

## HETEREX

# VERBUNDVORHABEN<sup>1</sup> HETEROGENER KOMPLEXER FLUGVERKEHR

A. Kanstein, O. Kalden, J. Frischmann, F. Schmidt-Brücken, F. Zimmermann  
VEGA Space GmbH, Europaplatz 5, 64293 Darmstadt

### Zusammenfassung

Das Verbundvorhaben Heterogener komplexer Flugverkehr (HETEREX) verfolgt das Ziel, eine Steigerung der vorhandenen Kapazität im Luftverkehr durch die effizientere Luftraumnutzung bei verbesserter Umweltverträglichkeit und erhöhter Sicherheit durch die Entwicklung einführungsreifer, innovativer Verfahren auf Basis neuer Technologien an Bord der Flugzeuge und bei der raum- und bodengestützten Kommunikations-, Navigations- und Ortungsinfrastruktur (CNS-Infrastruktur) zu erreichen.

Über einen Zeitraum von drei Jahren wird der Verbund aus VEGA Space GmbH, DFS Deutsche Flugsicherung GmbH, dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Funkwerk Avionics GmbH, Jeppesen GmbH, Northrop Grumman LITEF GmbH sowie Thales Air Systems GmbH auf der Basis heute verfügbarer beziehungsweise bald verfügbarer Technologien Strategien und Vorgehensweisen für eine bessere Luftraumnutzung entwickeln.

Ein Schwerpunkt der bisherigen Aktivitäten im Verbund wurde auf die Definition von An- und Abflugverfahren sowie die Entwicklung von Konzepten gelegt, mit dem Ziel die luftseitige Flughafenkapazität zu steigern bei gleichzeitiger Reduzierung der durch den Flugbetrieb verursachten Emissionen. Zur Verbesserung der Umsetzbarkeit und der Messbarkeit der Ergebnisse wurden konkrete Anwendungsfälle definiert. Der vorliegende Beitrag beschreibt die Vorgehensweise des Verbundvorhabens HETEREX.

## 1. EINLEITUNG

In den letzten zwei Jahrzehnten hat sich der nach Instrumentenflug-Regeln durchgeführte Luftverkehr, das heißt der von Fluglotsen kontrollierte Luftverkehr, sehr stark entwickelt: waren es 1990 noch 5 Millionen Flüge in Europa, so wurden 2010 schon 9,5 Millionen Flüge durchgeführt. Allerdings werden nun Grenzen spürbar. Einschränkend auf das Wachstum wirkt nicht nur die nur langsam wachsende Kapazität an den größeren Flughäfen, sondern auch die Kapazität in der Luft. Zudem ist der Luftverkehr durch die hohe Auslastung sehr empfindlich gegenüber Betriebsstörungen.

Kapazitätsengpässe schlagen sich messbar in Verspätungen nieder. So haben die kapazitätsbedingten Verspätungen von weniger als einer Minute 2003 stetig auf fast zwei Minuten pro Flug zugenommen, mit Ausnahme des verkehrsarmen Jahres 2009 (BILD 1). Die im BILD 1 dargestellte Verbesserung vor 2003 wurde im Wesentlichen durch die Reduzierung der vertikalen Routenabstände erreicht (RVSM – reduced vertical separation minima).

Eine weitere negative Folge von Kapazitätsbeschränkungen sind längere Flugstrecken. Die durchschnittliche Flugstreckenverlängerung liegt trotz Bemühungen, diese zu verringern, seit 2005 bei etwa 50km [1]. Mit der Steigerung des Luftverkehrs wächst die Besorgnis über die damit einhergehenden Emissionen und deren negativen

Folgen: nicht nur die der CO<sub>2</sub>-Emissionen, sondern auch des Lärms entlang der Ab- und Anflugstrecken der Flughäfen.

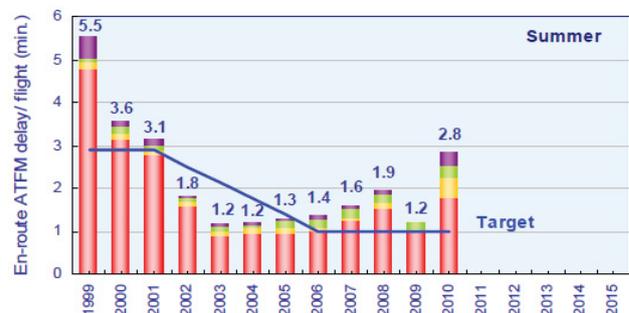


BILD 1. Durch das Luftverkehrsmanagement verursachte durchschnittliche Verspätung [1]. Der durch Kapazitätsbeschränkungen verursachte Beitrag ist in rot wiedergegeben.

Aufgrund dieser Entwicklung hat die europäische Kommission 2005 die folgenden Ziele für die als Single European Sky bezeichnete Entwicklung des europäischen Luftverkehrssystems festgelegt. Bis 2020 soll folgendes erreicht werden [2]:

- Eine Verdreifachung der Kapazität, die Verspätungen in der Luft und am Boden reduziert.
- Eine Verzehnfachung der Sicherheit.
- Eine 10%-ige Verringerung der durch Flüge verursachten Umwelteinflüsse.

<sup>1</sup> Das Verbundvorhaben HETEREX wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie durch den Projektträger Luftfahrt des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. unter dem Förderkennzeichen 20V0901A gefördert.

- Eine Verringerung der den Luftraumnutzern durch das Luftverkehrsmanagement entstehenden (Stück-) Kosten um mindestens 50%.

Ähnliche Ziele verfolgt das amerikanische NextGen-Programm [3].

Technologien und Verfahren, die diese Verbesserung des Luftverkehrsmanagements unterstützen sollen, liegen insbesondere im Bereich der satellitengestützten Navigation und einer deutlich verbesserten Koordination bei der Flugverkehrsplanung und -Durchführung. Die Vision orientiert sich an einer 4D-Flugbahn, das heißt, einer koordinierten Planung des gesamten Flugverlaufes einschließlich der Zeitkomponente. Zudem soll die Verantwortung für das Einhalten der Flugbahn und der Sicherheitsabstände stärker auf das Flugzeug verlagert werden.

Um entsprechende Verfahren in Deutschland vorzubereiten wurde 2010 mit dem Forschungsvorhaben HETEREX begonnen. HETEREX steht für heterogener, komplexer Flugverkehr. Heterogenität im Luftverkehr ergibt sich durch die Nutzung des Luftraums und der Flugplätze nicht nur durch den kommerziellen, sondern auch - durch die Allgemeine Luftfahrt und durch unterschiedliche Ausrüstungsgrade. Die Berücksichtigung dieser Komponente spielt bei HETEREX eine große Rolle.

