfangreichere und genauere Daten zu den unterstützten Typen liefert. Für die Untersuchungen stand diese Information aber nicht zur Verfügung.

Da Verkehrsflugzeuge innerhalb eingeschränkter Flugbereichsgrenzen operieren, sind Vereinfachungen ohne große Fehler möglich [11]. Das Totalenergiemodell von BADA beschreibt das Flugzeug als Punktmasse. Es basiert auf einem kinetischen Ansatz, d.h. die Modellierung geht von den die Bewegung verursachenden Kräften aus. Die grundlegende Gleichung lautet [9]:

$$(F_{Thrust} - F_{Drag}) \cdot V_{TAS} = mg \frac{dh}{dt} + mV_{TAS} \frac{dV_{TAS}}{dt} \quad (1)$$

mit

- $F_{Thrust}$  : Schubkraft
- $F_{Drag}$  : Luftwiderstandskraft
- $V_{TAS}$  : Wahre Fluggeschwindigkeit (True Air speed)
- $m$  : Flugzeugmasse
- $g$  : Erdbeschleunigung
- $\frac{dh}{dt}$  : Steig-/Sinkrate
- $\frac{dV_{TAS}}{dt}$  : Beschleunigung

Die Leistung der in der Horizontalebene am Flugzeug angreifenden Kräfte wird mit der zeitlichen Änderung der kinetischen und potentiellen Energie gleichgesetzt. Mit den Angaben von Flugzeugherstellern und -betreibern werden für verschiedene Flugphasen typische Werte für diese Größen ermittelt. In Verbindung mit einem Atmosphärenmodell (z.B. Internationale Standardatmosphäre) können somit Flugprofile auf Basis von BADA berechnet werden. Neben den in Flugsicherungssimulationen zum Einsatz kommenden BADA-Modellen für die Flugleistungsmodellierung gibt es in der Fluglärmrechnung auch noch die Ermittlung von Vertikal- und Horizontalprofilen auf Basis der Methodenvorgaben von SAE [12] und ECAC [8].

#### 3.2.2 Fluglärmrechnung

Jedem Lärmprognosetool liegt eine Vorschrift zur akustischen Berechnung zugrunde (s. auch nächster Abschnitt). Kommerzielle Lärmsoftware kann in der Regel, je nach erworbener Lizenz, mehrere Berechnungsmethoden anwenden. Jede Rechenmethode inklusive der dazugehörigen Flugzeugdatenbank, die Lärm- und Leistungsdaten zu verschiedenen

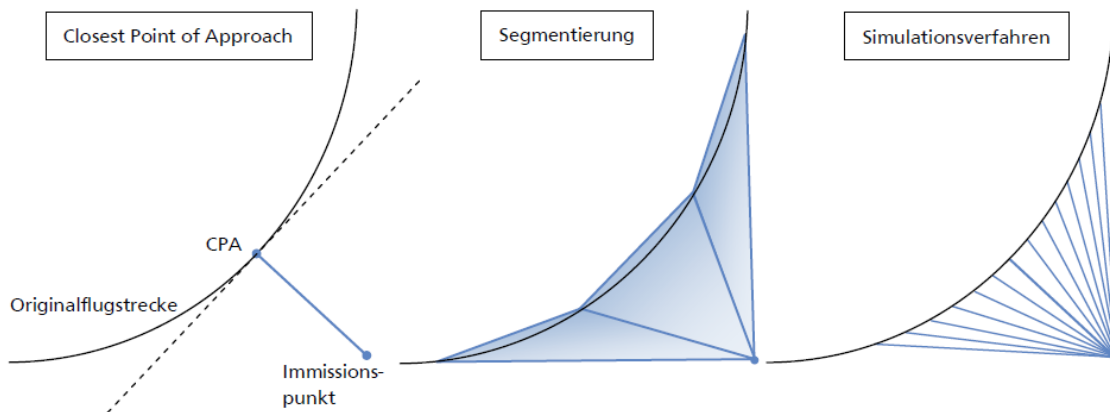


Abb. 2: Lärmmodellierungsalgorithmen [1]

Flugzeugtypen enthält, versucht je nach Anwendungszweck und Detaillierungsgrad die Entstehung und Ausbreitung des Schalls unter folgenden Einflussgrößen zu beschreiben:

- Flugzeugmuster (Lärmquellen am Flugzeug<sup>4</sup>, Masse)
- Flugzeugkonfiguration (Fluglage, Klappen- und Fahrwerksstellung)
- Flugleistung (Schub, Flughöhe, Fluggeschwindigkeit)
- Abstand von der Lärmquelle (Pegelabnahme durch geometrische Divergenz und frequenzabhängige Absorption auf dem Schallweg durch die Luft)
- Richtwirkung (z.B. Art und Montageort der Triebwerke)
- Bodeneffekte (unterschiedliche Abschirmungen, Streuungen und Reflexionen durch Bebauungen und Bewuchs insbesondere bei niedrigen Höhen)
- Atmosphärendefinition (z.B. Temperatur- und Feuchtigkeitsverlauf, Wind)

Viele dieser Effekte lassen sich nur mit hohem Aufwand in der Modellbildung, Datenbeschaffung und Rechenzeit ausreichend simulieren. In der Praxis haben sich vereinfachte Berechnungsverfahren bewährt, s. Abschnitt 3.4. Sie berechnen die Schallausbreitung nur für standardisierte Bedingungen und vernachlässigen oder vereinfachen einige Ausbreitungseffekte (z.B. mit Korrekturfaktoren). Dadurch können Abweichungen von mehreren dB im Vergleich zu gemessenen Werten

entstehen. Weil Lärmkarten in der Regel Mittelwerte für einen Betrachtungszeitraum von mehreren Monaten darstellen, ergibt sich dennoch eine gute Näherung an reale Bedingungen [13].

Da die Leistungsfähigkeit von Computern und gleichzeitig das physikalische Verständnis des Fluglärms stetig zugenommen hatten, wurden die Berechnungsmethoden über die Jahre weiterentwickelt. Als Beispiel dafür sei in den folgenden Sätzen nur die Trajektorienmodellierung herausgegriffen<sup>5</sup>.

Man unterscheidet zwischen CPA („Closest Point of Approach“-Methode, Segmentierung und Simulationsverfahren. Abb. 2 stellt die Verfahren schematisch dar. Der schnellste und einfachste Modellierungsansatz für eine Trajektorie ist die CPA-Methode, die in den 1970er Jahren auf internationaler Ebene entwickelt wurde. Dabei wird zunächst der kleinste Abstand zwischen Flugzeug und Immissionspunkt bestimmt. Danach wird der schub- und flugzeugtypabhängige Immissionspegel für diese Entfernung mittels einer linearen und logarithmischen Interpolation aus einem akustischen Datenblatt (sog. „Noise-Power-Distance datasheet“) gewonnen. Dieser gilt strenggenommen jedoch nur für eine unendlich lange, gerade Flugstrecke, was zwangsläufig zu Ungenauigkeiten bei gekrümmten Flugbahnen führt. Aufgrund dieses Nachteils und der erwähnten Weiterentwicklung der Rechnerfähigkeiten wurde die CPA-Methode heute weitgehend vom Segmentierungsverfahren verdrängt. Dabei handelt es

<sup>4</sup> Leitwerk, Rumpf, Triebwerke, Landeklappen (Flaps), Vorflügel (Slats), Fahrwerk und Schächte

<sup>5</sup> Die Entwicklung der Modellierung der anderen zuvor genannten Effekte kann z.B. in [28] nachverfolgt werden.

sich um eine Weiterentwicklung der CPA-Methode, bei der die dreidimensionale Trajektorie in endliche, geradlinige Streckensegmente unterteilt wird. Jedes finite Segment trägt zur Gesamtexposition am Immissionspunkt bei. Der Immissionspegel ergibt sich aus der Summation der einzelnen Segmentpegel. Segmentierung wird in den gängigen nationalen und internationalen Berechnungsvorschriften (ECAC Doc. 29, AzB 08, SAE AIR 1845, s. auch nächstes Kapitel) angewendet. Die rechenintensivste Methode ist das Simulationsverfahren. Dabei wird der komplette akustische Beitrag aus dem zeitlichen Verlauf eines Überflugs an einem Immissionspunkt zu einem Gesamtpegel integriert. Erfolgt die Segmentierung in geeigneter Art und Weise, zum Beispiel beim einem relativ konstanten Geradeausflug, ist diese nicht notwendigerweise weniger genau als eine Simulation bei gleichzeitig verminderter Rechenzeit.

