



# Masterarbeit

Entwicklung und Implementierung  
eines Konzepts zur Bestimmung und  
Darstellung von Unsicherheiten  
in der 4D-Trajektorienplanung

IB-Nummer 112-2012/25  
Zugänglichkeitsstufe A/I



**Institut für Flugführung**  
Direktor: Prof. Dr. Dirk Kügler

## Dokument Information

Zuständiger	
Projekt- / Abteilungsleiter:	Prof. Dr. Dirk Kügler / Dr. Thorsten Mühlhausen
Zuständiger Autor:	Paul Weitz
Weitere Autoren:	
Projekt / Zielfeld:	Masterarbeit
Zugänglichkeitsstufe:	AI (Offen)
Datei:	IB2012-25_Masterarbeit_Paul_Weitz.pdf
Version:	1.00
Speicherdatum:	2013-01-03
Gesamtseitenzahl:	107

© 2013 DLR, Institut für Flugführung

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung innerhalb und außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des DLR, Institut für Flugführung, unzulässig und wird zivil- und strafrechtlich verfolgt. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

## Änderungsverfolgung

<b>Version</b>	<b>Datum</b>	<b>Geänderte Seiten / Kapitel</b>	<b>Bemerkungen</b>
1.00	03.01.2013		

## Kurzfassung

Eine stetige Verbesserung von Sicherheit, Effizienz und Umweltfreundlichkeit gehört bei der Entwicklung zukunftsweisender Luftverkehrssysteme zu den primären Zielen. Um diese zu erreichen, basieren neuartige Flugführungskonzepte auf vorausgeplanten 4D-Flugtrajektorien. Diese können u.a. durch Fehler in den Prognosen der Einflussparameter ungenau sein. Aus diesem Grund müssen mit der Einführung trajektorienbasierter Flugsicherungskonzepte Softwaresysteme in der Lage sein, die Prognoseungenauigkeiten zum einen durch Bewertungsmetriken zu analysieren und zum anderen verständlich zu visualisieren.

Am Institut für Flugführung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt werden für die Forschung mit 4D-Trajektorien verschiedene Simulationssysteme (*TrafficSim*, *AirTOP*) als Untersuchungswerkzeuge eingesetzt. Hinsichtlich der Bewertung von Simulationsergebnissen wird in dieser Masterarbeit ein Konzept zur Bestimmung und Darstellung von Unsicherheiten in der Trajektorienplanung entworfen. Die Algorithmen werden in der Auswertungsumgebung „Extensible Workflow Management for Simulations“ (*EWMS*) implementiert und mit Hilfe von Simulationsszenarien validiert.

Die wichtigsten Einflussgrößen, die als theoretische Grundlage für das Konzept untersucht werden, umfassen Umweltparameter (Wind, Temperatur), Flugleistungsdaten (Gewicht, Geschwindigkeit) und die Navigationsgenauigkeit. Anhand eines Simulationsszenarios werden die Parameter in realistischen Wertebereichen variiert und über 2.000 verschiedene Flugtrajektorien berechnet. Die Unsicherheit einer Flugzeugposition wird sowohl zeitlich als auch räumlich mit Hilfe von Vektoren durch dreidimensionale Ellipsoide beschrieben. Zur informationstechnischen Verarbeitung werden die Fehlerdaten klassifiziert und Möglichkeiten zur Darstellung in Diagrammen und geografischen Systemen bewertet. Für die Visualisierung der skalaren Fehlergrößen in Diagrammen eignet sich *JFreeChart*. *NASA World Wind* wird zur Visualisierung von Trajektorienunsicherheiten im geografischen Bezugssystem verwendet. Das Konzept ist durch Java-Module in *EWMS* implementiert. Dies ermöglicht, dass Simulationen des *TrafficSim* eingelesen, Trajektorien verglichen und die Unsicherheiten sowohl in Form von *JFreeChart*-Diagrammen als auch in der 3D-*NASA World Wind* Umgebung visualisiert werden können. Die erarbeiteten Berechnungen und Visualisierungen bieten Möglichkeiten zur Analyse von trajektorienbasierten Luftverkehrskonzepten, dienen aber auch der Unterstützung von Flugsicherungsverfahren und der Entscheidungsfindung für Lotsen.

## Abstract

Future air traffic management relies on trajectory forecasting for higher safety, efficiency and environmental friendliness. The quality of trajectory predictions is subject to errors from a variety of sources. These errors in parameters cause inaccuracies in the calculations of the flight trajectories. Therefore the implementation of the future trajectory-based air traffic management requires decision support tools as well as reporting tools to analyse and predict uncertainties in actual flight paths.