Das Vorhaben konzentriert sich vor allem auf die folgenden Verfahren:

- Landung mit GBAS
- Gekurvte Anflüge und Abflüge mit RNP-AR
- Sektorloses Fliegen
- Emissionsmindernde vertikale Profile beim An- und Abflug (CDA und CCD)

Die Entwicklung neuer Verfahren erfordert die Zusammenarbeit mehrerer Partner, um alle relevanten Aspekte frühzeitig einzubeziehen: die Sicherheit, die Umwelteinflüsse, menschliche Faktoren, die Wirtschaftlichkeit und die Entwicklung von Standards und Regularien. Zudem soll der Betrachtung der Leistungsfähigkeit bei der Verfahrensentwicklung eine stärkere Rolle zukommen. ICAO spricht in diesem Zusammenhang von einem leistungs-basierten Ansatz (Performance Based Approach)[4]. Das Ziel ist zulassungsreife Verfahren und Technologien zu entwickeln, bewertet nach deren Nutzen und Reife. Demnach fällt der Validierung eine stärkere Rolle zu.

Das folgende Kapitel 2 stellt die Struktur des Verbundvorhabens vor. Kapitel 3 beschreibt die Anwendungsfälle, und Kapitel 4 die qualitative Mehrwertanalyse der Verfahren bezogen auf diese Anwendungsfälle. Kapitel 5 erläutert exemplarisch die GBAS Technologie und gibt eine Übersicht aktueller Problemstellungen. Kapitel 6 beschreibt die Validierungsmethodik und Kapitel 7 schließt diesen Artikel mit einer Zusammenfassung.

## 2. DAS VERBUNDVORHABEN HETEREX

Eine Steigerung der vorhandenen Kapazität im Luftverkehr durch die effizientere Luftraumnutzung bei verbesserter Umweltverträglichkeit und erhöhter Sicherheit ist das maßgebliche Ziel, das im Verbundvorhaben Heterogener komplexer Luftverkehr (HETEREX) verfolgt wird. Die Definition von HETEREX folgt der Erkenntnis, dass innovative Beiträge für eine wirtschaftliche und technische

Verbesserung des Luftverkehrs nur im Rahmen einer multidisziplinären Betrachtung und Optimierung des Systems Luftverkehr insgesamt zu realisieren sind.

Über einen Zeitraum von drei Jahren wird der Verbund aus VEGA Space GmbH, DFS Deutsche Flugsicherung GmbH, dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Funkwerk Avionics GmbH, Jeppesen GmbH, Northrop Grumman LITEF GmbH sowie Thales Air Systems GmbH auf der Basis heute verfügbarer beziehungsweise bald verfügbarer Technologien Strategien und Vorgehensweisen für eine bessere Luftraumnutzung entwickeln, unter anderem durch effizientere und umweltfreundlichere Anflüge und Abflüge. Diese werden für besonders belastete deutsche Lufträume hinsichtlich technisch-betrieblicher Machbarkeit und einer Quantifizierung der zu erwartenden Vorteile bewertet und in Flugversuchen erprobt.

Die Struktur von HETEREX ist im BILD 2 verdeutlicht. Den Kern bilden neue Technologien für die Avionik und die CNS-Infrastruktur. Darauf aufbauend werden neue Verfahren entwickelt, und die Validierung stellt anschließend die Beziehung zu den Zielen von HETEREX her. Alle Komponenten zusammen definieren das Verbundvorhaben.

Heterogenität spielt bei verschiedenen Komponenten eine Rolle: Die stärkere Integration von Systemen der Avionik machen Verfahren anwendbar auch für den nichtkommerziellen Luftverkehr und einige Verfahrensentwicklungen adressieren direkt oder indirekt die Problematik eines heterogenen Verkehrsmixes.

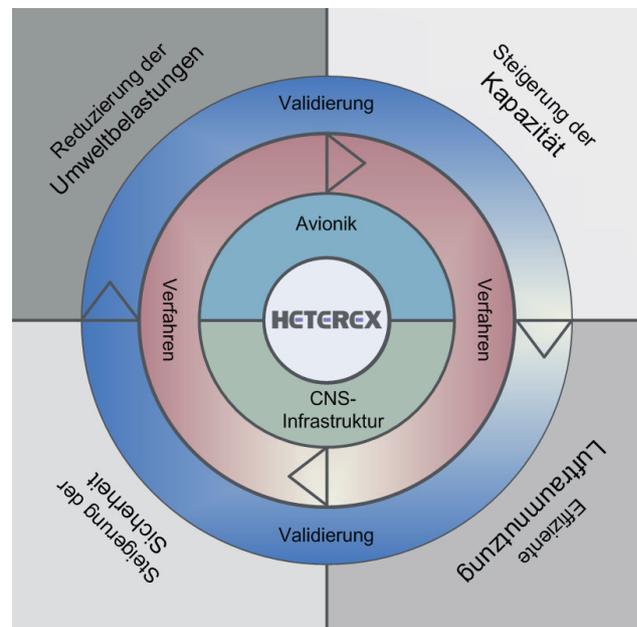


BILD 2. Übersicht der Ziele im Verbundvorhaben HETEREX.

Über den Verbund hinaus wurde ein Anwenderforum mit Vertretern von Flugsicherung, Flughäfen, Luftraumnutzern und Aufsichts-/Genehmigungsbehörden eingerichtet, um eine möglichst breite informelle Abstimmung über die Anforderungen und Ergebnisse des Verbundvorhabens zu erreichen und so die Einführungsreife der untersuchten Verfahren zusätzlich abzusichern.

Schwerpunkte der bisherigen Aktivitäten im Verbund war der Entwurf von An- und Abflugverfahren sowie die Entwicklung von Konzepten, mit dem Ziel, die luftseitige Flughafenkapazität zu steigern bei gleichzeitiger Reduzierung der Lärmbelastung für Flughafenanwohner. Hierfür wurden konkrete Anwendungsfälle definiert, an denen der Mehrwert der vorgeschlagenen Verfahren gezeigt werden kann. Parallel dazu werden Technologien weiter entwickelt, die als Unterstützungssysteme eingesetzt werden können. Aktuell befindet sich die Validierung auf Gesamtsystemebene in Planung. Bei der Gesamtsystemvalidierung werden Teilergebnisse zusammengeführt und das Zusammenspiel der einzelnen Elemente betrachtet.

### 3. ANWENDUNGSFÄLLE<sup>[5]</sup>

Im Verbundvorhaben HETEREX werden sowohl im Bereich CNS (Communication, Navigation, Surveillance) als auch im Bereich der Avionik neue Technologien entwickelt, mit deren Hilfe die Navigationsgenauigkeit und die Verlässlichkeit der Navigation verbessert werden kann. Diese Verbesserungen ermöglichen die Nutzung neuer betrieblicher Verfahren und versprechen Verbesserungen wie z. B. Lärm- und Treibstoffreduzierung sowie eine Steigerung der Kapazität und Sicherheit. Für die realistische und anwendungsorientierte Nutzenanalyse und Validierung wurden im Projekt HETEREX Anwendungsfälle für typische und repräsentative ATM Problemstellungen definiert. Im Folgenden werden diese Anwendungsfälle kurz beschrieben, die einige der in HETEREX entwickelten Verfahren und Technologien abdecken.

#### 3.1. Anwendungsfall München

Wetterereignisse stellen einen bedeutenden Einfluss für die Betriebsabläufe an Flughäfen dar. Neben Schneefall, der besondere Anforderungen an die Flughafeninfrastruktur stellt, oder Beeinträchtigungen durch Starkwinde, spielen die Sichtbedingungen eine entscheidende Rolle.

