

# DAS „EXTENSIBLE WORKFLOW MANAGEMENT FOR SIMULATIONS“ IM EINSATZ

A. Scharnweber und S. Schier,  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Flugführung,  
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

## Zusammenfassung

Das Institut für Flugführung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) forscht schwerpunktmäßig im Bereich des Luftverkehrsmanagements. Im Mittelpunkt dieser Forschung steht die Konzeption und Validierung neuer Systeme und operationeller Verfahren. Dabei wird unter anderem eine große Bandbreite an Simulationssystemen eingesetzt. Verschiedene Echtzeit-Simulationseinrichtungen wie der Tower-Simulator oder der Approach- und Radar-Simulator sowie eine Reihe von Schnellzeit- Simulations-Systemen unterstützen die Beurteilung von Luftverkehrsszenarien.

Die Verwendung einer Simulation als Forschungswerkzeug ist primär auf die Bewertung eines Systems oder Verfahrens ausgerichtet. Diese Bewertung erfolgt auf Basis der aufgezeichneten Simulationsdaten. Für die Auswertung der erhobenen Daten standen lange Zeit nur uneinheitliche Verfahren zur Verfügung. Diese Verfahren waren nicht oder nur teilweise automatisiert, was die Auswertung oftmals langwierig, aufwendig und fehleranfällig gestaltete. Der hohe Arbeitsaufwand für die Ermittlung aussagekräftiger Parameter schränkte die Möglichkeiten ein, diese Parameter umfangreich zu bewerten und zu interpretieren.

Zur Unterstützung der Simulationsanalyse wurde daher das Softwaresystem „Extensible Workflow Management for Simulations“ (EWMS) entwickelt. Das EWMS ermöglicht es, Simulationsdaten unabhängig von der verwendeten Simulationsumgebung mit einheitlichen Verfahren zu bewerten. Die verschiedenen Simulationssysteme des Instituts können durch eine flexible Architektur schnell und unkompliziert mit dem EWMS verbunden werden. Die weitgehende Automatisierung verringert erheblich den Aufwand zur Gewinnung aussagekräftiger Parameter. Der Benutzer kann sich damit auf die Interpretation und Bewertung der Parameter konzentrieren.

Die Entwicklung des EWMS wurde im Jahr 2008 initiiert, die Systemarchitektur wurde im September 2009 auf dem Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress in Aachen vorgestellt [1]. Im Herbst 2009 erfolgte die Freigabe der ersten produktiv einsetzbaren Version. Nach umfangreichen Erfahrungen mit der Auswertung einer Reihe von Schnellzeit- und Echtzeit-Simulationen kann nun die Praxistauglichkeit des EWMS-Konzepts bewertet werden. Es werden beispielhaft eine Reihe von Auswertungen vorgestellt, die durch den Einsatz des EWMS erheblich vereinfacht werden konnten. Der Vergleich der Auswertungs-Workflows mit den bisherigen Verfahren zeigt deutlich die erzielten Zeitgewinne bei zugleich verbesserter Qualität der Ergebnisse.

Neben tabellarischen Daten werden für die untersuchten Parameter jeweils einheitliche Diagramme generiert, die direkt in Berichte übernommen werden können. Durch die Versionierung aller Eingangs- und Ausgangsdaten werden Vorgaben des institutseitigen Qualitätsmanagement-Systems weitgehend automatisiert umgesetzt. Die ebenfalls versionierte, automatisch erzeugte Dokumentation für alle erstellten Diagramme ermöglicht jederzeit den Nachweis, welche Datenbasis einer Auswertung zugrunde liegt. Abschließend werden aktuelle Entwicklungen für das EWMS vorgestellt, die das Analysespektrum für die diversen Simulationssysteme des Instituts erweitern. Neben weiteren Performance-Indikatoren gehört dazu auch das Konzept für die Erweiterung der im vergangenen Jahr vorgestellten Systemarchitektur um direkte Vergleichsmöglichkeiten zwischen mehreren Szenarien.

## 1. MOTIVATION

### 1.1. Simulationsumgebungen

Das Institut für Flugführung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Braunschweig zählt zu den weltweit führenden Forschungseinrichtungen im Bereich des Luftverkehrsmanagements. Die Forschungsaktivitäten des Instituts konzentrieren sich auf die Validierung und Verifikation neuer Systeme und Prozeduren wie z. B.

Infrastrukturänderungen, Routen oder Piloten- und Lotsen-Assistenzsysteme. In diesem Rahmen kommen eine Reihe verschiedener Simulationsumgebungen zum Einsatz. Echtzeit-Simulatoren wie der Tower-Simulator oder der Approach- und Radar-Simulator sowie verschiedene Schnellzeit-Simulations-Systeme unterstützen die Beurteilung von Luftverkehrsszenarien.

Bei den für die Simulationen eingesetzten Software-systemen handelt es sich häufig um kommerzielle Produkte, deren Schwerpunkt auf der Simulation und nicht

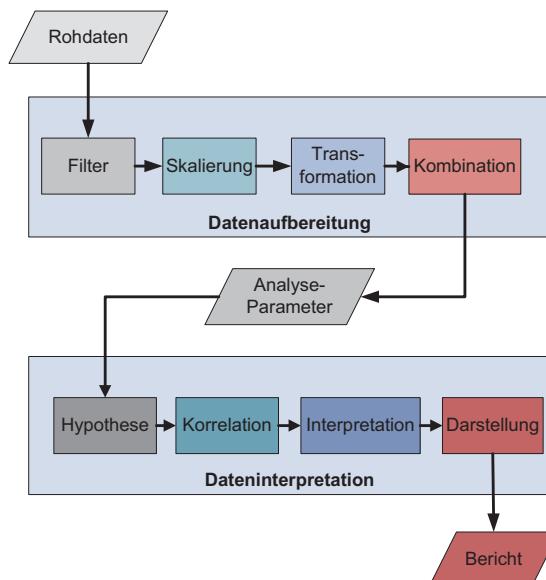
auf der Auswertung der Ergebnisse liegt. Der Tower-Simulator wie auch der Radar-Simulator beispielsweise wurden für die Lotsenausbildung entwickelt. Umfangreiche Auswertungen der Simulationsläufe waren nicht vorgesehen. Andere Tools stellen detaillierte Ausgaben zur Verfügung, aber die unterschiedlichen Daten und Datenformate erfordern für jedes Tool spezifische Auswertungsverfahren.