### 3.3 Regulatorische Rahmenbedingungen und Fluglärmrechnungsvorschriften

Nachdem in den vorherigen Abschnitten die Komponenten der Fluglärmprognose eher technisch allgemein beschrieben worden sind, wird in diesem Kapitel kurz auf die wesentlichen Berechnungsvorschriften und Datenbanken als Basis für die Lärmrechnung eingegangen. Das 2008 veröffentlichte Dokument Doc 9911 [14] der ICAO empfiehlt eine Methode zur Berechnung von Fluglärm und ersetzt das bis dahin gültige ICAO Circular 205 [15]. Die Empfehlung ist kompatibel zur europäischen Rechenvorschrift ECAC Doc. 29 3rd Ed. [8] und der amerikanischen Methodik SAE AIR 1845 [12]. Mit der dritten Edition des Dokuments ECAC Doc.29 wurde die dazugehörige Flugleistungs- und Fluglärm Datenbank ANP<sup>6</sup> eingeführt.

Im Jahr 2002 wurde die EU-Richtlinie 2002/49/EG über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm verabschiedet [16]. Sie gilt für Straßen-, Schienen, Flug- und Industrielärm. Neben Begriffsbestimmungen enthält die Richtlinie Definitionen für Beurteilungspegel und Vorschriften zur Erstellung strategischer Lärmkarten und Lärmaktionsplänen. Demnach müssen für Großflughäfen mit mehr als 50.000 jährlichen Flugbewegungen alle fünf Jahre Lärmkarten und Aktionspläne erstellt werden. Die dafür anzuwendenden Beurteilungspegel sind der Tag-

Abend-Nacht-Pegel (day-evening-night)  $L_{den}$  und der Nachtbeurteilungspegel  $L_{night}$ .

$$L_{den} = 10 \cdot \frac{\lg 1}{24} \left( 12 \cdot 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{L_{evening}+5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{L_{night}+10}{10}} \right) \quad (2)$$

$L_{day}$ ,  $L_{evening}$  und  $L_{night}$  sind äquivalente Dauerschallpegel gemäß ISO 1996-2 [17] für den Bezugszeitraum ein Jahr. Durch die Zuschläge von 5 und 10 dB für den Abend- bzw. Nachtzeitraum werden Lärmimmissionen in dieser Zeit (4h, beginnend um 18 Uhr für den Abend- und 8h, beginnend um 22.00 Uhr für den Nachtzeitraum) stärker gewichtet, was dem besonderen Ruhebedürfnis der Bevölkerung in dieser Tageszeit geschuldet ist. Für das bessere Verständnis der Lärmsituation insbesondere nachts wird zusätzlich der Einzelwert für  $L_{night}$  ausgegeben. Die Berechnungsmethode zur Bestimmung der Beurteilungspegel ist abhängig von der Lärmquelle. Für Fluglärm gibt die Richtlinie derzeit lediglich eine Empfehlung und die EU-Mitgliedsstaaten dürfen bereits vorhandene nationale Berechnungsmethoden, in Deutschland zum Beispiel die AzB (s. unten), vorläufig weiterverwenden. Zur nächsten Lärmkartierungsrunde im Jahr 2017 plant die EU-Kommission die Berechnungsvorschriften in allen Mitgliedsländern zu vereinheitlichen. Dafür wurde das Projekt „Common Noise Assessment Methods in Europe“ (CNOSSOS-EU) gestartet. Der 2012 veröffentlichte CNOSSOS-EU Reference Report [18] empfiehlt derzeit die Berechnungsmethode ECAC Doc. 29 3rd Ed.

Auf nationaler Ebene regelt das Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm (FluLärmG) [19] die Einrichtung von Lärmschutzbereichen an Flugplätzen. Es schreibt vor, welche Flugplätze Lärmschutzbereiche einzurichten haben und welche Beschränkungen für diese Bereiche gelten. Dafür werden zwei Tag- und eine Nacht-Schutzzone sowie die anzuwendenden Beurteilungspegel festgelegt. Die zugehörige Rechtsverordnung (1. FlugLSV) [20] konkretisiert das Verfahren zur Berechnung der Indizes. Dabei kommen die Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen (AzB) [21] und die Anleitung zur Datenerfassung über den Flugbetrieb (AzD)

<sup>6</sup> Aircraft Noise Performance - diese Datenbank wird von EUROCONTROL gepflegt und ist nach einer Registrierung

kostenlos zugänglich. Die aktuelle Version ist V2.0. Derzeit sind Daten von 143 Flugzeugtypen verzeichnet.

zum Einsatz. Die Datengrundlage der AzB unterscheidet sich in wesentlichen Punkten von der ANP-Datenbank. Es gibt keine flugzeugtypenspezifischen Daten, sondern lediglich 36 Flugzeuggruppen in denen Flugzeuge mit ähnlichen akustischen und flugbetrieblichen Eigenschaften zusammengefasst werden. Jede Gruppe verfügt über je einen Datensatz für Standardprofile bei Start und Landung – die sogenannte Luftfahrzeugklasse.

Die Lärmergebnisse der einzelnen Berechnungsvorschriften unterscheiden sich durch die unterschiedlich aufgebauten Datenbanken für Flugzeugtypen und Flugleistungen zum Teil sehr stark voneinander [22]. In unmittelbarer Nähe eines Geradeausfluges im Bereich des Flughafens sind die Unterschiede gering, mit zunehmender seitlicher Distanz und im Bereich von Kurvenflügen können die Pegeldifferenzen jedoch mehrere Dezibel ausmachen. Das Anwendungsgebiet der AzB und der ECAC-Vorschrift liegt vor allem bei der Lärmbewertung von Prognosedaten. Für vergleichende Lärmstudien können aber auch konkrete Szenarien (z.B. verschiedene Flugverfahren) aus der Vergangenheit gegenübergestellt werden. Der wesentliche Unterschied ist der Detailgrad der Modelle und Eingangsdaten (z.B. Flugzeuggruppen vs. Luftfahrzeugtypen, Triebwerkszuordnung, Trajektorienmodellierung). Zudem sind die Datenbanken der AzB strenggenommen nur für deutsche Verkehrsflughäfen gültig. Eine weitere Verschiedenheit ist die Möglichkeit der Abbildung des Rollverkehrs, die die AzB vorsieht und ECAC nicht. Dies spielt aber für die Flugsicherung nur eine untergeordnete Rolle. Es gibt Bestrebungen in Deutschland, die beiden Richtlinien zu einer einheitlichen Vorschrift zu vereinigen und für die Lärmkartierung nach EU-Umgebungslärmrichtlinie verbindlich zu machen.

Die DFS hat keine Verpflichtung zur Erstellung von offiziellen Lärmkarten und Lärmschutzbereichen, weder für die EU-Kommission, noch für Flughäfen oder andere Einrichtungen. Im Fall einer entsprechenden Anfrage durch die zuständigen Landesbehörden besteht jedoch Mitwirkungspflicht bei der Erstellung von Datenerfassungssystemen (DES), welche für die Lärmbeurteilung nach AzB verwendet werden.

Weiterhin gibt es keine Verpflichtung, eine bestimmte Rechenvorschrift im Rahmen der Planung von Verfahren zu verwenden. Nach dem Luftverkehrsgesetz besteht lediglich ein lärmfachliches Abwägungsgebot. Wie dieses auszusehen hat, ist nicht näher definiert. Die DFS hat sich im konkreten Fall für die Berechnungsmethode ECAC Doc. 29 3rd Ed. mit dem Programm NIROS für die Lärmbewertung von Flugverfahren entschieden [23].