The Institute of Flight Guidance of the German Aerospace Center is one of the leading establishments in the field of air traffic management research and conducts research with focus on trajectories based on simulation systems. These simulations at the German Aerospace Center are strongly focused on generating scientific data which are evaluated subsequent to the campaign. To be able to evaluate the simulations, this thesis deals with the development of a concept for the calculation and visualization of the trajectory prediction uncertainty. The concept will be implemented afterwards as a component into the evaluation environment "Extensible Workflow Management for Simulations" (*EWMS*) and validated using simulation scenarios. The most important factors for trajectory prediction, which are analysed for the theoretical concept, are meteorological parameters (wind, temperature), aircraft performance (weight, speed) and navigation performance. Finally, the thesis applies error analysis to a sample collection of over 2,000 flights under various environmental conditions.

The uncertainty of an aircraft position can be described in terms of temporal or spatial metrics by three-dimensional ellipsoids. For the processing in computer scientific systems the error data are classified and the ways of visualization in diagrams and geo systems are evaluated. For the representation of scalar errors charts generated by *JFreeChart*-Tool are suitable. The *NASA World Wind* is used for the geographical visualization of trajectories and their errors.

The concept implemented in the *EWMS* enables the user to load fast-time simulation results from the *TrafficSim*-tool, calculate and compare trajectory uncertainties, and to visualize the results in diagrams as well as in the 3D *NASA World Wind* environment. The developed calculation and visualization routines provide the ability to analyse trajectory-based air traffic management concepts, as well as to support decision-making in air traffic control.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>4</b>
<b>Abstract</b>	<b>5</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>10</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>11</b>
1.1. Motivation und Projektumfeld	12
1.2. Zielsetzung und Aufgabenstellung	15
1.3. Aufbau der Arbeit	16
<b>2. Grundlagen der 4D-Trajektorienplanung</b>	<b>18</b>
2.1. Strategisches und Taktisches Luftverkehrsmanagement	18
2.2. Trajektorienbasiertes Luftverkehrsmanagement	20
2.3. Einfluss des Trajektorienkonzepts auf die Bereiche der Luftfahrt	23
2.4. Simulation von Luftverkehrsszenarien	24
2.5. Unsicherheiten in der Trajektorienplanung	27
2.5.1. Definition	27
2.5.2. Ursachen	27
2.5.3. Stand heute	29
<b>3. Visualisierung von Unsicherheiten</b>	<b>34</b>
3.1. Umgang mit Unsicherheiten in der Informationswissenschaft	34
3.2. Frameworks	38
<b>4. Analyse und Entwurf</b>	<b>43</b>
4.1. Auswertungskonzept	43
4.2. Anforderungen an das Visualisierungsmodul	47
4.3. Trajektoriengenerierung und -bewertung	50
4.4. Berechnungsverfahren zur Trajektorienbewertung	54
4.4.1. Horizontale Abweichung der Flugroute	54
4.4.2. Vertikale Abweichung der Flugroute	61
4.4.3. Zeitliche Abweichung der Flugroute	62
4.5. Modell der Trajektorienabweichung	62
4.5.1. Modellierung der zeitlichen Planungsgenauigkeit	62
4.5.2. Modellierung der räumlichen Planungsgenauigkeit	64
4.6. Datenmodell	64
4.7. Betrachtungsgrenzen	65
4.8. Simulationsszenario zur Modulentwicklung	66
<b>5. Implementierung</b>	<b>72</b>
5.1. Software-Architektur	72

5.2. Anbindung des TrafficSim an EWMS . . . . .	74
5.3. Datenverwaltung . . . . .	76
5.4. Analyse von Trajektorienabweichungen . . . . .	77
5.5. Visualisierung . . . . .	81
5.5.1. Diagrammdarstellung mit JFreeChart . . . . .	81
5.5.2. Geo-Visualisierung mit NASA World Wind . . . . .	82
<b>6. Modulanwendung und Ergebnisse</b>	<b>85</b>
6.1. Anwendungsbeispiel . . . . .	85
6.2. Interpretation der Ergebnisse . . . . .	88
<b>7. Zusammenfassung und Fazit</b>	<b>94</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>97</b>