Der Flughafen München weist wegen seiner lokalen Nähe zum Erdinger Moos einen erhöhten Anteil nebelbedingter Schlechtwetterbedingungen auf (BILD 3). Auch wenn die Nebelereignisse vorwiegend in den Morgenstunden auftreten, sind die daraus entstehenden Konsequenzen im gesamten weiteren Tagesverlauf spürbar.

- Niederschlagsfrei
- Sprühregen
- Nebelphänomene
- Flughafennähe
- leichter Regen
- feuchter Dunst
- Gewitter
- Regen
- Schnee
- Rest (z.B. Rauch)

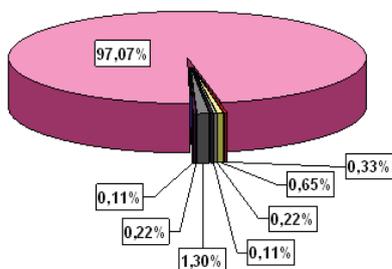


BILD 3. Niederschlagsarten und -anteile unter Cat II/III in Sommerreckwertperioden (05:00 bis 23:00 MEZ, Zeitraum 1998 - 2010, MUC)[5]

Aus diesem Grund eignet sich der Flughafen München besonders als Anwendungsfall für Untersuchungen unter Cat II/III Bedingungen, zumal er die technische Ausstattung und Zulassung für den Allwetterflugbetrieb der Betriebsstufe Cat III b besitzt.

Der Flughafen verfügt über zwei voneinander unabhängige Start- und Landebahnen (Nord und Süd), die Richtung 08/26 verlaufen. Aufgrund von Kapazitätsengpässen des bestehenden Bahnsystems ist der Bau einer dritten Start- und Landebahn geplant, die einen unabhängigen und parallelen Betrieb zu den beiden bestehenden Bahnen gewährleisten soll. Die neue Nordbahn wird die Bezeichnung 08L/26R erhalten, die dann in der Mitte liegende Bahn wird in 08C/26C umbenannt werden.

Im Anwendungsfall München wird untersucht, ob sich die Nutzung von GBAS Anflügen unter Cat II/III Bedingungen und der damit verbundene Wegfall der ILS-Schutzzonen positiv auf die Flughafenkapazität auswirkt, wenn die Anflugstaffelung der für GBAS ausgerüsteten Luftfahrzeuge reduziert wird. Bei Betrieb mit GBAS wird angenommen, dass entsprechend ausgerüstete Luftfahrzeuge von einer Verletzung der ILS-Schutzzonen nicht betroffen sind und dass die einzuhaltende Staffelung bei einem nachfolgenden mit GBAS ausgerüsteten Luftfahrzeug um 2 NM verringert werden kann.

Die Untersuchungen im Projekt HETEREX fokussieren dabei auf das Start- und Landebahnsystem, die unmittelbaren Auf- und Abrollwege sowie den angrenzenden Luftraum. Ziel ist es, eine effiziente Anflugstaffelung zu finden. Dabei wird der Flughafen München in einer Schnellzeitsimulation als 2-Bahn-System abgebildet und die Betriebsrichtung 26 simuliert, da dies mit über 60% der Betriebszeit die Hauptlanderichtung darstellt. Als Grundlage werden Verkehrsdaten eines typischen Cat-II/III-Sommertags mit Nebel während der morgendlichen Verkehrsspitze verwendet (BILD 4).

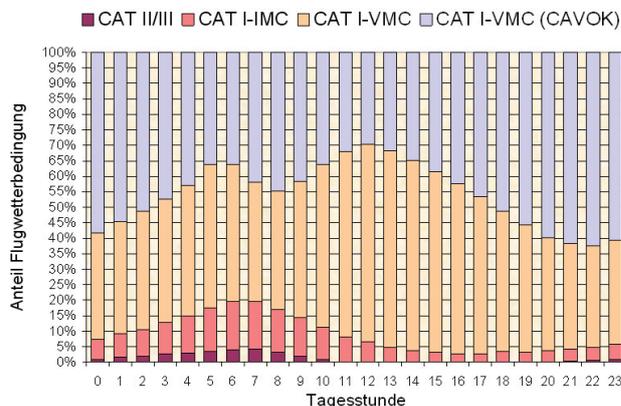


BILD 4. Flugwetteranteile im Tagesverlauf der Sommerreckwertperioden 1998 – 2010 am Flughafen München [7]<sup>2</sup>

Durch die Reduzierung des Stafflabstandes bei der Verwendung von GBAS Anflügen wird ein messbarer Nutzen unter Cat-II/III-Bedingungen erwartet. Die Messgröße für die Bewertung stellt die Verspätung und damit die Kapazitätswirksamkeit der Verwendung von GBAS-Anflügen dar.

<sup>2</sup> IMC/VMC: Instrument/Visual Meteorological Conditions, CAVOK: Clouds And Visibility OK (besser als bei VMC)

Eine Erhöhung der Kapazität lässt sich dabei durch eine Verringerung der Verspätungen in den Cat-II/III-Zeiträumen und den daraus resultierenden Folgeverspätungen im Tagesverlauf erwarten. Um den Kapazitätsgewinn quantifizieren zu können, werden luftfahrzeugseitige GBAS-Ausrüstungsgrade zwischen 0% und 50% untersucht.

### 3.2. Anwendungsfall Frankfurt

Der Anwendungsfall Frankfurt besteht aus drei voneinander unabhängigen Fragestellungen. Hierfür werden die Start- und Landebahnen der Flughäfen Frankfurt/Main Betriebsrichtung 25 (West) und Flugplatz Egelsbach sowie die komplette Luftraumstruktur des Nahverkehrsgebietes inklusive aller An- und Abflugverfahren in der Schnellzeitsimulation betrachtet. Zur realistischen Gestaltung der betrieblichen Bedingungen für den Ein- und Ausflug in/aus diesem Gebiet wird ein größeres Simulationsgebiet eingerichtet. Im Simulationsszenario und im folgenden Text wird die neue Bahn mit 25R und die derzeitige Bahn 25R mit 25C bezeichnet.

Als Grundlage für die Betrachtungen werden die Daten eines verkehrsreichen Tages verwendet, die vom Lage und Informationszentrum der DFS aufgezeichnet wurden. Die Anflüge Egelsbach, welche sich im Verkehrsbeispiel befinden, werden gegebenenfalls vervielfältigt, um Szenarien mit unterschiedlichem Bedarf zu simulieren.

#### Reduktion der Anflugstaffelung Cat II/III Betrieb

Am Flughafen Frankfurt besteht das Problem, dass der koordinierte Eckwert des Flughafens über der Kapazität des Flughafens bei eingeschränkten Sichtbedingungen liegt. Daraus entstehen hohe Verzögerungswerte beim Betrieb des Flughafens unter Cat II/III Bedingungen. Ein Teil der Kapazitätseinschränkung resultiert aus Vorgaben zur Freihaltung der ILS-Schutzzonen von Kurs- und Gleitwegsendern, welche im Cat II/III Betrieb notwendig sind.