## 1.2. Auswertungsprozess

Der Auswertungsprozess lässt sich allgemein in zwei Phasen gliedern. Zunächst generiert die Aufbereitung aus den Rohdaten aussagekräftige Parameter. Diese Parameter werden in der daran anschließenden Interpretationsphase in Zusammenhang gebracht. Das Ergebnis dieser Phase sind verschiedene Schlussfolgerungen mit dem abschließenden Bericht.

Die Datenaufbereitung lässt sich in weitere Unterphasen gliedern. Diese Unterphasen werden optional durchlaufen. Der Zustand der Rohdaten und die geforderten Analyse-Parameter für die Interpretation bestimmen, welche Phasen benötigt werden.

Der erste Arbeitsschritt der Aufbereitung ist die Filterung. Dieser Schritt verwirft alle nicht benötigten Rohdaten. Ein Beispiel hierfür ist die Darstellung der Anflugsequenz. Alle Daten abfliegender Luftfahrzeuge können durch einen Filter verworfen werden. Die benötigten Rohdaten werden im Folgenden skaliert und transformiert. Die Skalierung ändert das Bezugssystem der Werte, ohne die Datenstruktur zu ändern. Ein Beispiel hierfür ist die Umrechnung der Flughöhe von Fuß in Meter. Die Zahlenwerte werden verändert, die Datenstruktur als einfache Höheninformation in Form einer Gleitkommazahl bleibt aber erhalten.



**BILD 1:** generischer Auswertungs-Workflow

Die Transformation verändert neben den Werten auch die Datenstruktur. Exemplarisch kann die Koordinatentransformation vom geographischen in das kartesische Koordinatensystem genannt werden. Im Rahmen der Transformation werden geografische Länge und Breite in

x- und y-Koordinate übersetzt. Zusätzlich muss der Bezugspunkt des Koordinatensystems als neuer Datensatz gespeichert werden. Die Datenstruktur wird folglich verändert.

Letzter Schritt der Datenaufbereitung ist die Kombination von Daten. Einzelne Daten werden in einen logischen Bezug gesetzt, um neue Parameter zu generieren. Ein Beispiel hierfür ist die Ermittlung der Rollzeiten von Luftfahrzeugen auf dem Flughafenvorfeld. Diese Daten werden aus den Positionsdaten der Luftfahrzeuge bestimmt. Ein Algorithmus überprüft, ob sich ein Luftfahrzeug zum analysierten Zeitpunkt am Boden befindet und ob es sich bewegt, und berechnet dann an Hand dieser Parameter die Rollzeit. Das Ergebnis dieses finalen Aufbereitungsschritts sind die Analyseparameter. Diese Parameter stellen aussagekräftige Werte dar und sind die Grundlage der Interpretation.

Die Interpretation lässt sich ebenfalls in Unterphasen gliedern. Diese Phasen sind im Gegensatz zur Datenaufbereitung nicht optional. Die erste Phase ist die Hypothesenformulierung. Diese Fragestellung wird mit Hilfe der Analyseparameter beantwortet. Der nächste Schritt setzt die Parameter in eine entsprechende Korrelation. Eine Korrelation kann zum Beispiel der Vergleich zwischen zwei arithmetischen Mitteln sein. Das Ergebnis der Korrelation wird entsprechend der Hypothese interpretiert und im Anschluss dargestellt. Das Ergebnis der Interpretation ist der Bericht, welcher die Einzelergebnisse und das Vorgehen zusammenfasst und auf dieser Basis die Initialfrage der Simulationskampagne beantwortet.

## 2. DAS EWMS-KONZEPT

In der Vergangenheit wurde eine große Zahl von Software-Tools entwickelt, um Daten aus verschiedenen Simulationsumgebungen aufzuzeichnen und auszuwerten. Diese wurden unabhängig voneinander für verschiedene Simulatoren, teilweise für einzelne Messkampagnen, und in verschiedenen Programmiersprachen implementiert. Die verwendeten Algorithmen waren oft nicht ausreichend getestet, kaum dokumentiert, und die Validierung der Algorithmen war vielfach ein Nebenprodukt der Simulationsauswertungen.

Zur Unterstützung der Simulationsauswertung wurde daher das Softwaresystem „Extensible Workflow Management for Simulations“ (EWMS) entwickelt (vgl. [2]), welches es ermöglicht, Simulationsdaten unabhängig von der verwendeten Simulationsumgebung mit einheitlichen Verfahren zu bewerten. Die verschiedenen Simulationssysteme des Instituts und auch analytische Werkzeuge können durch eine flexible Architektur mit dem EWMS verbunden werden. Der in Abschnitt 1.2 vorgestellte Auswertungsprozess wird in weiten Teilen automatisiert. Dies führt zu einer deutlichen Beschleunigung der Simulationsanalyse und einer Verringerung des Personalbedarfs für die Auswertung.

### 2.1. Modularität

Der Aufbau des EWMS ist auf eine leichte Erweiterbarkeit ausgelegt. Die modulare Struktur des Softwaresystems besteht aus einem Kern, der mit einer beliebigen Zahl von Erweiterungen ergänzt werden kann, welche neue Reports

oder die Unterstützung für zusätzliche Simulationsumgebungen bereitstellen.

Die Grundelemente der Benutzeroberfläche, die Datensicherung und die Datenhaltung sind vollständig im Kern abgelegt. Die simulatorspezifischen Codeteile werden in sogenannten Environments (engl.: Umgebung) abgelegt. Für jede unterstützte Simulationsumgebung ist einmalig ein neues Environment zu implementieren, das die benötigten simulatorspezifischen Parser und etwaige weitere spezifische Funktionalitäten bereitstellt. Die Auswertungsalgorithmen werden analog zu den Environments in eigenen Modulen gekapselt. Diese Report-Module sind unabhängig von den verwendeten Environments.