### 3.4 Untersuchte Programme zur Berechnung von Fluglärm

Hier betrachtete Fluglärmrechnungsprogramme berechnen den von Flugzeugen verursachten Lärm (Flugzeugschall, der den Boden erreicht → Immissionen). Die Ermittlung erfolgt nach den in den vorherigen Kapiteln erwähnten Vorschriften. Neben den Modellen für Flugleistungsrechnung (welches ggf. durch eigene Trajektorien Daten umgangen werden kann) und Lärmrechnung, die den Kern eines Lärmprognosetools darstellen, haben die Programme verschiedene Zusatzfunktionen. Sie unterscheiden sich darüber hinaus in der Bedienung, dem Kundendienst, der Verfügbarkeit und im Preis. Dieser Abschnitt gibt zunächst eine Übersicht über derzeit verwendete Fluglärmrechnungsprogramme. Im Anschluss werden die drei in der zugrundeliegenden Arbeit [1] bewerteten Tools vorgestellt und beschrieben. Die Vielfalt an Lärmrechnungsprogrammen ist sehr groß, deshalb werden im Folgenden eine grobe Einteilung in drei Segmente vorgenommen und einige Beispiele genannt.

#### 3.4.1 Kommerzielle Software

Kommerzielle Programme werden von auf Lärmrechnung spezialisierten Unternehmen vertrieben. Sie sind allgemein verfügbar, ausgereift und beherrschen meist mehrere Berechnungsvorschriften. Die Firmen bieten häufig auch Module für andere Lärmarten (Straßen-, Schienen-, Industrielärm) und Luftschadstoffe an. Bei der Fluglärmrechnung werden in der Regel die gängigen Segmentierungsverfahren angewendet. Schließt der Kunde einen Supportvertrag ab, wird er mit Updates und technischer Unterstützung durch den Kundendienst versorgt. Da es sich um einen sehr spezialisierten Anwendungsbereich mit wenigen Nutzern handelt, sind die Preise vergleichsweise hoch. Beispiele sind

- SoundPLAN der Fa. Braunstein + Berndt
- IMMI der Fa. Wölfel
- **CadnaA** der Fa. DataKustik (basierend auf AzB und ECAC Doc 29 2nd ed.)

#### 3.4.2 Nichtkommerzielle Software

Nichtkommerzielle Software wird z.B. im Auftrag von Behörden oder öffentlichen Institutionen für Umweltverträglichkeitsstudien entwickelt. Sie kann ebenfalls allgemein zugänglich gemacht werden oder nur einer bestimmten Zielgruppe zur Verfügung gestellt werden. Manche Programme sind auch kostenlos oder

gegen eine symbolische Einmalzahlung erhältlich. Für Behörden entwickelte Tools implementieren meist nur die in dem jeweiligen Land gültige Berechnungsvorschrift und haben einen geringeren Funktionsumfang als kommerzielle Software. Es kann sein, dass eine Supportanfrage mehrere Tage oder Wochen unbeantwortet bleibt; Wartung und Updates werden in der Regel dafür dann auch kostenlos zur Verfügung gestellt. Dazu zählen z.B.

- INM entwickelt/beauftragt von der FAA
- AEDT entwickelt/beauftragt von der FAA (basierend auf SAE und ECAC Doc 29 3rd ed.)
- IMPACT entwickelt/beauftragt von EUROCONTROL (basierend auf ECAC Doc 29 3rd ed.)

### 3.4.3 Forschungssoftware

Die von Forschungsinstituten oder Universitäten entwickelten Programme haben oft experimentellen Charakter und sind selten allgemein verfügbar. Als Berechnungsvorschrift kommen häufig aufwändige Simulationsverfahren zum Einsatz, die derzeit nur auf Hochleistungscomputern und auch zum Teil nur für wenige Flugmodelle ausgeführt werden können. Zu diesen Programmen zählen z.B.

- SIMUL entwickelt/beauftragt vom DLR
- FLULA2 entwickelt/beauftragt von der Eidgenössische Materialprüfungsanstalt (EMPA)

## 4. Lärmrechnung unter Verwendung von Simulationsdaten

Für die Erprobung und vergleichende Bewertung standen am Forschungszentrum der DFS drei Lärmtools zu Verfügung (fett markiert in der obigen Aufzählung). Deren Funktionsweise deckt sich mit dem in Abb. 1 dargestellten prinzipiellen Aufbau. Für weiterführende Informationen sei auf die entsprechenden Handbücher verwiesen [24], [25], [26].

Nachdem zuvor allgemein und in einer Übersichtsweise auf Lärmrechnung und Berechnungsvorschriften eingegangen wurde, erläutert dieser Abschnitt das verwendete Beispielszenario aus einer Realzeitsimulation, das für die Bewertung und den Vergleich der Lärmsoftware verwendet wurde. Insbesondere wird auf

die verfügbaren Simulator-Ausgangsinformationen, die notwendige Datenergänzung und die Zuordnung der Flugzeug- und Triebwerkstypen zu den akustischen Datenbanken eingegangen. Durch die Verwendung desselben Szenarios für alle Programmtests wurde die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet.

Basis der Untersuchungen war eine im Juli 2012 durchgeführte Realzeitsimulation des An- und Abflugverkehrs an einem Verkehrsflughafen mit Lotsen und Simulationspiloten über ca. 85 Minuten Dauer im Forschungszentrum. Insgesamt wurden 123 Flugbewegungen unterschiedlichster Flugzeugtypen realisiert (s. Tabelle 1). Bei dem für diese Arbeit ausgewählten Simulationslauf handelt es sich um ein Referenzszenario mit herkömmlichen Transition-Anflugverfahren für eine Betriebsrichtung. Da es sich um einen En-Route-Simulator handelt, wurden Bodenbewegungen auf Start- und Landebahnen sowie Rollwegen nicht abgebildet. Während der Simulation wurden die Trajektorien und das Radarbild der Flugzeuge anhand der Flugleistungsmodelle BADA 3.3 und GAME [27] erzeugt. Der Simulationslauf wurde aufgezeichnet (insgesamt wurden 60 Minuten ausgewertet<sup>7</sup>), so dass für jede Flugbewegung Daten für die 4D-Position, Rufzeichen, Flugzeugtyp, aktuelle Masse, Geschwindigkeit sowie Sink- und Steigrate zur weiteren Verarbeitung vorlagen. Die Struktur und der Inhalt der Dateien kann in [1] auszugweise eingesehen werden. Die Auswahl der Daten für die Export-Dateien richtete sich nach den zu testenden Tools IMPACT, AEDT und CadnaA.

Wie in Tabelle 1 dargestellt musste nun als nächster Schritt in Vorbereitung einer Lärmrechnung eine Zuordnung der in der Simulation verwendeten Flugzeugtypen zu den Lärmklassen der AzB bzw. zu den akustischen Daten der ANP im Rahmen von ECAC-Rechnungen vorgenommen werden. Es kann vorkommen, dass der Original-datensatz Flugzeugtypen enthält, für die in der Simulation keine direkte Verlinkung möglich ist. Diese werden in der Simulationsvorbereitung durch die vorgeschlagenen Äquivalenzflugzeugmodelle (orange markiert in Tabelle 1) ersetzt [9]. Für die Lärmrechnung wurde nach Möglichkeit das in der Realzeitsimulation verwendete

---

<sup>7</sup> Um in den Simulationsdaten keine Flugbahnen zu haben, die innerhalb des Betrachtungsgebiets ohne Bezug beginnen oder enden, wurden Flüge, die in den ersten und letzten 15 min. des

Simulationslaufs landen bzw. starten, aus der Auswertung ausgeschlossen.

Flugzeugmodell einem entsprechenden Muster aus der Lärmdatenbank (ECAC / ANP bzw. AzB) zugeordnet.

Die grau markierten Felder in Tabelle 1 zeigen auf, wo dies nicht eindeutig möglich war. Konnte eine unmittelbare Zuordnung zu den Originaldatensätzen erfolgen, sind die Zellen grün markiert.

Die Ausgabedaten aus der Realzeitsimulation enthalten derzeit keine Informationen über die aktuelle Schubstärke der jeweiligen Flugbewegung. Diese ist aber für die Berechnung der Schallpegelwerte an den Immissionspunkten, vor allem für die Berechnung nach ECAC Doc 29 wenn keine Standardvertikalprofile Verwendung finden sollen, von besonderer Bedeutung. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde auf Basis des BADA-Totalenergiemodells ein Ansatz gewählt, um die fehlende Größe zu ermitteln. Mittels Gleichung 1, den Daten aus den Positionsberichten der Simulation und den dazugehörigen Datensätzen des BADA-Modells kann der zeitliche Verlauf des Schubs für die gesamte Trajektorie ermittelt werden, wie in Abb. 3 für einige Abflüge dargestellt.