Ferner wird am Flughafen Frankfurt (3-Bahnssystem) die Bahn 18 für Abflüge und das Parallelbahnsystem für Anflüge genutzt. Sollte die Bahn 18 aufgrund der Windrichtung nicht nutzbar sein, so werden Starts auf der 25C (derzeitige Nordbahn) und Landungen auf der 25L (Südbahn) abgewickelt. Die Nutzung des Taxiways zwischen dem Parallelbahnsystem oder ein Runway Crossing einer aktiven Bahn ist bei Cat II/III Betrieb nicht gestattet.

Die Reduktion der Kapazität des Flughafens bei Cat II/III Betrieb resultiert zum einen daraus, dass keine Abflüge mehr auf dem abhängigen Parallelbahnsystem durchgeführt werden, zum anderen aus einer Erhöhung der Anflugstaffelung von 2,5NM staggered (versetzt, BILD 5), auf etwa 3,5NM staggered. Damit erhöht sich die Anflugstaffelung auf derselben Runway von etwa 5NM auf etwa 7NM. Bei Nutzung von GBAS wird hier eine Reduktion der Anflugstaffelung zwischen zwei landenden Luftfahrzeugen erwartet.

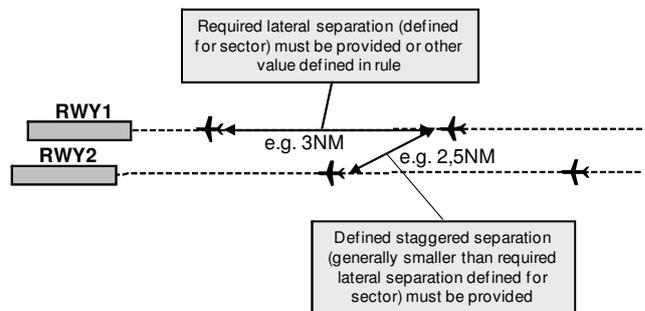


BILD 5. Beispiel für eine versetzte (staggered) Anflugstaffelung bei einem abhängigen Parallelbahnsystem [5]

Im Vorhaben HETEREX werden Lösungsansätze durch Einsatz von GBAS untersucht. Die Bewertung des Nutzens erfolgt über die Messung des Durchsatzes auf dem Runwaysystem und einer Auswertung der verschiedenen Verzögerungsarten, sowohl an- als auch abflugseitig.

#### Abhängigkeit der Abflüge von RWY18 und 25C bei Nutzung der Südumfliegung

Der zweite Teil der Untersuchung, soll die Frage beantworten, ob es möglich ist, RNP AR Abflüge von der Bahn 25C, die die sogenannte Südumfliegung nutzen, und beliebige Abflüge von der Bahn 18 unabhängig voneinander durchzuführen und welchen Nutzen in Form von reduzierten Verzögerungswerten dies bringen würde. Die Abhängigkeit der Bahnen 25C und 18 sind im BILD 6 schematisch dargestellt.

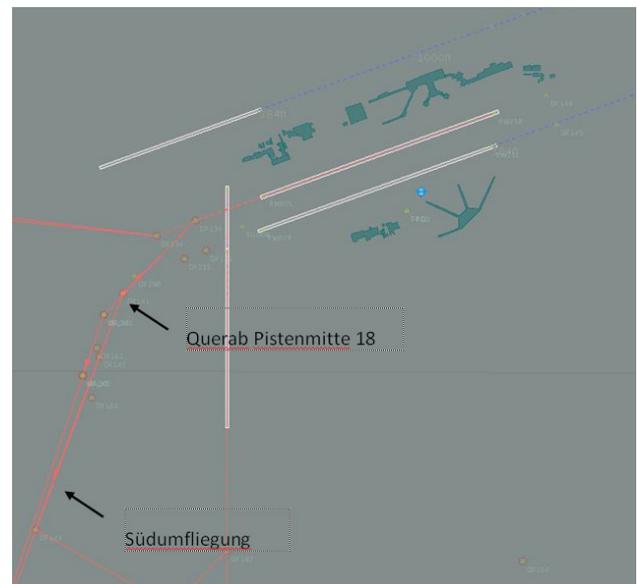


BILD 6. Abhängigkeit der Bahnen 25C und 18 [5]

Bei der Analyse dieser Lösungsansätze wird der Anteil der RNP-AR fähigen Luftfahrzeuge variiert und die Bewertungsgrößen Kapazität und Verzögerungswerte betrachtet.

#### Verzögernde Einflüsse der Instrumentenanflüge auf Egelsbach und der Abflüge von Frankfurt Runway 18

Um den Fluggesellschaften eine Möglichkeit zu verschaffen, den Verkehrslandeplatz Egelsbach unter Berücksich-



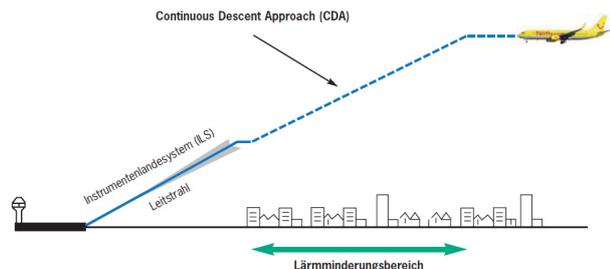


BILD 8. Continuous Descent Approach (Quelle: DFS)

Ein wesentlicher Vorteil des Flughafens in Hannover liegt darin, dass unter Einhaltung bestimmter Lärmbegrenzungsbestimmungen der Nachtbetrieb nicht generell verboten ist. Um diese auch bei steigendem Nachtbetrieb einzuhalten, werden in HETEREX neue Continuous Decent Approach und Continuous Climb Departure Verfahren (CDA/CCD) untersucht. Diese Verfahren werden bereits geflogen, besitzen jedoch noch Verbesserungspotential. Daher werden anhand des Anwendungsfalls Hannover Konzepte, wie z. B. 4D Trajektorien, Airborne Separation Assurance Systems (ASAS) und RNP Verfahren untersucht in Verbindung mit einer verbesserten Kommunikation zwischen den Luft- und Bodensystemen.

#### 4. MEHRWERTANALYSE

##### 4.1. Gütekriterien

Bestandteil der Mehrwertanalyse ist es, die Auswirkungen der betrachteten neuen Flugverfahren auf die zuvor definierten Anwendungsfälle abzuschätzen. Die Durchführung einer solchen Mehrwertabschätzung erfordert die Definition von Gütekriterien, die dazu dienen, die HETEREX Ziele quantitativ messbar bzw. qualitativ erfassbar zu machen und somit objektiv bewerten zu können.

Die nachfolgende schematische Abbildung zeigt die Zusammenhänge der HETEREX Konzeptelemente, Gütekriterien und Ziele sowie deren Wechselwirkung.