Definierte Schnittstellen zwischen Kern, Environments und Reports ermöglichen die problemlose Zusammenarbeit der Module. Neue Module werden zur Laufzeit automatisch erkannt und erfordern keine Eingriffe in den Quellcode.

## 2.2. Abstraktion

Kern des Nutzungskonzepts für das EWMS ist die Unabhängigkeit von spezifischen Simulationsumgebungen und damit von spezifischen Daten und Datenformaten. Die Speicherung der Daten in der EWMS-internen SQL-Datenbank (vgl. [6]) erfolgt in einem generischen Format, das von den Eigenheiten der unterstützten Simulatoren entkoppelt ist.

Die Abstraktion der Daten wird über Parser erreicht, die im simulationsspezifischen Environment des EWMS abgelegt werden und auf die Datenaufzeichnung des jeweiligen Simulators abgestimmt sind. Das EWMS ist mit Hilfe dieser Parser in der Lage, Rohdaten aus dem jeweiligen Format in die Datenbank zu importieren. Die Auswertung kann dann unabhängig vom ursprünglichen Datenformat die benötigten Daten in einheitlicher Form aus der Datenbank anfordern.

Die Datenbank ist zu diesem Zweck mit einem selbstkonzipierten Datenbankmanagementsystem (DBMS) ausgestattet. Das DBMS ist in der Lage, eine Reihe von vordefinierten Tabellen bereitzustellen, die dann von den Parseern mit Daten gefüllt werden können. Die Tabellendefinitionen sind beliebig erweiterbar, um auch zukünftigen Anforderungen gerecht werden zu können. Bestehende Tabellen können jederzeit erweitert oder komplett neue Tabellen hinzugefügt werden, ohne existierende Funktionalitäten zu beeinflussen.

Zu den verfügbaren Tabellendefinitionen zählen Infrastrukturdaten, Flugpläne, Flugphasen und definierte Zeitpunkte wie ATOT, ALDT, AIBT oder AOBT. Jedem Environment ist es freigestellt, welche dieser Tabellen tatsächlich mit Daten gefüllt werden.

Beispielhaft soll an dieser Stelle die generische Abbildung der Flugphasen vorgestellt werden. Hierbei wird die Trajektorie eines simulierten Fluges in einzelne Abschnitte zerlegt, die einer Reihe festgelegter (aber ebenfalls beliebig erweiterbarer) Flugphasen zugeordnet werden.

Jede Flugphase wird mit ihrer Zeitdauer und, soweit ver-

fügbar, mit weiteren Informationen wie Start- und Endkoordinaten, Heading oder Geschwindigkeiten in der Datenbank abgelegt.

Die Summe aller Flugphasen für ein Luftfahrzeug bildet die Trajektorie des Fluges. Die Darstellungen in BILD 2 und BILD 3 zeigen grafisch die aktuell im EWMS abgebildeten Flugphasen für Arrivals bzw. Departures.

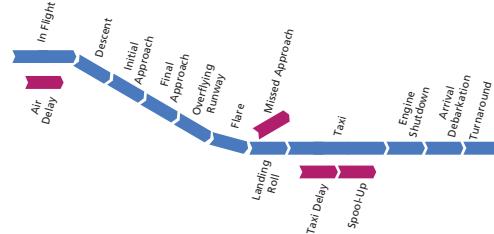


BILD 2: Arrival-Flugphasen

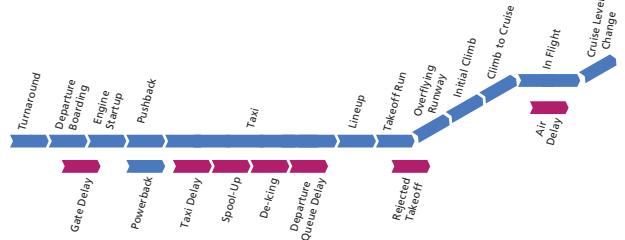


BILD 3: Departure-Flugphasen

## 2.3. Reports und Visualisierungen

Die gesamten Auswertungsfunktionalitäten werden in Form von Report-Modulen in das EWMS integriert. Das EWMS bietet den Reports die oben beschriebene Möglichkeit eines abstrakten Datenzugriffs und entkoppelt sie damit von einzelnen Simulationsumgebungen.

Jeder Report stellt dem DBMS eine Liste der benötigten Daten zur Verfügung. Das DBMS prüft daraufhin, ob alle benötigten Daten auch verfügbar sind. Nur wenn diese Prüfung positiv ausfällt, wird der Report dem Benutzer zur Auswahl verfügbar gemacht. Dieses Vorgehen ermöglicht einerseits einem neuen Environment die Nutzung aller bereits existierenden Reports, für die das Environment die benötigten Daten bereitstellen kann. Andererseits werden neue Reports automatisch und ohne Eingriffe in existierenden Quellcode angezeigt, wenn eine Simulationsumgebung die notwendigen Daten liefern kann.

## 3. NUTZUNG

Die Auswertung von Simulationsdaten lässt sich in eine Reihe von Einzelschritten gliedern. Zunächst wird ein Simulationsszenario in die EWMS-Datenbank geladen. Anschließend können in beliebiger Abfolge Reports ausgewählt und Filter-Einstellungen verändert werden.

Das im EWMS integrierte Filter-Panel ermöglicht es, die untersuchten Daten nach einer Vielzahl von Kriterien einzuschränken, um etwa nur eine Bahn, nur bestimmte

An- und Abflugrouten oder nur einzelne Wirbelschleppenkategorien zu untersuchen. Einmal gewählte Filter-Einstellungen sind global wirksam, bleiben also auch bei der Auswahl eines neuen Reports erhalten. Dies vereinfacht die Generierung verschiedener Auswertungen auf einer einheitlichen Datenbasis.