Mit den zuvor beschriebenen Ansätzen, Zuordnungen und Ergänzungen wurden nun vollständige und individuelle Importdateien für die jeweilige Lärmprognosesoftware erstellt (AEDT Standard Input File (ASIF) auf xml Basis, 4D trajectories für IMPACT auf csv Basis, FANOMOS Format für CadnaA auf txt Basis)

| Flugzeugtyp laut |           |          | Noise ID ANP | AzB08 Klasse | Anzahl Starts | Anzahl Landungen |
|------------------|-----------|----------|--------------|--------------|---------------|------------------|
| Flugplan         | Simulator | ANP      |              |              |               |                  |
| A318             | A319      | A319-131 | V2522A       | S5.2         | 0             | 1                |
| A319             | A319      | A319-131 | V2522A       | S5.2         | 6             | 6                |
| A320             | A320      | A320-211 | CFM565       | S5.2         | 11            | 19               |
| A321             | A321      | A321-232 | V2530        | S5.2         | 5             | 8                |
| A332             | A332      | A330-301 | CF680E       | S6.1         | 1             | 0                |
| A343             | A343      | A340-211 | CF565C       | S6.3         | 1             | 2                |
| A346             | B752      | 757PW    | PW2037       | S5.2         | 0             | 2                |
| AT45             | AT43      | EMB120   | EPW118       | P2.1         | 0             | 2                |
| AT72             | AT72      | F10065   | TAY650       | P2.1         | 3             | 0                |
| B735             | B735      | 737500   | CFM563       | S5.2         | 0             | 3                |
| B736             | B738      | 737800   | CF567B       | S5.2         | 0             | 1                |
| B737             | B738      | 737800   | CF567B       | S5.2         | 0             | 2                |
| B738             | B738      | 737800   | CF567B       | S5.2         | 1             | 3                |
| B753             | B752      | 757PW    | PW2037       | S5.2         | 1             | 0                |
| B772             | B772      | 777200   | GE90         | S6.1         | 0             | 2                |
| B773             | B772      | 777200   | GE90         | S6.1         | 0             | 1                |
| C25A             | A310      | A310-304 | A310         | S6.1         | 0             | 1                |
| CRJ1             | CRJ1      | CL601    | CF34         | S5.1         | 0             | 1                |
| CRJ2             | CRJ1      | CL601    | CF34         | S5.1         | 0             | 1                |
| CRJ7             | B752      | 757PW    | PW2037       | S5.2         | 1             | 2                |
| CRJ9             | B752      | 757PW    | PW2037       | S5.2         | 2             | 8                |
| E170             | B734      | 737400   | CFM563       | S5.2         | 0             | 1                |
| E190             | B734      | 737400   | CFM563       | S5.2         | 4             | 7                |
| F2TH             | B752      | 757PW    | PW2037       | S5.2         | 1             | 0                |
| F50              | F50       | F10065   | TAY650       | P2.1         | 0             | 1                |
| LJ45             | B752      | 757PW    | PW2037       | S5.2         | 0             | 1                |
| RJ85             | RJ85      | BAE146   | AL502R       | S5.1         | 1             | 2                |
| SB20             | SB20      | F10065   | TAY650       | P2.1         | 3             | 5                |
|                  |           |          |              |              | 41            | 82               |

Tabelle 1: Zuordnungsübersicht der verwendeten Flugzeug- und Triebwerkstypen

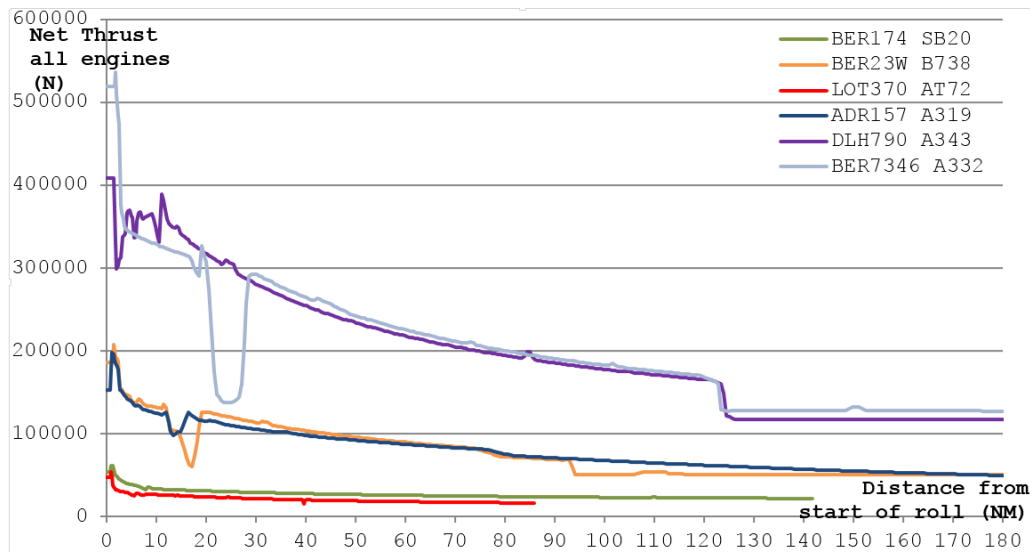


Abb. 3: Beispiele für berechnete Schubverläufe für Abflüge [1]

## 5. Vergleich und Beurteilung der ausgewählten Lärmsoftware

Anhand der Ergebnisse der im vorangegangenen Kapitel geschilderten Simulationen eines Beispielflughafens erfolgte die Bewertung der ausgewählten Lärmrechnungssoftware mithilfe von zwei Methoden.

### 5.1 Punktbewertung der Lärmprognosesoftware nach VDI 2225

In diesem Kapitel wird die Methode der Punktbewertung erläutert, die zur Beurteilung der Lärmprognosetools angewendet wurde. Als Ergebnis der Bewertung lässt sich eine Aussage über die Güte des Produktes treffen, die ein Maß für den Grad der Zielerreichung ist. Neben den intuitiven Bewertungsmethoden, wie z.B. dem Paarvergleich, die einen schnellen Überblick über schlecht einzuschätzende Lösungsvarianten geben können, gibt es die diskursiven Bewertungsmethoden. Bei diesen Methoden werden alle relevanten Bewertungskriterien einzeln betrachtet, entsprechend ihrer Bedeutung gewichtet und dann mit einem Wert aus einer einheitlichen Werteskala versehen. Eine weit verbreitete diskursive Bewertungsmethode, die durch die VDI Norm 2225 standardisiert wurde, ist die Punktbewertung. Hierbei wird der Gesamtnutzen eines Produkts als Summe aller seiner Teilnutzen gesehen. Die Punktbewertung besteht aus fünf Arbeitsschritten:

- Bewertungskriterien aufstellen und mit klar unterscheidbaren Wertebereichen bzw. Ausprägungen versehen
- Kriterien gewichten (Faktoren 0,5;1;2 möglich)
- Werteskala erarbeiten (0...unbefriedigend bis 4...sehr gut)
- Eigenschaften der Lösungsvarianten zusammenstellen und nach Werteskala beurteilen
- Gesamtwert bilden

Die Kriterien für die Bewertungsmatrix und deren Gewichtung basierend auf den Anforderungen an ein Tool zur Lärmprognose anhand von Simulationsdaten wurden in mehreren Workshops erarbeitet. Für jedes Kriterium wurde ein Wertebereich festgelegt. Quantifizierbare Kriterien wurden mit einem numerischen Wertebereich versehen. Einige „weiche“ Merkmale (z.B. „Akzeptanz der Software bei anderen Benutzern“) erhielten einen verbalen Wertebereich, um keine Objektivität bei subjektiven Merkmalen vorzutauschen. Insgesamt konnten 37 Bewertungskriterien erhoben werden, die in 7 Gruppen zusammengefasst wurden (s. Tabelle 2).