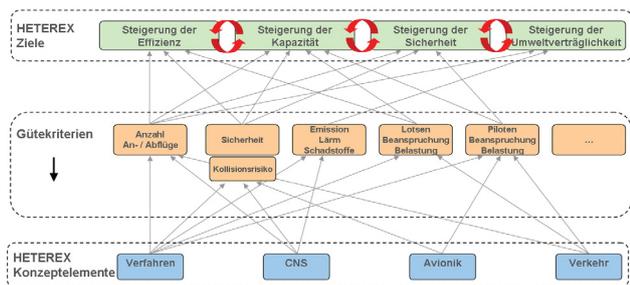


BILD 9. Wechselwirkungen HETEREX Konzeptelemente, Gütekriterien und Ziele

Um die Erhöhung der Sicherheit, Kapazität und Effizienz und Verringerung der Umweltbelastung durch neue Konzepte und Flugverfahren auszuwerten und zu validieren wurden messbare Gütekriterien definiert (BILD 10).

Diese in HETEREX zu betrachtenden Gütekriterien wurden nach einer Durchsicht der geeigneten Standardgütekriterien ausgewählt und in qualitative bzw. quantitative

Kriterien unterteilt. Sie stellen die Basis für die Mehrwertanalyse im HETEREX Vorhaben dar.



BILD 10. HETEREX Gütekriterien

##### 4.2. Qualitative Bewertung

Die Grundlage der Mehrwertanalyse bilden neben den Anwendungsfällen und den dazugehörigen neuen Verfahren die im Verbundvorhaben HETEREX definierten Gütekriterien. In einer ersten Abschätzung wurde für jeden Anwendungsfall analysiert, inwieweit die neuen Verfahren die jeweiligen Gütekriterien beeinflussen.

Aufgrund der Verschiedenheit der einzelnen Anwendungsfälle und der Wechselwirkungen zwischen den Lösungskonzepten und Gütekriterien wurde die qualitative Bewertung für jeden Anwendungsfall separat durchgeführt.

##### 4.3. Ergebnisse der Mehrwertanalyse

###### Arbeitslast

Die Ergebnisse der Mehrwertanalyse lassen erwarten, dass die Arbeitslast für Lotsen bzw. Piloten durch manche in HETEREX betrachteten neuen Verfahren steigt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es sich bei GBAS Anflügen bzw. RNP An- und Abflügen um neue Verfahren handelt, die bisher nicht von allen Luftfahrzeugen geflogen werden können. Um die Luftfahrzeuge hinsichtlich ihrer Performance unterscheiden und koordinieren zu können ist beispielsweise eine Steigerung der Kommunikation zwischen Lotsen und Piloten notwendig, um die erforderlichen Informationen auszutauschen. Parallel zum Entwurf von Flugverfahren und zur Untersuchung solcher Teilaspekte werden in HETEREX neue Avionik- und Anzeigenkonzepte entwickelt, die eine Abmilderung der gesteigerten Arbeitslast erwarten lassen. Hierfür ist in HETEREX eine Gesamtsystemvalidierung vorgesehen, die das Zusammenspiel und die Wechselwirkungen aller HETEREX Konzeptelemente berücksichtigt.

Anzahl der Flugbewegungen

Die Qualitative Mehrwertanalyse zeigt, dass im Gegensatz zur „Arbeitslast“ das Gütekriterium „Anzahl der Flugbewegungen“ am meisten von neuen Verfahren profitieren wird. Als Hauptgrund für den erwarteten Anstieg der Flugbewegungen wird die erwartete Reduktion der Staffellabstände im Anflug auf Grund der Einführung von GBAS gesehen.

Bei der Bewertung ist zu berücksichtigen, dass diese Vorteile insbesondere bei Cat II/III Betrieb spürbar werden und sich ein Mehrwert deshalb nur während weniger Tage im Jahr erzielen lässt.

Emission

Das Gütekriterium Emission ist sehr stark von der geflogenen Route abhängig. Daher ist eine Beeinflussung des Lärms und des Schadstoffes auch nur bei Anwendungsfällen zu sehen, bei denen die Flugstrecke verändert wird. Dies ist in den Anwendungsfällen Nürnberg und Hannover der Fall.

Durch die Streckenverkürzung in Nürnberg sowie den CDA Anflug auf Hannover werden hinsichtlich „Lärm“ und „Schadstoff“ Verbesserungen erwartet. In Nürnberg wird die Anflugstrecke auf den Flughafen umgelegt. Dadurch verkürzt sich zum einen die Strecke und zum anderen werden einige bewohnte Gebiete umflogen. Also eine potentielle Verbesserung der Situation hinsichtlich Lärm und Schadstoff. Weiteres Verbesserungspotenzial ergibt sich aus einer höheren Flugbahn bzw. einer geringeren Schubkraft.

Kosten

Eine positive Auswirkung auf die Kosten wird durch die Einführung von GBAS erwartet. Grund für die Annahme ist, dass eine GBAS Anlage theoretisch mehrere Bahnen bedienen kann, womit sie mehrere ILS Anlagen ersetzen kann. Dies würde sich auch auf die Wartungs- bzw. Betriebskosten positiv wirken. Andererseits wäre dafür ein bordseitiger GBAS-Ausrüstungsgrad von 100 % erforderlich, um alle IFR Anflüge abdecken zu können. Allerdings verfügt bisher lediglich ein geringer Anteil an Luftfahrzeugen über diese Ausstattung. Daher sind bei der Kostenanalyse auch die bordseitigen Nachrüstkosten zu berücksichtigen.

Zusammenfassung

Die Betrachtung von Teilaspekten auf der Basis von Anwendungsfällen, Lösungskonzepten und Gütekriterien erlauben die qualitative Analyse von Verbesserungspotentialen, Tendenzen und die Identifikation von Wechselwirkungen zwischen Verfahren, Bodeninfrastruktur und Avionik. Eine abschließende Bewertung kann daher erst nach einer Gesamtsystemvalidierung erfolgen, die im Abschnitt 6 beschrieben ist.

**5. AUSGEWÄHLTE HETEREX KONZEPTELEMENTE**

Wie bereits dargelegt, können die unter eingeschränkten Sichtbedingungen geltenden erweiterten Schutzzonen des Instrumentenlandesystems ILS als technologiebedingter Engpass bei der Steigerung der An-/Abflugkapazität von Flughäfen gesehen werden. Vor diesem Hintergrund wurde bereits vor Jahren begonnen, ein aus dem Differentiellen GPS (DGPS) abgeleitetes Alternativsystem zu entwickeln. Dieses auf den Prinzipien der Satellitennavigation basierende Landesystem Ground Based Augmentation System (GBAS) bietet neben einem geringeren Staffellabstand der anfliegenden Flugzeuge weitere neue Eigenschaften, die sich - wie bereits angedeutet - positiv auf die Leistung des Gesamtsystems auswirken können.

Obwohl sich erste Anlagen für Cat I Bedingungen in der Zertifizierungsphase befinden, zeigte sich in den letzten Jahren, dass diese prinzipiell bekannte Technologie für eine Anwendung in der Luftfahrt adaptiert werden muss. Vor diesem Hintergrund wird im Forschungsprojekt HETEREX GBAS als vielversprechende Technologie nicht nur aus Sicht des Anwenders betrachtet, sondern ebenfalls hinsichtlich technologischer Stärken sowie aktueller Schwächen wie beim Nachweis der Einhaltung der Gesamtintegrität.