Sobald ein Report geladen ist, kann außerdem jederzeit die Report-Konfiguration modifiziert werden. Die Konfigurationsmöglichkeiten sind reportspezifisch und beinhalten meist die Auswahl des Farbschemas weitere Optionen für die Diagrammgenerierung. Diese Einstellungen bleiben ebenfalls erhalten, bis ein neues Szenario geladen wird. Weiterhin teilen sich verwandte Reports eine einheitliche Konfiguration, was die Erstellung einheitlicher Diagramme weiter vereinfacht.

Durch die Verwendung des EWMS lassen sich bereits heute eine Vielzahl von Auswertungen vollständig automatisiert durchführen, die in der Vergangenheit mit beträchtlichem Aufwand manuell oder mit nur teilweiser Unterstützung durch verschiedene eigens entwickelte Tools ausgeführt wurden.

Im Folgenden sollen einige Reports mit ihrer Verwendung in unterschiedlichen Umgebungen beispielhaft vorgestellt werden.

### 3.1. Staffelung

Die Auswertung der in einer Simulation erreichten Staffelungen zwischen einzelnen Luftfahrzeugen ist für eine Reihe von Betrachtungen von großem Interesse.

In Schnellzeitsimulationen werden die Staffelungen üblicherweise vor Simulationsbeginn eingestellt. Diese Werte werden oft mit einer Verteilungsfunktion überlagert, um die Lotsen-Performance zu simulieren (Interarrival- bzw. Interdeparture Error [2]). Daher ist die Auswertung der tatsächlich simulierten Staffelungsabstände ein integraler Bestandteil der Simulationserstellung. Sind die simulierten Staffelungsabstände nicht realistisch, so verzerrt dies signifikant die Simulationsergebnisse. Die Staffelungsanalyse wird damit zu einem Indikator für die Qualität einer Simulation.

Im Bereich der Echtzeitsimulation unterstützt die Auswertung der erreichten Staffelungen die Bewertung der Simulationen. In Verbindung mit anderen Parametern lassen sich beispielsweise Aussagen über die Qualität neuer Lotsen-Assistenzsysteme oder die Effizienz neuer Verfahren treffen. Auch die Lotsen-Performance unter verschiedenen Randbedingungen kann über die Auswertung der erzielten Separationen evaluiert werden.

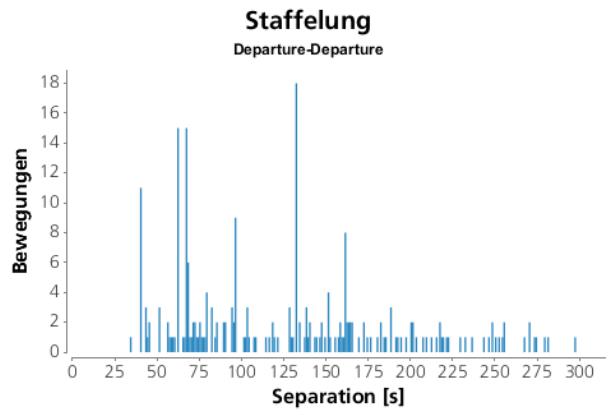
Die Staffelungsauswertung im EWMS stützt sich auf die in der Datenbank abgelegten Lande- und Takeoff-Zeiten (ALDT bzw. ATOT), um die Schwellenstaffelungen für die verschiedenen Staffelungs-Kombinationen in Form von Histogrammen aufzubereiten:

- Arrival-Arrival
- Arrival-Departure
- Departure-Arrival
- Departure-Departure

Die Departure-Departure-Staffelung für ein Szenario ist in Bild 4 beispielhaft dargestellt.

Vor Einführung des EWMS war die Auswertung der Staffelungen für Schnellzeitsimulationen nur in Teilen automatisiert und mit dem Einsatz mehrerer unterschiedlicher Werkzeuge verbunden. Ein in VBA programmiertes Tool speicherte zunächst die Simulationsergebnisse in einer Access-Datenbank. Diese Datenbank konnte nun mit einem selbst entwickelten Access-Formular gefiltert werden und stellte die Rohdaten für jeweils eine Staffelungskombination bereit. Diese Rohdaten wurden anschließend manuell in eine speziell vorbereitete Excel-Datei kopiert und dort in Form von Histogrammen visualisiert. Der gesamte Prozess war aufgrund der Vielzahl von manuellen Eingriffen fehleranfällig und durch den Mangel an Automatisierung mit einem Zeitaufwand von ca. fünf Minuten zur Erstellung der vier Histogramme für ein Szenario verbunden.

Durch die Nutzung des EWMS beschränkt sich der Aufwand für die Staffelungsauswertung auf den EWMS-Programmstart (ca. 10 Sekunden), das Einlesen des Simulationsszenarios (je nach Komplexität 5 – 45 Sekunden) und die Ausführung des Staffelungsreports (Laufzeit ca. 0,5 Sekunden). Neben dem substantiellen Zeitgewinn vermeidet die vollständig automatisierte Durchführung manuelle Fehler und sichert damit die Qualität der Ergebnisse.



**BILD 4: Departure-Departure-Staffelung als Histogramm**

In den Echtzeit-Simulationsumgebungen kommt die Staffelungsanalyse in geringerem Umfang zum Einsatz. Die Staffelung des ankommenden Verkehrs ist in der Regel durch das Verkehrsszenario vorgegeben. Wird ausschließlich IFR-Verkehr simuliert, so kann der Towerlotse die Staffelung nur beschränkt beeinflussen. Die Luftfahrzeuge sind bereits durch den Radarlotsen auf dem Endanflug gestaffelt. Der Towerlotse greift in der Regel nur noch durch Geschwindigkeitsänderungen oder die Erteilung bzw. Verweigerung der Landeerlaubnis in die Staffelung ein. In der Regel offenbart die Staffelungsanalyse für diesen Fall wenig aufschlussreiche Daten.

Wird im Szenario jedoch zusätzlich VFR-Verkehr simuliert, so ist die Analyse der Anflugstaffelung von großem Interesse. Zum Einen sind hier Lotsenfehler als Indikator für eine Überbelastung deutlich sichtbar (z.B. Unterschreitung des Staffelungsmindestabstands). Zum Anderen

kann die Effizienz der Staffelung Hinweise auf die Vor- und Nachteile neuer Unterstützungssysteme (z.B. CPDLC, DMAN, etc.) oder neuer Luftverkehrskonzepte liefern.