100 Punkte sind die maximal erreichbare Punktzahl. Tabelle 2 zeigt deutlich, dass der Schwerpunkt auf dem umgesetzten Lärmberechnungsmodell und der Berücksichtigung individueller Simulationsdaten liegt. Die getestete Software IMPACT, CadnaA und AEDT erreichen in der Gesamtzahl 64 bis 69 Punkte und damit ein vergleichbares Ergebnis im Mittelfeld. Betrachtet

man die einzelnen Kategorien, sind jedoch Aussagen über die Stärken und Schwächen der drei Tools möglich.

| Kriterium                                                                                                                | Maximum    | Gewichteter Punktwert |             |             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------------|-------------|-------------|
|                                                                                                                          |            | AEDT 2a               | CadnaA 4.2  | IMPACT 0.57 |
| <b>LÄRMMODELL</b>                                                                                                        | <b>35</b>  | <b>25,9</b>           | <b>22,3</b> | <b>26,3</b> |
| Unterstützung AzB 08                                                                                                     |            | 0                     | 3,2         | 0           |
| Unterstützung ECAC Doc. 29                                                                                               |            | 6,4                   | 1,6         | 6,4         |
| Unterstützung eines Geländemodells                                                                                       |            | 1,6                   | 1,6         | 0           |
| Verarbeitung individueller Schubprofile                                                                                  |            | 4,8                   | 0           | 4,8         |
| Verarbeitung individueller Höhenprofile                                                                                  |            | 4,8                   | 6,4         | 6,4         |
| Unterstützung der Beurteilungspegel $L_{den}$ und $L_{eq}$                                                               |            | 4,8                   | 6,4         | 6,4         |
| Erstellung individueller Beurteilungspegel mit frei wählbaren Bezugszeiträumen, Tag/Abend/Nacht-Zeiten und -Gewichtungen |            | 3,2                   | 3,2         | 2,4         |
| Anpassung der Flugplatzwetterbedingungen in der Lärm- und Flugleistungsrechnung                                          |            | 0,4                   | 0           | 0           |
| <b>DATENEINGABE</b>                                                                                                      | <b>10</b>  | <b>5,5</b>            | <b>9,0</b>  | <b>5,5</b>  |
| Dauer des Importvorgangs (Testszenario)                                                                                  |            | 0,5                   | 2,0         | 1,5         |
| Aufwand zur Erzeugung der Importdatei                                                                                    |            | 0                     | 1,0         | 2,0         |
| Einstellbarkeit des Immissionspunktrasters                                                                               |            | 3,0                   | 4,0         | 2,0         |
| Erstellen von Einzelrezeptoren                                                                                           |            | 2,0                   | 2,0         | 0           |
| <b>DATENAUSGABE</b>                                                                                                      | <b>15</b>  | <b>9,0</b>            | <b>7,5</b>  | <b>10,5</b> |
| Ausgabe des Konturflächeninhalts (km <sup>2</sup> )                                                                      |            | 3,0                   | 0           | 3,0         |
| Ausgabe des Schallpegels an einzelnen Immissionspunkten                                                                  |            | 3,0                   | 1,5         | 1,5         |
| Export als Shapefile                                                                                                     |            | 3,0                   | 3,0         | 3,0         |
| Export als KML                                                                                                           |            | 0                     | 3,0         | 3,0         |
| Export als Polygon                                                                                                       |            | 0                     | 0           | 0           |
| Export als GeoTIFF                                                                                                       |            | 0                     | 0           | 0           |
| <b>POSTPROCESSING INNERHALB DES TOOLS</b>                                                                                | <b>10</b>  | <b>5,6</b>            | <b>8,9</b>  | <b>2,2</b>  |
| Grafische Anzeige von Lärmkonturen (GUI)                                                                                 |            | 1,1                   | 4,4         | 2,2         |
| Vergleich von Lärmpegeln aus verschiedenen Szenarien                                                                     |            | 2,2                   | 2,2         | 0           |
| Bevölkerungsmodellierung möglich                                                                                         |            | 2,2                   | 2,2         | 0           |
| Lärm-Einwohner-Gleichwert (LEG)                                                                                          |            | 0                     | 0           | 0           |
| <b>BEDIENUNG</b>                                                                                                         | <b>15</b>  | <b>11,0</b>           | <b>8,8</b>  | <b>13,2</b> |
| Umgang mit der grafischen Benutzeroberfläche (GUI)                                                                       |            | 1,8                   | 0           | 3,5         |
| Rechendauer Testszenario auf Test-PC                                                                                     |            | 1,3                   | 1,3         | 1,8         |
| Anzeige der verbleibenden Rechenzeit                                                                                     |            | 0                     | 0,9         | 0,9         |
| Benötigte Arbeitszeit pro Szenario (ohne Rechen- und Importzeit)                                                         |            | 3,5                   | 3,5         | 3,5         |
| Skriptfähigkeit (Automatisierbarkeit der Auswertung)                                                                     |            | 0                     | 0           | 0           |
| Nutzung einer Lizenz an mehreren PCs gleichzeitig                                                                        |            | 0,9                   | 0           | 0,9         |
| Verteiltes Rechnen                                                                                                       |            | 0,9                   | 0,4         | 0,9         |
| Lokal speicherbare Konfiguration                                                                                         |            | 1,8                   | 1,8         | 1,8         |
| Automatisches Löschen von Szenarien                                                                                      |            | 0,9                   | 0,9         | 0           |
| <b>IMPLEMENTIERUNGSAUFWAND</b>                                                                                           | <b>5</b>   | <b>0,8</b>            | <b>1,7</b>  | <b>5,0</b>  |
| Geschätzter Aufwand für Integration in bestehende IT-Struktur (Anbindung TOSIM, AFS, AirTop)                             |            | 0                     | 1,7         | 3,3         |
| Schulungsaufwand für einen Benutzer                                                                                      |            | 0,8                   | 0           | 1,7         |
| <b>WARTUNG / NUTZBARKEIT</b>                                                                                             | <b>10</b>  | <b>6,7</b>            | <b>7,9</b>  | <b>5,8</b>  |
| Support (Qualität, Reaktionszeit, Erreichbarkeit, Bug Fixing usw.)                                                       |            | 1,7                   | 3,3         | 1,7         |
| Laufende Kosten pro Jahr                                                                                                 |            | 1,7                   | 0,4         | 1,7         |
| Akzeptanz der Software bei anderen Benutzern                                                                             |            | 1,7                   | 0,8         | 0,8         |
| Produktiv einsetzbare Programmversion                                                                                    |            | 1,7                   | 3,3         | 1,7         |
| <b>SUMME</b>                                                                                                             | <b>100</b> | <b>64,4</b>           | <b>66,1</b> | <b>68,5</b> |

Tabelle 2: Gewichtete Punkteverteilung [1]

Das amerikanische AEDT erreicht durch die Unterstützung von SAE AIR 1845 / ECAC Doc. 29 eine gute Bewertung in der Kategorie Lärmmodell. Darüber hinaus erfährt es als offizieller Nachfolger des weltweit verbreiteten Programms INM viel Beachtung und wird ab Version 2b das Standardtool für gleichzeitige Fluglärm- und Schadstoffemissionsrechnung in den USA sein. Die Akzeptanz und der Bekanntheitsgrad der Software werden bei den Nutzern daher als groß eingeschätzt. Die Dokumentation ist sehr ausführlich und der Zugang zum Support ist für Lizenzinhaber kostenlos. Als größter Nachteil von AEDT kann die komplizierte Import-Schnittstelle angesehen werden, was sich in der Bewertung der Dateneingabe und des Implementierungsaufwands widerspiegelt. Das Erzeugen und Einlesen der XML-Datei ist mit hohem Programmier- und Zeitaufwand verbunden. Zudem sind die grafische Anzeige der Lärmkonturen und die Bedienungssteuerung des Programms über eine grafische Benutzeroberfläche in der getesteten Version sehr eingeschränkt.

Die kommerzielle Software CadnaA existiert am längsten und kann als ausgereift bezeichnet werden. Zum Test stand die Version 4.2 zur Verfügung, die keine Unterstützung für ECAC Doc. 29 3rd Ed. mit einer Verknüpfung zu ANP bietet, was zu einem schlechten Ergebnis in der Kategorie Lärmmodell führte. Dafür kann CadnaA als einziges Tool nach AzB 08 rechnen. Die umfangreichen Funktionen der Software sind in den vielen Menüpunkten (da sehr viele Lärmquellen gerechnet werden können und es sich um kein reines Fluglärmprogramm handelt) schwer zu finden, was eine längere Einarbeitungszeit erforderlich macht. Dies führt zu einer schlechteren Bewertung im Vergleich in den Kategorien Bedienung, Implementierungs- und Schulungsaufwand. Auch bei der Datenausgabe schneidet CadnaA wegen mangelnder Exportfunktionen am schlechtesten ab. Die Vorteile des Tools liegen in der Dateneingabe und der Flexibilität der Konfiguration (viele Optionen und frei veränderbare Parameter z.B. die gleichzeitige Rechnung von Fluglärm mit unterschiedlichen Berechnungsvorschriften in der neuen Modellversion). Bei Wartung / Nutzbarkeit erzielte CadnaA trotz der entstehenden Kosten für einen Wartungsvertrag das beste Ergebnis, weil die Entwicklung der Software abgeschlossen und der sehr gute Support vertraglich garantiert ist.