Ein mit GBAS ausgerüstete Luftfahrzeug bestimmt während des Endanfluges auf den Flughafen seine horizontale Position sowie absolute Höhe mit Hilfe eines Satellitennavigationssystems. Im Fall von GBAS wird das Globale Navigationssystem GPS verwendet. Ähnlich wie beim leitstrahlbasierten Instrumentenlandesystem ILS folgt das Flugzeug einem festgelegten Pfad, der es in einem optimalen Winkel auf den Anfang der Landebahn führt. Im Gegensatz zum ILS, bei dem das Flugzeug einem elektromagnetischen Leitstrahl folgt, ist der Anflugpfad bei GBAS jedoch über virtuelle Stützstellen im Raum definiert. Dies bietet neue Möglichkeiten, da diese Stützstellen nicht mehr entlang einer Linie liegen müssen, sondern auch Kurven beschreiben können.

Da Landesysteme wie ILS oder GBAS vor allem bei schlechten Sichtbedingungen zum Einsatz kommen, wird der Positionsbestimmung eine erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet. Die Positionsbestimmung bei GBAS beruht dabei auf der Messung der Laufzeiten der Signale von den einzelnen Satelliten zu der Antenne eines Empfängers, aus denen anschließend durch Triangulation die Position bestimmt werden kann. Diese elektromagnetischen Signale interagieren auf ihrem Weg zum Empfänger mit verschiedenen Schichten der Atmosphäre bzw. deren Materie (hauptsächlich der Ionosphäre und Troposphäre), was sich nicht nur in einer Abschwächung der Signalstärke äußert sondern auch in einer zeitlichen Verzögerung des Signals. Die sich hieraus ergebende fehlerbehaftete Messung der Signallaufzeit kann einen erheblichen Einfluss auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung haben.

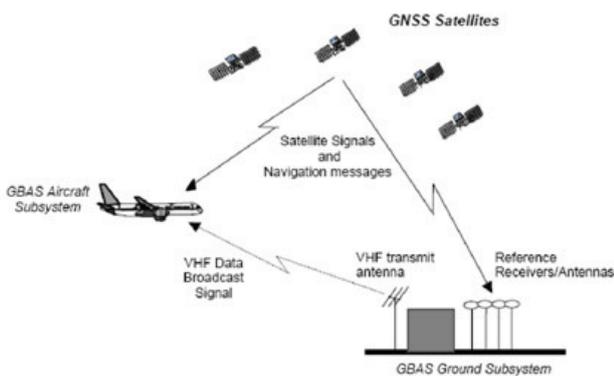


BILD 11. GBAS Übersicht [5]

Um dennoch Präzisionsanflüge durchführen zu können, besteht ein GBAS im einfachsten Fall aus einer Bodenstation (vgl. BILD 11), die sich auf dem Flughafengelände in lokaler Nähe zu der unterstützten Landebahn befinden sollte. Diese Bodenstation hat dabei die Aufgabe, über die Kenntnis der Positionen der eigenen Referenzantennen eine zeitliche Korrektur für das Signal eines bestimmten Satelliten zu bestimmen. Diese Korrekturen werden über einen Datenlink im VHF-Band an anfliegende Luftfahrzeuge gesendet. Im Flugzeug selbst werden diese Korrekturdaten von einem GBAS Empfänger dekodiert, um damit die Messungen der Satellitensignale korrigiert. Im Zusammenspiel mit weiteren überwachenden Systemen lässt sich auf diese Weise eine Position bestimmen, die nicht nur eine hohe Genauigkeit sondern ebenso eine hohe Integrität aufweist, eine unbedingte Voraussetzungen für sichere Landungen unter schlechten Sichtbedingungen.

GBAS unterstützt hierfür die vom ILS bekannten Kategorien (Cat-Bedingungen) von Präzisionsanflügen, aus denen sich die Entscheidungshöhe für einen Anflug ohne ausreichende Sicht auf die Landebahn ableitet. Eine geringere Entscheidungshöhe auf Grund schlechterer Sichtbedingungen geht dabei unmittelbar mit höheren Anforderungen an die Genauigkeit und Integrität des Landesystems einher.

Es existieren momentan Luftfahrt-Standards für die Kategorie Cat I, bei GBAS GAST-C genannt (GBAS Approach Service Type), deren kommerzielle Nutzung sich im Aufbau befindet. Daneben befinden sich Standards in Vorbereitung für Cat II/III, genannt GAST-D. Beide Typen basieren auf der Verwendung ausschließlich einer GPS Frequenz (L1) und sind Gegenstand aktueller Forschungsvorhaben wie des deutschen Verbundvorhabens HETEREX oder des europäischen Forschungsprogramms SESAR (Single European Sky ATM Research Programme). Für die Zukunft sind weitere Service Typen (GAST-E/F) vorgesehen, die mehrere Frequenzen und/oder weitere Satellitenkonstellationen wie Galileo oder GLONASS verwenden sollen. Mit der Einführung dieser Evolutionsstufen ist in der unmittelbaren Zukunft jedoch noch nicht zu rechnen.

Die Gründe hierfür im noch nicht operativ zur Verfügung stehenden Galileo zu suchen greift jedoch zu kurz. Eine noch nicht abschließend nachgewiesene Eigenschaft ist die Forderung nach der Einhaltung der Integrität der GBAS-Positionslösung, wie sie z. B. für die automatische

Landefunktion von GAST-D vorgeschrieben ist. Die Positionsbestimmung auf Grund der Signallaufzeiten geht von einem Modell der Atmosphäre aus, das ihr Verhalten unter normalen Bedingungen beschreibt. Unter bestimmten Umständen kann sich die Zusammensetzung der Atmosphäre und damit deren Eigenschaft jedoch verändern. Das differentielle Prinzip von GBAS ist zwar in der Lage, Korrekturen für eine homogene Atmosphäre zu bestimmen, nicht jedoch bei lokalen Phänomenen, die entweder nur die Bodenstation oder nur das Flugzeug betreffen. In einem solchen Fall sind die Annahmen über die Korrekturdaten nicht gültig, wodurch sich mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit eine Verletzung der Integrität ergeben würde. Da GBAS in einem solchen Fall keine gültigen Korrekturen bestimmen kann, werden Mechanismen verwendet, die derartige Phänomene zumindest erkennen können. Sogenannte Monitore beobachten dafür die Messungen der Satellitensignale sowie interne Parameter und vergleichen diese mit erwarteten Werten. Im Fall einer signifikanten Abweichung wird diese Information an die umgebenden Flugzeuge gesendet, die daraufhin die GBAS Korrekturen nicht mehr verwenden dürfen.