Die Staffelung des abfliegenden Verkehrs und der gesamten Bahnbelegung wird im Bereich der Echtzeit-simulation zur Auswertung der effizienten Verkehrs-abwicklung verwendet. Insbesondere der Faktor Queue-Zeit aus der Flugphasenanalyse kann hier zusätzlich wertvolle Informationen liefern. Ergeben sich zum Beispiel lange Queue-Zeiten und große Lücken in der Bahn-belegung, so ist dies ein deutliches Zeichen für eine ineffiziente Verkehrsabarbeitung. Das zu untersuchende System oder das neue Luftverkehrskonzept belasten den Lotsen so stark, dass eine effiziente Abwicklung nicht möglich ist. Ergeben sich aber im Vergleich zum Basisszenario eine bessere Bahnauslastung und kürzere Staffelungsabstände mit geringen Queue-Zeiten, so ist das Luftverkehrskonzept effektiv und ermöglicht dem Lotsen eine schnellere Abarbeitung des Verkehrs.

### 3.2. Flugphasen

Die Zuordnung der simulierten Flugabschnitte zu einheitlichen Flugphasen ermöglicht eine Reihe detaillierter Betrachtungen, die für eine Vielzahl von Fragestellungen von Bedeutung sind. Aktuell werden für die verschiedenen in der Datenbank abgelegten Flugphasen Mittelwerte berechnet und getrennt nach Arrivals und Departures dargestellt (siehe BILD 5). Da auch Verzögerungen am Boden und in der Luft als Flugphasen modelliert werden, können die gemittelten Verspätungswerte ebenfalls direkt abgelesen werden.

Entsprechende Mittelwerte waren in der Standard-Auswertung der für Schnellzeit-Simulationen hauptsächlich eingesetzten Software Simmod zwar bereits verfügbar, jedoch nur als tabellarische Werte für das gesamte Szenario. Die umfangreichen Filter-Einstellungen des EWMS erlauben nunmehr eine präzise Abfrage auch für Teilbereiche der erhobenen Daten. Daneben entfallen manuelle Arbeitsschritte zur Aufbereitung der Ergebnisse in Diagrammen.

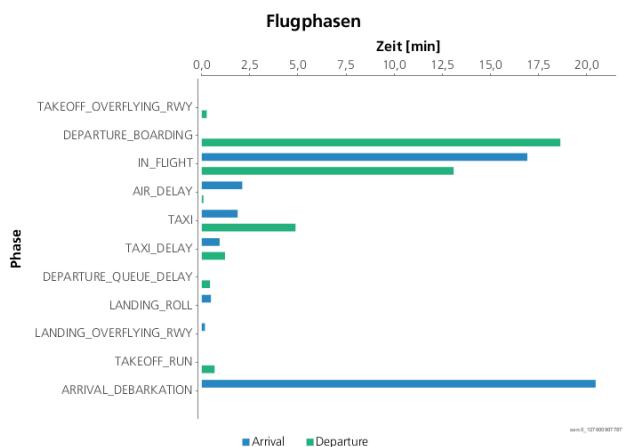


BILD 5: mittlere Dauer von Flugphasen

Im Bereich der Echtzeit-Simulation wird die Flugphasen-Auswertung speziell im Bereich des Apron und Tower Simulator (ATS) eingesetzt. Im ATS werden Luftverkehrs-abläufe auf dem Boden und im Flughafennahrbereich

untersucht. In diesem Zusammenhang stellen insbesondere die Rollzeit und die Zeit in der Departure Queue Schlüsselindikatoren dar ([7], [8]).

Die Departure Queue bezeichnet die wartenden Luftfahrzeuge am Ende des Rollwegs, vor dem Startbahnhkopf. Sie dient dem Fluglotsen als Werkzeug zur gleichmäßigen Startbahnauslastung. Im Allgemeinen stellt die Departure Queue aber für alle Beteiligten am Luftverkehr ein Problem dar:

- Die Luftfahrzeuge haben durch die Queue zusätzliche Wartezeiten, in denen sie Treibstoff verbrauchen.
- Die Zeitplanung der Flughafenbetreiber, Airline-Verantwortlichen und der Luftverkehrskontrolle wird durch die zusätzliche Wartezeit gefährdet.
- Durch den Rückstau kann es zu Störungen in der Abwicklung des Rollverkehrs kommen.

Folglich ist eine möglichst geringe Queuezeit für die Luftfahrzeuge wünschenswert. Eine Analyse der untersuchten Luftverkehrskonzepte auf ihre Queue-Optimierung ist folglich von großer Bedeutung.

Da die Departure Queue als eigene Flugphase modelliert wurde, kann die Flugphasenauswertung direkt die mittlere Verweildauer eines Luftfahrzeugs in der Queue darstellen. Vergleicht man die Queue-Wartezeit des Basis-Szenarios mit der Wartezeit, die für ein Alternativ-Szenario ermittelt wurde, so lässt sich eine erste Aussage über die Effizienz der Schnittstelle zwischen Start- und Landebahnsystem und dem Rollwegesystem geben.

Auch die Rollzeit und Rollverzögerungen sind als eigene Fluphasen in der Datenbank abgelegt, so dass auch hier die entsprechenden Mittelwerte unmittelbar dargestellt werden können. Beide Werte stellen wichtige Indikatoren für die Effizienz des Rollwegesystems und der Abarbeitung des Verkehrs dar. Wird das gleiche Verkehrsszenario mit unterschiedlichen Konzepten durchgeführt, so deuten zum Beispiel lange Stopzzeiten auf eine ineffiziente Abarbeitung des Rollverkehrs hin. Die Dokumentation erfolgt dann durch eine Darstellung der Diagramme für beide Varianten im Abschlussbericht.