Das kostenlose IMPACT profitiert vor allem durch die gute und verständliche Umsetzung der neuesten Lärmvorschrift auf europäischer Ebene (ECAC Doc. 29 3rd ed., ANP 2.0), die sehr einfache und logische Bedienung, die umfangreiche Datenausgabe und die

unkomplizierte Einflechtung in bestehende Strukturen der Simulatoren (v.a. im Hinblick auf die Transformation von Dateiformaten). In diesen vier Kategorien erhält es jeweils die höchste Punktzahl. Es wird deutlich, dass das Programm bereits in wesentlichen Bereichen für Flugsicherungsvorhaben im Rahmen von SESAR durch EUROCONTROL entwickelt wurde. Das Tool unterscheidet sich von den anderen Programmen insbesondere durch das browserbasierte Bedienungskonzept und die externe, sehr schnelle Berechnung auf einem Server von EUROCONTROL, woraus sich allerdings Fragen hinsichtlich des Datenschutzes ergeben. Die Schwächen von IMPACT liegen zum einen in der geringen Flexibilität bei der Wahl von Einstellparametern. Beurteilungspegel und Immissionspunkttraster sind nur sehr eingeschränkt anpassbar und die Darstellung der Ergebnisse ist kaum individualisierbar. Zum anderen gibt es keinen formellen Support durch die Entwickler. Für Benutzeranfragen steht lediglich ein Onlineforum für Fehlermeldungen zur Verfügung. Die Anfragen wurden zum Teil wochenlang nicht beantwortet, auch die ständige Erreichbarkeit des Servers kann nicht garantiert werden.

In der Kategorie Wartung / Nutzbarkeit, die besonders bei einer Operationalisierung der Tools im Rahmen der Auswertung von Simulationsdaten wichtig wird, erhält IMPACT deshalb die niedrigste Punktzahl.

Da es sich bei der Verbindung von ATM-Simulation und Lärmprognose zusammengefasst um ein sehr spezielles Anwendungsfeld handelt, kann keines der Tools alle Anforderungen und Kriterien wie oben beschrieben gleich gut erfüllen. Vielmehr ist auf Basis der vorgenommenen Untersuchung in dieser Phase keine eindeutige Entscheidung für ein Programm möglich, weitere Nachfolgearbeiten und Modifikationen, vor allem bei der Ergänzung und Qualität der Simulationsdaten sowie Genauigkeit und Zulässigkeit der Lärmergebnisse, sind somit notwendig. Schlussendlich muss vom Hauptkunden, also Auftraggeber der Simulation, auf Basis vorliegender Vorarbeiten eine Entscheidung für eine Prozesskette, auch über eine ggf. andere Gewichtung / Ergänzung der Bewertung, getroffen werden.

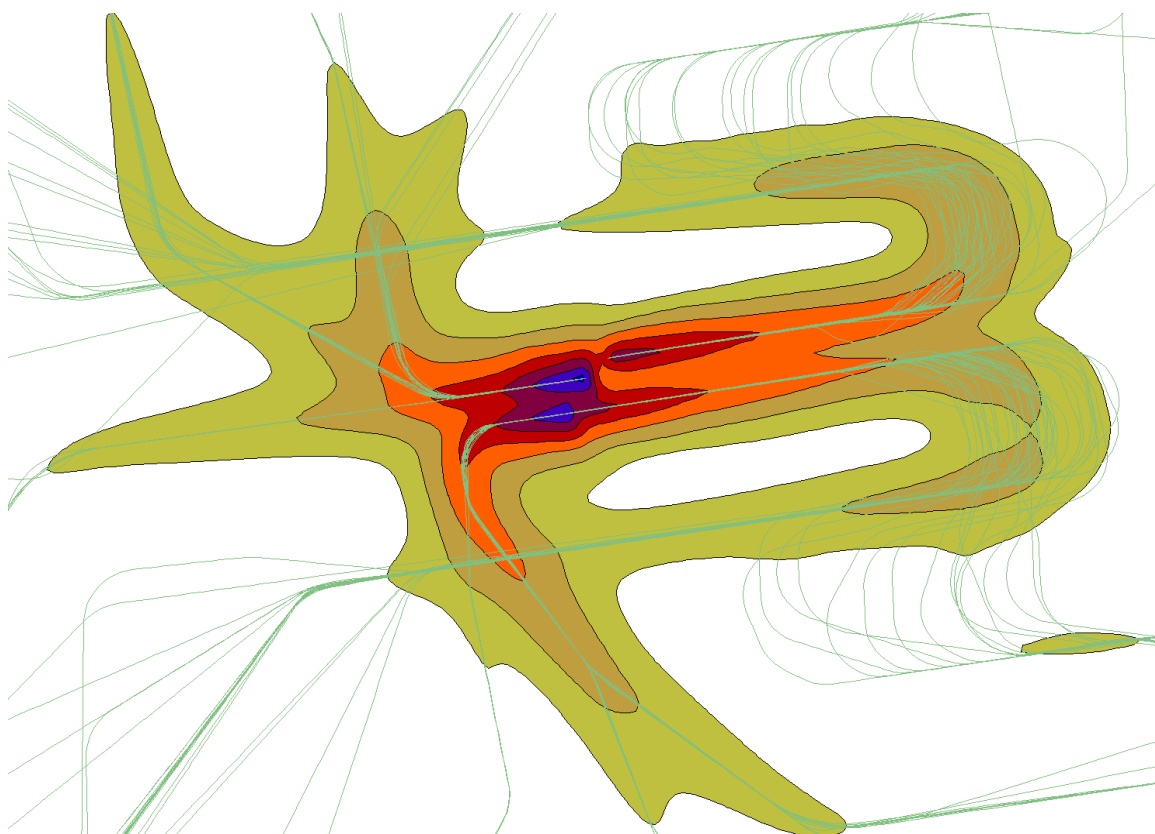


Abb. 4: Beispielhafte Darstellung der äquivalenten Dauerschallpegel durch Konturlinien. (Berechnung nach AzB); Konturlinien in 5 dB Schritten. Äußerste Konturlinie entspricht 45 dB.

## 5.2 Technische Bewertung anhand der Lärmkonturen

In diesem Kapitel werden neben der zuvor beschriebenen Punktbewertung die Flächen der berechneten Lärmkonturen der drei Lärmprognosetools auf Basis des Beispielszenarios (s. Kapitel 4) verglichen. Eine Verknüpfung mit Bevölkerungsdaten wurde nicht vorgenommen. Der Flottenmix, die Flugroutenverteilung, die Bezugszeit, die Beurteilungsgröße und das Immissionspunktraster sind aus Gründen der Vergleichbarkeit in allen Tools gleich gewählt worden. Bei dem Rezeptorgitter handelt es sich um ein quadratisches, flaches Raster auf Elevation des Flughafenbezugspunkts (d.h. ohne Höhenmodell) von 160 x 160 Rezeptoren mit einem Abstand von 0,25 NM zueinander. Dies ergibt ein Rechengebiet von 40 NM Kantenlänge und dem Flughafenbezugspunkt in der Mitte. Durch diese Festlegungen wurde gewährleistet, dass sich die größte darzustellende Kontur (45 dB) stets vollständig im Rechengebiet befindet und die Rechenzeit in akzeptablen Bereichen (< 1h) bleibt.

Abb. 4 zeigt als Beispiel die auf Basis des Programms CadnaA und der Vorschrift AzB 08 ermittelte Konturform

für den äquivalenten Dauerschallpegel  $L_{eq}$  ab 45 dB in 5 dB Intervallen mit einer Bezugszeit von 85 min. Die Lärmkonturergebnisse der anderen Tools IMPACT und AEDT sind zum Vergleich in [1] aufgeführt.