Die Einhaltung der Integritätsforderung hängt wesentlich von den Fähigkeiten dieser Monitore ab. Dazu beschreiben die Standards für GAST-D in der aktuellen Version die zu erkennenden Ereignisse sowie mit welcher Sicherheit diese erkannt werden müssen, geben jedoch nicht in allen Fällen an, wie dies erreicht werden kann. Für diesen Zweck können Simulationen eingesetzt werden, die es erlauben in einer Simulation eines GBAS unterschiedliche Monitor-Algorithmen und deren Verhalten unter spezifischen Umständen zu untersuchen. Im Rahmen von HETEREX wird eine solche Simulationsumgebung entwickelt. Dazu werden mit einer Ausbaustufe der Galileo System Simulation Facility (GSSF) [9] der ESA/ESTEC, entwickelt von VEGA Space, Satellitensignalmessungen unter verschiedenen atmosphärischen Bedingungen erzeugt und dem GBAS Simulator bzw. den enthaltenen Monitoren zugeführt. Auf diese Weise können die Möglichkeiten verschiedener Algorithmen und deren Verhalten unter nominalen und anormalen atmosphärischen Bedingungen betrachtet und bewertet werden.

Zu einem späteren Zeitpunkt in HETEREX wird der modulare Aufbau dieses GBAS Simulators verwendet, um in einem gesonderten Szenario zu untersuchen, unter welchen Umständen ein GAST-D System eines Flughafens z. B. einen GAST-C Anflug auf einen benachbarten Flughafen unterstützen kann.

## 6. VALIDIERUNG

Die Validierung der in HETEREX entwickelten Verfahren erfolgt auf der Basis der Anwendungsfälle, um realistische Szenarien zu erzeugen. Ermittelt wird der Nutzen in Bezug auf die Gütekriterien; quantitative Ergebnisse werden außerdem mit den Zielen des Single European Sky Vorhabens (SES) verglichen. Zusätzliche Fragestellungen zur Reife der Verfahren bewerten deren Einführbarkeit und werden aus der E-OCVM, der europäischen Methode zur Validierung von ATM Konzepten [10], entnommen. Im Folgenden wird zunächst das Validierungskonzept vorgestellt und anschließend auf die für HETEREX relevanten Aspekte der E-OCVM eingegangen.

Das grundsätzliche Vorgehen zeigt BILD 12. Aus der ursprünglichen Problemidentifikation, der Ableitung eines Anwendungsfalls und unter Berücksichtigung der gewählten Validierungstools muss ein Referenzszenario entwickelt werden, welches die aktuelle Situation widerspiegelt und damit als Vergleichsbasis für das Validierungsszenario dient.

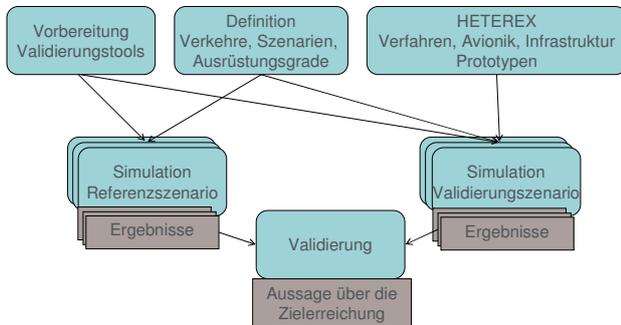


BILD 12. HETEREX Validierungskonzept.

Für das Referenzszenario müssen die Rahmenbedingungen definiert werden, die zum Beispiel den zu untersuchenden Bereich eingrenzen und den Verkehrsmix sowie die Ausrüstung an Bord und am Boden festlegen. Zu den Rahmenbedingungen zählen auch Informationen wie die Dauer der Simulation beziehungsweise des Flugversuches oder die Häufigkeit der Wiederholung. Im Falle einer deterministischen Simulation ist ein Simulationslauf ausreichend, andernfalls müssen viele Durchläufe mit einer statistischen Auswertung stattfinden. Ein Flugversuch kann in der Regel aus Kostengründen nicht mehrfach durchgeführt werden, obwohl dieser nicht deterministisch ist. Neben den Rahmenbedingungen müssen die definierten Referenzszenarien auch Einschränkungen beinhalten, die zum Beispiel durch Begrenzungen im Simulationsumfang oder durch das Validierungswerkzeug erzeugt werden. Auf diese Einschränkungen ist bei der Beschreibung des Szenarios explizit hinzuweisen.

Validierungswerkzeuge, die in HETEREX Verwendung finden, sind Schnellzeitsimulationen, Realzeitsimulationen für Human-in-Loop, Flugversuche in Braunschweig mit Fluggeräten des DLR, verschiedene Cockpitsimulatoren sowie kombinierte Boden/Cockpit Echtzeitsimulationen. Zusätzlich sind Werkzeuge zur Abbildung realistischer Verkehrsströme und zur Analyse von Satellitennavigationssystemen verfügbar.

Das Validierungsszenario entspricht dem in die Zukunft projiziertem Referenzszenario inklusive dem zu bewertendem System. Dabei müssen die Rahmenbedingungen zum Referenzszenario unverändert bleiben. Einzelne Rahmenbedingungen können gezielt an die zukünftige Situation angepasst werden, hierzu zählt zum Beispiel der veränderte Verkehrsmix aufgrund der Projektion in die Zukunft (zum Beispiel durch Einführung neuer Flugzeugmuster). Eine Simulation beziehungsweise ein Flugversuch kann mehrere Validierungsszenarien beinhalten. Dieses wäre zum Beispiel bei einer Variierung der Ausrüstungsgrade denkbar.

Nach der Ausführung des Referenzszenarios und der Validierungsszenarien werden für sämtliche Szenarios die gewählten Gütekriterien bestimmt. Innerhalb der Validierung werden die einzelnen Gütekriterien der Szenarien

verglichen und bewertet. Die durch das Verbundvorhaben HETEREX entstehenden Verbesserungen werden für die Bewertung der Erreichung der Ziele herangezogen.

Die weitere Auswertung der in den Validierungsversuchen ermittelten Ergebnisse erfolgt in Bezug auf die für den SES festgelegten Ziele. Einzelne Validierungsergebnisse werden zusammengefasst und in einem größeren Zusammenhang dargestellt. Zudem werden einheitliche Fragestellungen zur Bewertung der Reife der Verfahren untersucht. Berücksichtigt werden dabei die transversalen Aspekte Sicherheit, Umwelteinflüsse, Wirtschaftlichkeit, menschliche Faktoren, und Standards bzw. Regularien.

Die Validierung in HETEREX folgt damit der E-OCVM [10]. Die europäische Methode zur Validierung von operationellen Konzepten (European Operational Concept Validation Methodology – E-OCVM) definiert Methoden und Prozesse zur Bewertung der Entwicklung neuer Verfahrensweisen im Luftverkehr. Sie wird von Eurocontrol in der derzeit dritten Fassung zur Verfügung gestellt und ihre Anwendung ist Voraussetzung im Luftverkehrsbereich für Forschungsprojekte im Verbund mit Eurocontrol und der Europäischen Kommission.

Den von der International Civil Aviation Organization (ICAO) vorgesehenen ergebnisorientierten Ansatz (vergleiche [4]) setzt E-OCVM in Rahmenrichtlinien für die Projektplanung und Durchführung um. Die Methodik ist allgemein gehalten, um sowohl für kleinere Projekte als auch für sehr große Programme anwendbar zu sein, wie zum Beispiel für das Single European Sky ATM Research Programme (SESAR). Zudem fördert eine einheitliche Vorgehensweise die Kommunikation zwischen allen Projektbeteiligten.