	Arrival	Departure
TAKEOFF_OVERFLYING_RWY	0,0	0,3
DEPARTURE_BOARDING	0,0	18,6
IN_FLIGHT	16,9	13,1
AIR_DELAY	2,1	0,1
TAXI	1,9	4,9
TAXI_DELAY	0,9	1,2
DEPARTURE_QUEUE_DELAY	0,0	0,4
LANDING_ROLL	0,5	0,0
LANDING_OVERFLYING_RWY	0,2	0,0
TAKEOFF_RUN	0,0	0,7
ARRIVAL_DEBARKATION	20,5	0,0

BILD 6: tabellarische Darstellung der mittleren Flugphasen-Länge

Neben der grafischen Auswertung werden die Werte auch tabellarisch dargestellt (siehe BILD 6). Weiterhin können für jeden einzelnen Flugplan die detaillierten Zeiten nach Flugphase aufgeschlüsselt in eine Excel-Datei exportiert

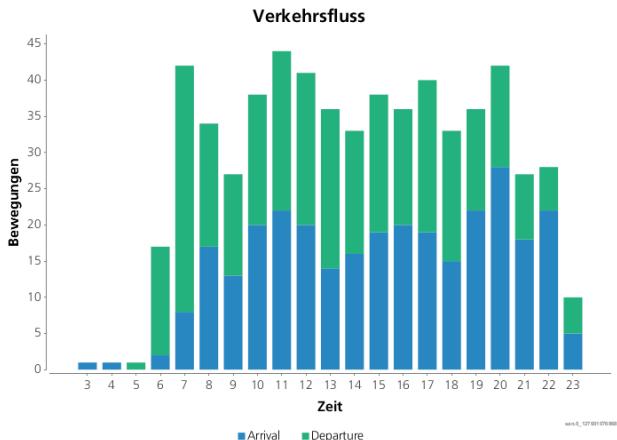
werden, um weitere Auswertungen außerhalb des EWMS zu ermöglichen.

Die Flugphasen-Auswertung wurde bislang noch nicht für die Analyse von Verkehrsprozessen im Luftraum verwendet. Mit der Anbindung an die Simulationsumgebung NARSIM für den Air Traffic Management and Operations Simulator (ATMOS) wird diese Auswertung aber in naher Zukunft an Bedeutung gewinnen.

### 3.3. Verkehrsaufkommen

Ein Fokus der Auswertung von Schnellzeitsimulationen liegt auf der Untersuchung von Flughafenkapazitäten, also der Fähigkeit eines Bahn- und Rollwegesystems, eine bestimmte Menge von Flugbewegungen pro Zeiteinheit abarbeiten zu können [2]. Daher ist die Bewertung der in einer Simulation realisierten Verkehrsflüsse ein integraler Bestandteil vieler Auswertungen.

Für die Bestimmung der Verkehrsflüsse werden wiederum die in der Datenbank abgelegten Start- und Landezzeiten (ATOT, ALDT) herangezogen. Diese werden stundenweise aufsummiert und können anschließend in verschiedenen Diagrammen visualisiert werden.

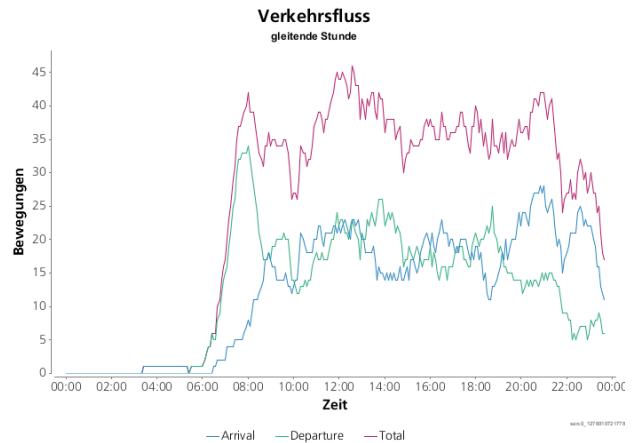


**BILD 7:** stundenweiser Verkehrsfluss

Die stundenweise Darstellung ermöglicht einen schnellen Überblick über das Verkehrsaufkommen (siehe BILD 7).

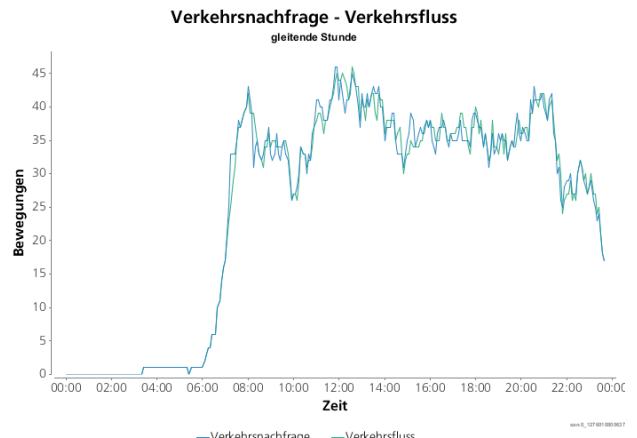
Ein genauerer Einblick ist bereits mit der Darstellung des Verkehrsaufkommens nach gleitender Stunde möglich (siehe BILD 8). Hierfür wird in einem Zeitfenster von 3600 Sekunden die Anzahl der auftretenden Bewegungen aufsummiert. Daraufhin wird das Zeitfenster um fünf Minuten verschoben und die Auswertung erneut durchgeführt. Die sich ergebende große Menge an Datenpunkten ermöglicht eine detaillierte Darstellung des Verkehrsaufkommens.

Analog zur Auswertung der Verkehrsflüsse kann auch die Verkehrs nachfrage dargestellt werden. Hierfür werden die in der Datenbank abgelegten geplanten Start- und Landezzeiten (ETOT, ELDT) herangezogen. Verkehrs nachfrage und Verkehrsfluss lassen sich anschließend in einem Diagramm direkt vergleichen (siehe BILD 9).



**BILD 8:** Verkehrsfluss nach gleitender Stunde

Basierend auf der Auswertung nach gleitender Stunde können Pareto-Diagramme generiert werden. Die in 5min-Intervallen berechneten stündlichen Arrival- und Departure-Bewegungen werden paarweise zusammengefasst und jedes (Arrival, Departure)-Paar wird als Datenpunkt dargestellt (siehe BILD 10). Über die Helligkeit der einzelnen Datenpunkte wird die Häufigkeit des Auftretens einzelner (Arrival, Departure)-Paare kodiert [5].