Die Konturen von CadnaA schließen aufgrund einer anderen Berechnungsvorschrift (AzB 08) und Modellierung der Flugspuren sowohl für den An- als auch den Abflugbereich eine deutlich größere Fläche ein. Diese Erkenntnisse konnten auch von Isermann abgeleitet werden [22]. Zwischen der Software CadnaA und den anderen beiden Tools ist nur ein grafischer Vergleich möglich, da keine Flächenresultate von CadnaA ausgegeben werden können. Aus diesem Grund enthält Tabelle 3 nur einen Vergleich der Flächengrößen für die Tools IMPACT und AEDT. Da beide nach der gleichen Berechnungsvorschrift rechnen (ECAC Doc 29 3rd. Ed.), sind die Konturen vor allem im Flughafennahbereich (s. Tabelle 3) sehr ähnlich [1].

Es fällt auf, dass trotz der gleichen Richtlinie beide Programme keine identischen Konturlinien berechnen, wie Tabelle 3 zeigt. Die größten Differenzen weisen die

äußersten Konturlinien in Flughafenferne auf. Dies ist überwiegend der unterschiedlichen (automatischen) Ergänzung von Trajektorienpunkten, vor allem in Startbahnnähe, und Systemgrenzendefinition ab dem Erreichen einer gewissen Flughöhe geschuldet. Das Vorgängermodell von AEDT, INM 7.0, galt bislang als wichtige Referenz in der Umsetzung des ECAC-Dokumentes, auch wenn es sich um ein FAA-Werkzeug handelt. Die aufgezeigten Unterschiede im wichtigen Vergleichsparameter Konturgröße unterstreichen die Bedeutung der Auswahl und vor allem der Umsetzung einer Lärmberechnungsvorschrift für die Interpretation und Kommunikation der erhaltenen Lärmergebnisse auf Basis von ATM-Simulationen. Vor einem simplen und voreiligem Größen- und Formenvergleich ohne weitere Anpassungen und Kommentierung der erhaltenen Lärmkonturen mit den offiziellen Lärmschutzbereichen um einen Flughafen wird daher neben den Gründen der Datenunterschiede (z.B. Bezugszeitraum, Routenbelegung, Verfahren) gewarnt. Das verbietet sich schon deshalb, da die Festlegung der Lärmschutzbereiche auf Basis einer exakten Rechenvorschrift (AzB) erfolgt, die praktisch keinen Gestaltungsspielraum zulässt. Aufgrund der Qualitätssicherung der Berechnungsprogramme nach AzB durch das UBA ist es unerheblich welche kommerzielle Software hierfür benutzt wird. Eine entsprechende Vorgehensweise ist für die ECAC-Empfehlung zur Berechnung von Fluglärm nach derzeitigem Kenntnisstand nicht etabliert.

## 6. Fazit

Prinzipiell zeigen die Analysen der getesteten Tools, dass eine Ergänzung von ATM-Realzeitsimulationen mit Lärmaussagen möglich und wissenschaftlich nach aktuellem Stand vertretbar ist. Durch Erkenntnisse im Frühstadium von Entwicklungen können zudem möglicherweise Kosten eingespart werden. Die Lärmtools weisen jedoch unterschiedliche Stärken und Schwächen auf, keine Software konnte daher vollumfänglich alle Anforderungen aus ATM-Sicht erfüllen. Die abgeleitete Bewertungsmatrix kam zu insgesamt vergleichbaren Resultaten zwischen den Tools. Mit der Methode der Punktbewertung wurde versucht, die Auswahl eines Lärmprognosetools zu objektivieren und bei einer Entscheidung nachprüfbar Parameter zugrunde zu legen. Trotz der umfangreichen Kriterienliste handelt es sich aufgrund der

| Beurteilungspegel (dB) | Fläche AEDT (km <sup>2</sup> ) | Fläche IMPACT (km <sup>2</sup> ) | Prozentualer Unterschied |
|------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| ≥45                    | 893,01                         | 649,51                           | -27,3                    |
| ≥50                    | 361,24                         | 284,84                           | -21,1                    |
| ≥55                    | 126,63                         | 102,94                           | -18,7                    |
| ≥60                    | 35,12                          | 32,38                            | -7,8                     |
| ≥65                    | 12,76                          | 13,08                            | 2,5                      |
| ≥70                    | 5,49                           | 5,26                             | -4,2                     |
| ≥75                    | 1,78                           | 1,84                             | 3,4                      |
| ≥80                    | 0,59                           | 0,54                             | -8,5                     |

Tabelle 3: Vergleich der Konturflächen [1], Fläche AEDT  $\pm$  100%

Weiterentwicklung der Tools und der subjektiven Gewichtung der Größen um eine Momentaufnahme.

Die Lärmergebnisse hängen stark von der Datenergänzung und der Art und Umsetzung der Berechnungsmethode ab. Durch unterschiedliche Interpretation der Gestaltungsspielräume (z.B. Systemgrenzen, Trajektorienergänzungen) bei den Berechnungsvorschriften gibt es bei den Lärmkonturen selbst bei der gleichen Rechenmethode leichte Abweichungen zwischen den Tools. Zum Zweck der Lärmbewertung von Flugbetriebsverfahren anhand von Simulationen ist die Methode ECAC Doc. 29 3rd ed. wegen der flexibleren Flugbahnmodellierung und der besseren Berücksichtigung von Simulationsdaten im Vorteil. Prinzipiell sind bei allen Programmen vernünftige Ergebnisse je nach Flughafengröße nur in einem Bereich von 20 – 40 km Umkreis zu erwarten. Es hat sich gezeigt, dass besonderes Augenmerk auf die Qualität der Trajektorien aus den Simulationen und die Datenergänzung gelegt werden muss. Eine valide Flugleistungsrechnung und nachvollziehbare Ausgangsdaten sind Voraussetzung für belastbare Fluglärmrechnungen, weitere Anpassungs- und Überprüfungsarbeiten sind daher notwendig.

## 7. Ausblick

Nach Abschluss weiterführender Untersuchungen soll geprüft werden, für welches Tool eine automatisierte Anbindung, zunächst an den Schnellzeitsimulator AirTop, erfolgen soll. Die Nutzung von Simulationsdaten für die Lärmbewertung stellt neue Anforderungen an die Genauigkeit und Ausgabe der Simulatoren. Mögliche

Verbesserungsmaßnahmen auf diesem Themenfeld wären die Verwendung des neuen BADA 4-Modells von EUROCONTROL bzw. von FMS-Daten von Flugzeugherstellern. Die umfangreicheren Datensätze erlauben eine genauere Modellierung des Flugzeugzustands und der Flugleistungen, was insbesondere für Schub, Kraftstoffverbrauch und Flugzeugkonfiguration notwendig ist. Des Weiteren wird eine Anpassung und Abstimmung der Datenvorbereitung und -eigabe für die ATM-Simulationen schon im Vorfeld, zum Teil mit den Simulatorherstellern und im Hinblick auf eine Fluglärmrechnung vorgeschlagen. Insbesondere die Masseneingabe sowie die Flugzeugtypen- und Triebwerkszuordnung zu den Lärmdatenbanken, vor allem für nicht direkt von BADA unterstützte Flugzeuge, ist überarbeitungswürdig. Eine Verifizierung der Lärmkonturen mithilfe realer Lärmmessungen wurde nicht durchgeführt. Auch dies kann ein Forschungsfeld der Zukunft sein, wenn Flugverlaufsdaten oder realitätsnahe Simulationsdaten als Basis für Lärmberechnungen dienen und die Ergebnisse anschließend mit Resultaten aus stationären oder mobilen Lärmmessstellen verglichen werden.

Weitere Unterstützungsleistung kann darüber hinaus im Bereich der Flugroutenoptimierung zur Verfügung gestellt werden, wenn verlässliche Methoden und Daten zur Lärmbewertung, Bevölkerungsverteilung und Dosis-Wirkungsbeziehungen für Lärmwirkungen vorliegen.