## Abbildungsverzeichnis

1.1. Beispiel einer 4D-Flugtrajektorie . . . . .	11
1.2. Flugphasenmodell für ATM Simulationen . . . . .	12
1.3. System zur Planung und Analyse der Sektorkapazitäten . . . . .	13
1.4. Die Auswertungsumgebung EWMS . . . . .	15
2.1. Prozessschritte des aktuellen Luftverkehrsmanagements . . . . .	19
2.2. Formblatt eines Flugdurchführungsplans . . . . .	20
2.3. Kommunikation von Fluganweisungen . . . . .	21
2.4. Innovatives Anflugverfahren Point Merge . . . . .	23
2.5. <i>TrafficSim</i> ; Beispielszenario mit Anflug auf Airport Frankfurt a.M. . . . .	25
2.6. Einflussfaktoren auf die Qualität der Trajektorienprognose . . . . .	27
2.7. Definierte Navigationsleistung . . . . .	29
2.8. Anforderungen an die Navigationsleistung in den Flugphasen . . . . .	30
2.9. Darstellung von Sektorunsicherheit . . . . .	31
2.10. Anzahl Konflikte pro Stunde . . . . .	32
2.11. Zeitliche Unsicherheit für Top of Descent . . . . .	32
2.12. Visualisierung einer Trajektorie von EUROCONTROL . . . . .	33
3.1. Klassifizierung von kartografischen Daten . . . . .	35
3.2. Darstellung von Abweichungen durch Boxplot . . . . .	36
3.3. Darstellung von Abweichungen durch Quantile-Plot . . . . .	36
3.4. Darstellung von Unsicherheiten durch Transparenz und Farbsättigung . . . . .	37
3.5. Linien- und Balkendiagramm mit <i>JFreeChart</i> . . . . .	39
3.6. Geo-Kodierung mit <i>ArcGIS</i> . . . . .	41
3.7. Darstellung von Flächen und Figuren mit <i>NASA World Wind</i> . . . . .	42
4.1. Phasen des Auswertungsprozess . . . . .	44
4.2. Visualisierung von Unsicherheiten durch Ellipsoide . . . . .	45
4.3. Trajektorienrepräsentation durch das Point-Transit-Modell . . . . .	46
4.4. Auswertungsprozess A . . . . .	47
4.5. Auswertungsprozess B . . . . .	48
4.6. Konzeptionelle Datenbankanfrage . . . . .	48
4.7. Unsicherheit bei unterschiedlichen Steigprofilen . . . . .	52
4.8. Berechnung der räumlichen Abweichung zwischen zwei Trajektorien . . . . .	53
4.9. Fehlervektoren bei der räumlichen Abweichung . . . . .	53
4.10. Berechnung der zeitlichen Abweichung zwischen zwei Trajektorien . . . . .	54
4.11. Bewertung der Planungsgenauigkeit (planare Trigonometrie) . . . . .	55
4.12. Bezeichnungen in der sphärischen Trigonometrie (Kugeldreieck) . . . . .	58
4.13. Bewertung der Planungsgenauigkeit (sphärische Trigonometrie) . . . . .	59
4.14. Vertikale Trajektorienabweichung . . . . .	61
4.15. Modellierung der Navigationsfehler nach Gaußscher Normalverteilung . . . . .	63
4.16. Longitudinaler Fehler . . . . .	64

4.17. Relevante Tabellen aus der <i>EWMS</i> -Datenbank . . . . .	65
4.18. Karte des oberen Luftraums . . . . .	67
4.19. Standard-Abflugkarte Hamburg . . . . .	67
4.20. Meteorologische Angaben in einem Luftraumsegment . . . . .	68
4.21. Simulation von EDDH nach EDDM im <i>TrafficSim</i> . . . . .	69
4.22. Anflug auf den Flughafen München im <i>TrafficSim</i> . . . . .	70
5.1. Modulares <i>EWMS</i> -Konzept . . . . .	73
5.2. Vereinfachtes Klassendiagramm des <i>TrafficSim</i> -Parsers . . . . .	76
5.3. Algorithmus der Simulationsdatenverarbeitung . . . . .	77
5.4. Benötigte Daten . . . . .	77
5.5. Klassendiagramm der Trajektorienauswertung in <i>EWMS</i> . . . . .	79
5.6. Auswertungsprozess im Sequenzdiagramm . . . . .	80
5.7. Zeitliche Abweichung des Szenarios als skalare Größe . . . . .	82
5.8. Vertikale Abweichung des Szenarios als skalare Größe . . . . .	82
5.9. Anflugtrajektorien in <i>NASA World Wind</i> . . . . .	83
5.10. Unsicherheiten durch Ellipsoide beim Abflug auf München . . . . .	84
6.1. <i>EWMS</i> -Startbildschirm . . . . .	85
6.2. Ausführen einer Diagramm-Auswertung . . . . .	86
6.3. Exportieren der Ergebnisse in einer Tabelle . . . . .	87
6.4. Ausführen einer NWW-Auswertung . . . . .	87
6.5. Vertikaler Fehler bei Gewichtsabweichungen . . . . .	89
6.6. Vertikaler Fehler in NWW bei Gewichtsabweichungen . . . . .	89
6.7. Zeitliche Unsicherheit bei Geschwindigkeitsabweichungen . . . . .	90
6.8. Zeitlicher Fehler bei Abweichung der Windrichtung . . . . .	91
6.9. Longitudinaler Fehler bei Abweichung der Windrichtung . . . . .	91
6.10. Horizontaler Fehler bei Änderung der seitlichen Windstärke . . . . .	92
6.11. Unsicherheiten im Anflug bei Änderung der seitlichen Windstärke . . . . .	92
6.12. Zeitliche Unsicherheit bei Temperaturänderungen . . . . .	93