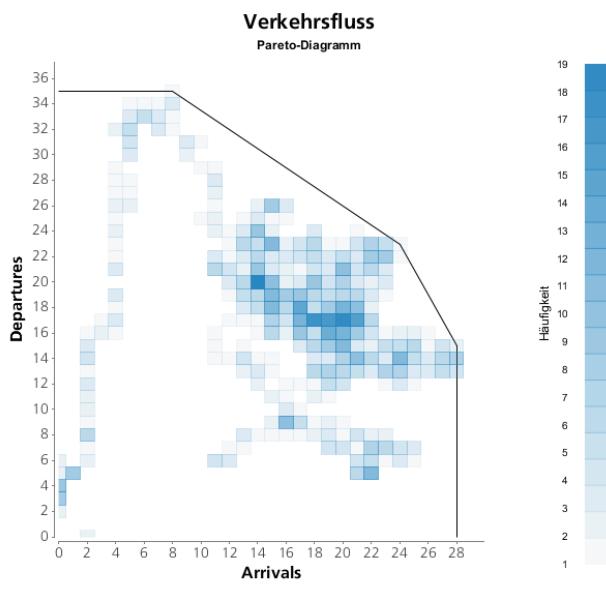


**BILD 9:** Vergleich von Verkehrs nachfrage und Verkehrsfluss

Die im Diagramm eingezeichnete Linie stellt die Pareto-Grenze dar, welche die Grenzkapazität der untersuchten Bahnkonfiguration bezeichnet [4]. Derzeit ist die Aussagekraft dieser Darstellung begrenzt, da ggf. auch Datenpunkte mit exzessiven Verzögerungen einbezogen werden. Eine Einschränkung auf Datenpunkte unterhalb eines konfigurierbaren Verspätungs niveaus befindet sich derzeit in Entwicklung.

Für die verschiedenen Auswertungen des Verkehrsaufkommens werden ausgewählte Werte jeweils auch in tabellarischer Form dargestellt.

Die Verkehrsanalyse findet bisher in der Echtzeit simulation wenig Anwendung. Die Auswertung von Verkehrs nachfrage und Verkehrsfluss ist in der aktuellen EWMS-Version auf Stundenintervalle begrenzt, die insbesondere in langen Schnellzeitsimulationen mit Szenarien von bis zu 24 Stunden Anwendung finden.

**BILD 10: Pareto-Diagramm**

Die Szenarien in der Echtzeitsimulation sind deutlich kürzer. Sie reichen von 30 Minuten bis maximal zwei Stunden. Eine Auswertung des Stundenintervalls ist hier nicht sinnvoll. Für die Zukunft ist aber die Auswertung von kürzeren Intervallen (5-10 Minuten) geplant. Eine Darstellung dieses Zeitrahmens kann Aufschluss über die Abarbeitung des Verkehrs bringen. Insbesondere der Wechsel zwischen an- und abfliegendem Verkehr kann hier gut beobachtet werden.

Zusätzlich liefert diese Darstellung Informationen über die Prioritätssetzung des Lotsen. Wird beispielsweise versucht, der abfliegende Verkehr noch vor der nächsten Landung abzuarbeiten oder erhält der Anflug Priorität? Ebenso lässt sich im kombinierten Vergleich mit der Flugphasenanalyse identifizieren, ob der Fluglotse durch Mittel wie etwa die Runway-Queue einen gleichmäßigen Verkehrsfluss erzeugt oder ob er versucht, die Verkehrslastspitzen direkt abzuarbeiten.

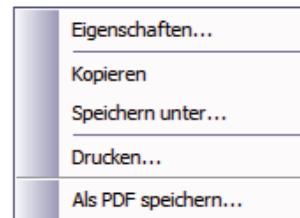
## 4. DIAGRAMMGENERIERUNG

### 4.1. Formatierung

Durch die Abstraktion der Simulationsdaten und die einheitliche Auswertung mit umfangreich getesteten und dokumentierten Algorithmen können simulationsübergreifend vergleichbare, einheitliche Diagramme erzeugt werden. Die Diagramme sind fertig konfiguriert und können direkt in Berichte übernommen werden. Es sind verschiedene Farbschemata einstellbar, die anhand der DLR-eigenen Corporate Design-Richtlinien implementiert wurden. Damit erhalten die Diagramme automatisch ein einheitliches Erscheinungsbild.

### 4.2. Export

Für jedes Diagramm steht ein Kontextmenü zur Verfügung, das neben dem Bearbeiten grundlegender Diagrammeigenschaften (Titel, Schriftarten, Ausrichtung, ...) das Kopieren oder Speichern des Diagramms im PNG-Format ermöglicht (siehe BILD 11).

**BILD 11: Diagramm-Kontextmenü**

Anschließend kann das Diagramm direkt aus der Zwischenablage heraus in einen Bericht eingefügt werden. Auch das Drucken einer hochauflösenden Version oder der Export als Vektorgrafik im PDF-Format sind jederzeit möglich.

### 4.3. Änderungsverfolgung

Bei der Diagramm-Erzeugung wird jedes Diagramm mit einer eindeutigen Diagramm-ID versehen, die unten rechts im Diagramm unauffällig integriert wird. Wird das Diagramm nun kopiert oder abgespeichert, so wird automatisch eine PDF-Datei erzeugt, die neben einer hochwertigen, auflösungsunabhängigen Vektorgrafik des Diagramms auch alle relevanten Metadaten wie den Namen des Bearbeiters, die Namen von Studie und Szenario sowie die Revisionsnummer enthält. Darüber hinaus werden auch die aktuellen Filter-Einstellungen erfasst und in der PDF-Datei dokumentiert.

Diese automatische Dokumentation ermöglicht es, anhand der in jedes Diagramm eingebetteten Diagramm-ID auch nachträglich jederzeit exakt nachzuvollziehen, auf welcher Datenbasis das jeweilige Diagramm basiert.