## Referenzen

[1] Lukas Sapok, Bewertung von Fluglärmprognosetools unter Verwendung von ATM-Simulationsdaten, Masterarbeit, TU Darmstadt, 03.02.2014

[2] Stefan Schwanke, Annabelle Schuppe, Thomas Groth, Berechnung von Schadstoffemissionen in Flughafennähe unter Verwendung von Simulationsdaten, TE im Fokus 1/2012

[3] Institut für Flugführung, TU Braunschweig: Emissionsbewertungsmöglichkeiten M9-1, 2012

[4] Stefan Schicktan, Stefan Tenoort, Auswertungsmöglichkeiten von Simulatoreaufzeichnungen, TE im Fokus 1/2008

[5] ICAO: Guidance on the Balanced Approach to Aircraft Noise Management (Doc 9829), 2004

[6] Luftverkehrsgesetz vom 1. August 1922 (RGBl. 1922 I S. 681), das durch Artikel 2 Absatz 175 des Gesetzes vom 7. August 2013 (BGBl. I S. 3154) geändert worden ist

[7] EU, The Performance Scheme (Commission Regulation (EU) N° 691/2010) and the adoption by the European Commission

of the EU-wide performance targets for the reference period 2012-2014 (Commission Decision of 22-02-2011)

[8] European Civil Aviation Conference: ECAC/CEAC Doc. 29, 3rd Edition, Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports, 2005

[9] Eurocontrol Experimental Centre: User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.11, 2013

[10] Eurocontrol Experimental Centre: Coverage of 2012 European Air Traffic for the Base of Aircraft Data (BADA) - Revision 3.11, 2013

[11] Suchkov, Alexander / Swierstra, Sip / Nuic, Angela: Aircraft Performance Modeling for Air Traffic Management Applications

[12] Society of Automotive Engineers: SAE AIR 1845 – Procedure for the Calculation of Airplane Noise in the Vicinity of Airports, 1986

[13] Binder, Uta: Untersuchung des Einflusses realer atmosphärischer Bedingungen auf die Ausbreitung von Fluglärm, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Göttingen 2008

[14] ICAO: Recommended Method for Computing Noise Contours Around Airports (Doc 9911), 2008

[15] ICAO: Recommended Method for Computing Noise Contours Around Airports (Circular 205)

[16] Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm, 2002

[17] ISO 1996-2: Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Determination of environmental noise levels (2007)

[18] Kephelopoulou, Stylianos / Paviotti, Marco / Anfossol-Lédée, Fabienne: Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU), 2012

[19] Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm in der Fassung der Bekanntmachung vom 31. Oktober 2007 (BGBl. I S. 2550)

[20] Verordnung über die Datenerfassung und das Berechnungsverfahren für die Festsetzung von Lärmschutzbereichen vom 27. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2980)

[21] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Bekanntmachung der Anleitung zur Datenerfassung über den Flugbetrieb (AzD) und der Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen (AzB), 2008

[22] Isermann, Ulrich: Bewertung und Berechnung von Fluglärm, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Göttingen 2000

[23] Leder, Joachim: Ein Verfahren zur Optimierung dreidimensionaler Flugtrajektorien im Hinblick auf eine minimale Fluglärmbelastung, Darmstadt 1998

[24] FAA, Aviation Environmental Design Tool (AEDT) 2a Service Pack 1 User Guide, June 2012

[25] DataKustik, CadnaA Berechnung von Fluglärm, Greifenberg, 2010

[26] EUROCONTROL, IMPACT User guide, Bretigny 2013

[27] Calders, Patrick, GAME-Model, EUROCONTROL Document, December 2000

[28] Isermann, Ullrich; Vogelsang, Berthold: Two best-practice European aircraft noise prediction models, Noise Control Eng. J. 58(4), July-Aug. 2010

## DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei Herrn Sascha Wichmann für die Unterstützung und umfangreiche Kommentierung des Artikels.

## Abkürzungsverzeichnis

|            |                                                    |
|------------|----------------------------------------------------|
| AEDT       | Aviation Environmental Design Tool                 |
| ANP        | Aircraft Noise Performance                         |
| APU        | Auxiliary Power Unit                               |
| ASCII      | American Standard Code for Information Interchange |
| ASIF       | AEDT Standard Input File                           |
| ATM        | Air Traffic Management                             |
| AzB        | Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen   |
| AzD        | Anleitung zur Datenerfassung über den Flugbetrieb  |
| BADA       | Base of Aircraft Data                              |
| BAF        | Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung               |
| CadnaA     | Computer Aided Noise Abatement                     |
| CNOSSOS-EU | Common Noise Assessment Methods in Europe          |
| CPA        | Closest Point of Approach                          |
| DFS        | Deutsche Flugsicherung GmbH                        |
| DLR        | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt          |
| ECAC       | European Civil Aviation Conference                 |

|          |                                                   |
|----------|---------------------------------------------------|
| EMPA     | Eidgenössische Materialprüfungsanstalt            |
| EU       | Europäische Union                                 |
| FAA      | Federal Aviation Administration                   |
| FANOMOS  | Flight Track and Aircraft Noise Monitoring System |
| FluLärmG | Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm                  |
| FMS      | Flight Management System                          |
| ICAO     | International Civil Aviation Organization         |
| INM      | Integrated Noise Model                            |
| ISA      | International Standard Atmosphere                 |
| LuFo     | Luftfahrtforschung                                |
| NM       | Nautische Meilen                                  |
| OPF      | Operation Performance File                        |
| SAE      | Society of Automotive Engineers                   |
| SES      | Single European Sky                               |
| TU       | Technische Universität                            |
| UBA      | Umweltbundesamt                                   |

## Innovation im Fokus Informationen zu Forschung, Entwicklung und Validierung

*Innovation im Fokus* erscheint halbjährlich und beschäftigt sich bevorzugt mit Informationen zu Forschung, Entwicklung und Validierung mit Beteiligung der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH. Diese Ausgabe ist elektronisch im Internet ([www.dfs.de](http://www.dfs.de) > [Flugsicherung](#) > [F&E](#) > [Servicebereich](#)) sowie über das DFS Intranet verfügbar. 50 Exemplare werden in gedruckter Form aufgelegt.

Wie auch der Vorgänger-Zeitschrift „TE im Fokus“ wurde dieser Zeitschrift von der Deutschen Bibliothek eine ISSN (International Standard Serial Number) zugeteilt:

**Printversion: ISSN 2198-8951** (vormals: 1861-6364)

**Internet-Version: ISSN 2198-896X** (vormals: 1861-6372)

**Datum dieser Ausgabe:** 17.06.2014

### DISCLAIMER

Alle hier erwähnten Warenzeichen sind Eigentum ihrer jeweiligen Besitzer. Warenzeichen werden nicht ausdrücklich als solche gekennzeichnet. Aus dem Fehlen von Urheber- oder Markenrechtskennzeichen darf jedoch nicht geschlossen werden, dass es sich um einen nicht geschützten Namen oder um eine nicht geschützte Marke handelt.

### COPYRIGHT

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH unzulässig und wird zivil- und strafrechtlich verfolgt. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Copyright © 2014 by DFS Deutsche Flugsicherung GmbH - Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlage, Verwertung und Mitteilung ihres Inhalts nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugestanden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadensersatz. Alle Rechte vorbehalten, insbesondere für den Fall der Patenterteilung oder GM-Eintrag.



## Impressum

Innovation im Fokus

Informationen zu Forschung,  
Entwicklung und Validierung

Herausgeber:

DFS Deutsche Flugsicherung GmbH

Günther Achatz, Ralf Bertsch,  
Bereichsleitung Planung & Innovation;  
Dr. Volker Heil, Seniorberater  
Forschung, Entwicklung und  
Innovation

Redaktion:

Dr. Andreas Herber  
Tel. +49 (0)6103 707 5781  
E-Mail: [andreas.herber@dfs.de](mailto:andreas.herber@dfs.de)

Stefan Tenoort  
Tel. +49 (0)6103 707 5769  
E-Mail: [stefan.tenoort@dfs.de](mailto:stefan.tenoort@dfs.de)

Oliver Haßa  
Tel. +49 (0)6103 707 5762  
E-Mail: [oliver.hassa@dfs.de](mailto:oliver.hassa@dfs.de)

Anschrift der Redaktion:

DFS Deutsche Flugsicherung GmbH  
Redaktion Innovation im Fokus  
Am DFS-Campus 5  
63225 Langen  
E-Mail: [forschung@dfs.de](mailto:forschung@dfs.de)

Nachdruck nur mit Genehmigung.