## Tabellenverzeichnis

2.1. Flugplandaten für ein <i>TrafficSim</i> -Szenario . . . . .	26
2.2. ICAO-Standardatmosphäre . . . . .	28
3.1. Datensammlungen mit den kompatiblen Diagrammtypen . . . . .	39
4.1. Metrik zur Bewertung von Trajektorienabweichungen . . . . .	46
4.2. Variation der Eingabeparameter . . . . .	70
5.1. Parameter der <i>TrafficSim</i> Ergebnisse . . . . .	75
5.2. Abhängige und unabhängige Variablen . . . . .	78

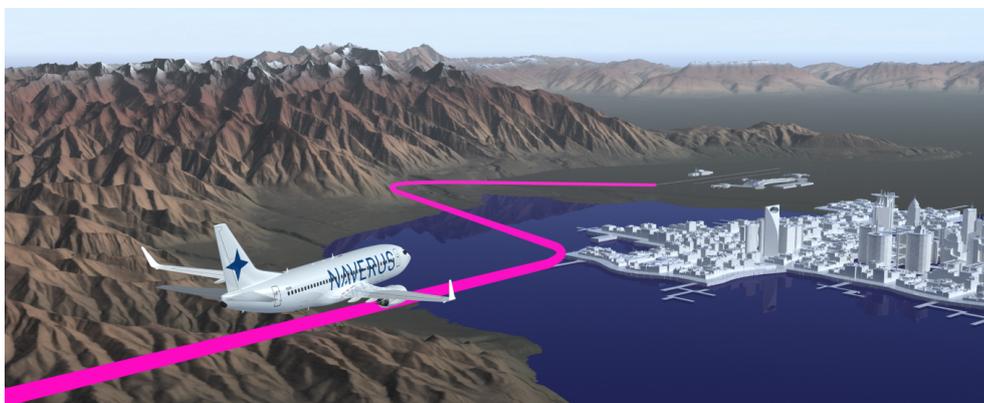
## Abkürzungsverzeichnis

AIP .....	Aeronautical Information Publication (Luftfahrthandbuch)
ATM .....	Air Traffic Management
ARC .....	Ames Research Center
BADA .....	Base of Aircraft Data
CAS .....	Calibrated Air Speed (korrigierte Fluggeschwindigkeit)
CM .....	Center Monitor
DFS .....	Deutsche Flugsicherung
DLR .....	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DST .....	Decision Support Tool
EUROCONTROL .....	European Organisation for the Safety of Air Navigation
EWMS .....	Extensible Workflow Management for Simulations
FAA .....	Federal Aviation Administration
FMS .....	Flight Management System
ft .....	Fuß (foot) (1 ft = 0,3048 m)
GIS .....	Geo Informations System
GML .....	Geography Markup Language
GS .....	Ground Speed (Geschwindigkeit über Grund)
ICAO .....	International Civil Aviation Organization
kn .....	Knoten (1 kn = 1 NM/h = 1,852 km/h)
MOT .....	Mid of Turn
NASA .....	National Aeronautics and Space Administration
NWW .....	NASA World Wind
NM .....	Nautische Meile (1 NM = 1,852 km)
RNP .....	Required Navigation Performance
SESAR .....	Single-European Sky Air Traffic Management Research
SOT .....	Start of Turn
TAS .....	True Air Speed (tatsächliche Fluggeschwindigkeit)
TOC .....	Top of Climb (Übergang vom Steig- in den Reiseflug)
TOD .....	Top of Descent (Übergang vom Reise- in den Sinkflug)
TMA .....	Terminal Maneuvring Area (Flughafennahbereich)
VAFORIT .....	Very Advanced Flight Data Processing Operational Requirement Implementation