Die Methode beschreibt einen Teil des Produktlebenszyklus. In diesem Zusammenhang werden operationelle Verfahren als Produkt verstanden. Mit der Bestimmung der Anforderungen beginnt die Methode. Nach E-OCVM läuft die Konzeptentwicklung in drei Phasen ab und schließt mit der vorindustriellen Produktreife. Die drei wesentlichen Komponenten sind:

- Ein Lebenszyklusmodell (Lifecycle Model)
- Eine Planungsgrundstruktur (Structured Planning Framework)
- Einbeziehung verschiedener Sichtweisen (Case-Based Approach)

Das Lebenszyklusmodell in BILD 13 beschreibt die schrittweise Verfeinerung von der Festlegung des Handlungsspielraums (V1), über die Analyse der Realisierbarkeit (V2) zur vorindustriellen Entwicklung und Integration (V3).

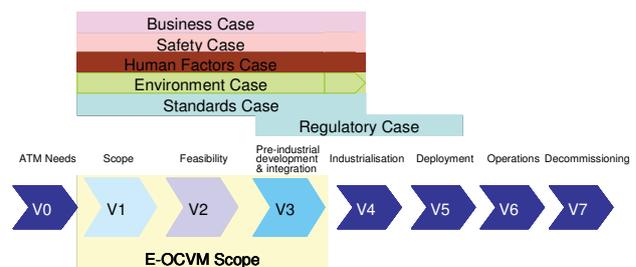


BILD 13. Lebenszyklusmodell und sichtweisenbasierte Betrachtungsweise (aus [10])

Jede Phase schließt ab mit der Prüfung von Reifekriterien. BILD 13 stellt außerdem den sichtweisenbasierten Ansatz dar. Dieser stellt sicher, dass den verschiedenen Interessen der Projektbeteiligten Beachtung geschenkt wird. Die folgenden Sichtweisen sollen berücksichtigt werden: Wirtschaftlichkeit, Sicherheit, menschliche Faktoren, Umwelt, Standardisierung und Zulassung. Nur wenn alle diese Faktoren genügend und rechtzeitig betrachtet werden, kann die Entwicklung erfolgreich und ohne Verzögerung in die Industrialisierung fortgesetzt werden.

Die letzte Komponente des E-OCVM ist eine für alle Phasen einheitliche Planungsgrundstruktur. Jede Phase endet mit der formalen Beurteilung der erzielten Ergebnisse durch die Projektteilnehmer und Entscheidungsträger. Die Reife (Maturity) der Entwicklung wird beurteilt anhand von fünf Kategorien (R&D Need Categories): Problemstellung, Kontext, Design und Machbarkeit, Validierung der erwarteten Ergebnisse sowie der Wirtschaftlichkeit. E-OCVM legt zur besseren Vorgehensweise eine Liste von konkreten Kriterien vor.

Für HETEREX werden die folgenden Kriterien vorgeschlagen: der Nutzen in Bezug auf die Gütekriterien, Risiken und Einschränkungen / Wechselwirkungen / Alternativen. Zur Bewertung der Einführbarkeit sind außerdem die Kriterien Sicherheit, Aufgabenverteilung (Rollen), Abhängigkeit von Technologien, MMI Aspekte, und mögliche Übergangs- / Einführungsszenarien zu diskutieren.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

Im Verbundvorhaben heterogener komplexer Flugverkehr (HETEREX) werden neue Technologien und Verfahren entwickelt um die Kapazitäten im Luftverkehrsmanagement dem wachsenden Bedarf anzupassen und ihn gleichzeitig umweltfreundlicher und effizienter zu machen, unter Erhalt oder Erhöhung der Sicherheit. Einige Entwicklungen in HETEREX berücksichtigen insbesondere die Bedürfnisse eines heterogenen Luftverkehrs.

Zu den Verfahren und Technologien, die in HETEREX verstärkt untersucht werden gehört GBAS. Die Definition von GBAS-Systemen für Cat II/III, auch als GAST-D bezeichnet, wird durch die Entwicklung von Infrastrukturkomponenten, von Navigationsgeräten für die Avionik, von Monitoren und von Simulatoren zur Untersuchung der Integrität, und von Anflugverfahren in konkreten Anwendungsfällen unterstützt.

Die neu entwickelten Verfahren werden anhand von Anwendungsfällen definiert und analysiert. Eine einheitliche Validierung wird den Bezug zu den Zielen herstellen; in einem ersten Schritt wurden Gütekriterien definiert und die Verfahren qualitativ untersucht. Die Validierung wird neben der quantitativen Betrachtung des Nutzens auch die Umsetzbarkeit der Verfahren diskutieren.

## 8. VERWEISE

Das Verbundvorhaben HETEREX wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie durch den Projektträger Luftfahrt des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. unter dem Förderkennzeichen 20V0901A gefördert.

### Projektpartner:

DFS Deutsche Flugsicherung GmbH  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Funkwerk Avionics GmbH  
Jeppesen GmbH  
Northrop Grumman LITEF GmbH  
THALES Air Systems GmbH

[www.heterex.de](http://www.heterex.de)

## 9. REFERENZEN

- [1] Performance Review Commission: PRR 2010. Performance Review Report. Eurocontrol, May, 2011.
- [2] SESAR Joint Undertaking, European ATM Master Plan, 1<sup>st</sup> Ed., 2009.
- [3] Federal Aviation Agency, (FAA), NextGen Benefits, <http://www.faa.gov/nextgen/benefits/>, retrieved: July 2011.
- [4] ICAO: Manual on Global Performance of the Air Navigation System, Doc 9883, AN/468, 2008.
- [5] HETEREX internes Arbeitsdokument „Anwendungsfälle“, HETEREX Konsortium, 2010.
- [6] EUROCAE ED 114, Minimum Operational performance Specification for GNSS Augmentation Ground equipment to support Cat 1 Operations, EUROCAE, 2003.
- [7] DLR - Institut für Flugführung - Luftverkehrssysteme, Auswertung von METAR-Daten
- [8] Patrick Manzi, RNP-AR Approach Procedures in Sweden, International Conference on Active Noise Abatement, September 23, 2010.
- [9] Homepage der Galileo System Simulation Facility (GSSF) by VEGA Space GmbH, <http://www.gssf.info>
- [10] Eurocontrol: E-OCVM, European Operational Concept Validation Methodology, V3.0, 2010.
- [11] SESAR Joint Undertaking, European ATM Master Plan, 2009.

## 10. ABKÜRZUNGEN

CCD	Continuous Climb Departure
CDA	Continuous Descend Approach
CNS	Communication/Navigation/Surveillance
ESA	European Space Agency
E-OCVM	European Operational Concept Validation Methodology
ESOC	European Space Operations Centre
GBAS	Ground-Based Augmentation System
ICAO	International Civil Aviation Organisation
ILS	Instrument Landing System
RNAV	Area Navigation
RNP AR	Required Navigation Performance Authorisation Required
SID	Standard Instrument Departure
STAR	Standard Terminal Arrival Route
VOR	VHF Omnidirectional Radio Range