## 5. AUSBLICK

### 5.1. Visualisierung

Ein Großteil der im Institut verwendeten Simulationsumgebungen basiert auf einem Knoten-Link-Netzwerk der simulierten Flughafens und des umgebenden Luftraums. Derzeit befindet sich eine Darstellung in der Entwicklung, die dieses Knoten-Link-Netz grafisch darstellt. Ein Hintergrundbild, etwa eine Luftaufnahme oder eine CAD-Zeichnung kann der Darstellung hinterlegt werden. Darauf basierend sollen anschließend geeignete Diagramme generiert werden, welche eine Vielzahl von Parametern auf der Karte verorten können.

Für die Darstellung von Flugphasen bieten sich beispielsweise zweierlei Darstellungen an. Flugphasen, in denen das Luftfahrzeug sich nicht bewegt, können an den einzelnen Knoten des Knoten-Link-Netzes mit Hilfe von Blasendiagrammen visualisiert werden, um beispielsweise Verzögerungen direkt den Orten zuzuordnen, an denen sie entstehen. Bewegt sich das Luftfahrzeug hingegen, so ist der Bezug auf einzelne Knoten nicht sinnvoll. Hier ist geplant, eine Darstellung zu implementieren, die sich an den Links orientiert. Beispielsweise könnten die Strichstärke oder die Farbe einzelner Links verändert werden, um das Verkehrsaufkommen auf diesen Links darzustellen.

Eine prototypisch implementierte Auswertung von

Emissionen und Treibstoffverbrauch soll erweitert werden, um die Entstehung der Emissionen geografisch zu verorten. Auch diese Raster-Darstellung kann der Karten-darstellung überlagert werden.

## 5.2. weitere Simulationsumgebungen

Neben den bereits angebundenen Simulationssystemen Simmod PLUS! [10], Simmod PRO! [6], Simtool und Towsim sollen noch weitere im Institut für Flugführung eingesetzte Simulationsumgebungen in das EWMS integriert werden. Dazu gehören neben dem Schnellzeitsimulationstool AirTOp [11] auch die Echtzeit-Simulationsumgebung Narsim [12] sowie die institutseigene Entwicklung TrafficSim, die sowohl in Schnellzeit- wie auch in Echtzeitkontexten eingesetzt werden kann.

Mit der Einbindung weiterer Simulatoren und der damit einher gehenden breiteren Nutzerbasis werden auch weitere Auswertungen entstehen, die dann wiederum direkt in den bestehenden Simulationsumgebungen verfügbar sein werden.

## 5.3. Vergleichende Auswertungen

Die bisher implementierten Auswertungen beziehen sich auf jeweils ein einzelnes Simulations-Szenario. Für viele Fragestellungen müssen jedoch die Simulationsergebnisse aus zwei oder mehr Szenarien verglichen werden. Daher wird derzeit die EWMS-Architektur dahingehend erweitert werden, dass Auswertungen auf beliebig viele Szenarien angewendet und die Ergebnisse direkt in Bezug gesetzt werden können.

Die Datenbank-Architektur erlaubt bereits das parallele Vorhalten mehrerer Szenarien. Die Erweiterungen betreffen daher insbesondere den Workflow für die Auswahl der zu vergleichenden Szenarien, Erweiterungen der Report-Funktionalitäten um eine definierte Bereitstellung der Ergebnisse für den Vergleich sowie die Generierung von Tabellen und geeigneten Diagrammen.

## 6. ABKÜRZUNGEN

AIBT	Actual In-Block Time
ALDT	Actual Landing Time
AOBT	Actual Off-Block Time
ATOT	Actual Takeoff Time
ATMOS	Air Traffic Management and Operations Simulator
ATS	Airport- und Tower-Simulator
DBMS	Datenbank-Management-System
ELDT	Estimated Landing Time
ETOT	Estimated Takeoff Time

EWMS	Extensible Workflow Management for Simulations
IFR	Instrument Flight Rules
PDF	Portable Document Format
PNG	Portable Network Graphics
SQL	Structured Query Language
VFR	Visual Flight Rules

## 7. REFERENZEN

- [1] Scharnweber, A.; Schier, S.: EWMS – Extensible Workflow Management for Simulations, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2009, Aachen
- [2] Scharnweber, A.; Schier, S.: EWMS – Extensible Workflow Management for Simulations; Council of European Aerospace Societies 2009; Manchester
- [3] Horonjeff, R.; McKelvey, F. X.: Planning & Design of Airports, 4<sup>th</sup> Edition; McGraw-Hill; ISBN 0-07-045345-4; 1994
- [4] Gilbo, E. P.; "Airport capacity: representation, estimation, optimization", IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 1, no. 3; September 1993
- [5] Kellner, S.: Density Plots for Airport Capacity Assessment; Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2009, Aachen
- [6] Simpson , B.; Toussi, F.: HyperSQL User Guide, HSQL Development Group; Mai 2010
- [7] Biella, M.; Jakobi, J.; Ludwig, T.; Werner, K.; Morlang, F.; Schier, S.; Wehrstedt , C.; Lebbink, A.; Gilbert, A.; Duda, A.: Validation Test Plan PRG; Projektbericht. EMMA2 2-D6.1.3.; 2010
- [8] Kaltenhäuser, S.; Morlang, F.; Schier, S.; Hampe, J.: Untersuchung eines alternativen Vorfeldlayouts für den Flughafen Hamburg; DLR-Interner Bericht.;DLR-IB 112-2008/06; 2008
- [9] ATAC Corporation, Simmod PRO!, URL am 1.6.2010: [http://www.atac.com/Products\\_Research-a.html](http://www.atac.com/Products_Research-a.html)
- [10] ATAC Corporation, Simmod PLUS!, URL am 1.6.2010: [http://www.atac.com/Products\\_Airports-b.html](http://www.atac.com/Products_Airports-b.html)
- [11] Airtopsoft S.A.: URL am 1.6.2010: <http://www.airtopsoft.com/products.html>
- [12] NARSIM Simulation Platform, URL am 1.6.2010: <https://www.narsim.org/>