## 1. Einleitung

Das Institut für Flugführung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt forscht schwerpunktmäßig im Bereich des Luftverkehrsmanagements. Das jährliche Wachstum des Luftverkehrs wird nach Eurocontrol [1] bis 2030 auf etwa 3% prognostiziert. Aktuell und vor allem in der Zukunft wird es im Luftraum hohe Kapazitätsauslastungen geben, vorwiegend für An- und Abflugstrecken im Flughafennahbereich. Um die Kapazitäten effektiver ausnutzen zu können und damit Verspätungen zu vermeiden, sind Positionen und Routen der Flugzeuge so exakt wie möglich im Voraus zu definieren. Das bedeutet, durch Vorhersage der Position eines Flugzeugs zu einem bestimmten Zeitpunkt können die Sektorzuweisungen, Ab- und Anflugreihenfolgen effizienter bestimmt werden.

In aktuellen Forschungsansätzen wird die beschriebene Verwendung der vorausgeplanten Flugrouten im Air Traffic Management (ATM) untersucht, den sog. 4D-Trajektorien. Als Trajektorie wird die vierdimensionale Beschreibung eines Flugwegs durch Flugspurpunkte sowohl in der Luft als auch am Boden bezeichnet. Jeder Spurpunkt ist eindeutig durch vier Dimensionen bestimmt: die geografische Position (Latitude, Longitude), die Flughöhe (Altitude) und die Zeit (siehe Abbildung 1.1). Aus der Spur können weitere Werte wie die Geschwindigkeit oder die Beschleunigung berechnet werden.

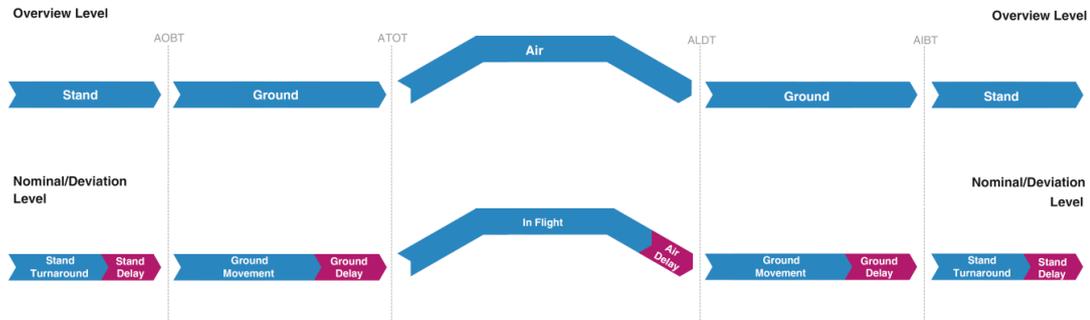


**Abbildung 1.1.:** Beispiel einer 4D-Flugtrajektorie [2]

Um die entwickelten Konzepte zu analysieren, werden im DLR u.a. verschiedene Simulationssysteme als Untersuchungswerkzeuge eingesetzt. Die Abteilung Luftverkehrssysteme des DLR Braunschweig betreibt eine Reihe von Schnellzeitsimulatoren wie z.B. *TrafficSim* und *AirTOP*. Diese Simulatoren berechnen 4D-Trajektorien vom Start- zum Zielflughafen anhand von Prognosen über Wind, Temperatur, Gewicht, Flugleistung etc.

Zur Bewertung eines Flugs, wird dieser in einzelne Abschnitte unterteilt, denen eine Reihe notwendiger aber auch optionaler Flugphasen zugeordnet werden (siehe Abbildung 1.2). Demnach beginnt der Flug mit den Bodenbewegungen von der Parkposition zur Startbahn (Push-Back, Taxi-Out, Line-Up). Anschließend werden die Phasen in der Luft (Climb, Cruise,

Approach) durchgeführt und der Flug endet am Zielflughafen mit den Bewegungen von der Landebahn zur Parkposition (Landing-Roll, Taxi-In). Die Phasenübergänge werden durch entsprechende Events gekennzeichnet, z.B. beschreibt der Top of Climb (TOC) den Übergang vom Steigflug in den Reiseflug.



**Abbildung 1.2.:** Flugphasenmodell für ATM Simulationen [3]

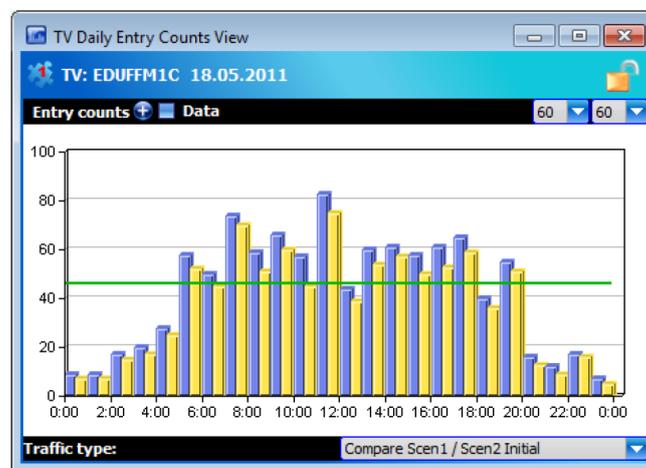
Die Flugsicherung weist den Flugzeugen, in den Phasen, für jeden Zeitpunkt einen konfliktfreien begrenzten 3D-Luftraum zu. Allerdings kann sich die geplante Trajektorie für einen Flug entlang des zeitlichen Planungshorizonts aufgrund von Umwelteinflüssen oder ungenauen Vorhersagen der Airlines zum Gewicht, Treibstoffverbrauch oder Triebwerksleistung ändern. Diese Planungsunsicherheiten der Trajektorie können Abweichungen in der Flugbahn und letztendlich Verletzung des konfliktfreien Raums zur Folge haben. Diese Abweichung gilt es zu analysieren und den Lotsen, Piloten oder Wissenschaftlern durch geeignete Darstellungen kenntlich zu machen. Ein effizienteres ATM und die Konfliktfreiheit zu anderen Luftfahrzeugen kann nur garantiert werden, wenn der Korridor trotz einbezogener Planungsunsicherheiten vom Flugzeug eingehalten wird.

## 1.1. Motivation und Projektumfeld

Der Flugweg eines Luftfahrzeugs wird konventionell durch Fluglotsen mit Hilfe von Radarsystemen kontrolliert. Dabei kontrolliert der Lotse einen zugewiesenen Luftraum, der durch eine Höhenebene und ein räumliches Gebiet definiert ist. In diesem Sektor prognostiziert der Lotse anhand der groben Strecke die Flugbahn nach eigenem Wissen. Die Sicherheit und Steuerung dieses Verfahrens basiert auf dem Einhalten von Separationen zwischen Flugzeugen. Die Flugmanöver werden in der sog. taktischen Flugführung durch Anweisungen des Lotsen gesteuert. Bei diesem Flugsicherungsverfahren ist die Vorhersage eines Fluglotsen unpräzise, sodass die Separation zwischen den Luftfahrzeugen, mit bspw. 3 – 5 Nautischen Meilen (NM) horizontaler Separation im Cruise, relativ groß definiert ist, um die Sicherheit des Luftverkehrs zu gewährleisten. Folge der großen Separationen sind Kapazitätsengpässe im Luftraum. [4]

Eine weitere Ursache, die zu Kapazitätsengpässen führt, sind die hohen Arbeitslasten der Lotsen. Je nach Sektorkomplexität und Berufserfahrung der Lotsen können maximal 70 – 85 Flugzeuge pro Stunde in einem Sektor bedient werden. Bei hoher Verkehrsdichte

und Überschreitung der Kapazitätsgrenze können möglicherweise keine weiteren Flugzeuge in ihrem zuständigen Luftsektor bearbeitet werden. Ist bei einem Luftraumsektor die Kapazitätsgrenze erreicht, werden keine Freigaben für Flüge erteilt, die den Sektor durchfliegen wollen. Um die Sicherheit des Luftverkehrs zu wahren, müssen diese Flugzeuge den Start am Flughafen verschieben, bis sich die Auslastung verringert hat. Infolge solcher Kapazitätsprobleme im *en-route* Bereich müssen aktuell ca. 5 % aller europäischen Flüge am Flughafen warten [5]. Als Planungshilfe wird die erwartete Kapazitätsauslastung pro Stunde für Sektoren im Voraus definiert und auf Center Monitoren (CM) als Entscheidungshilfe für den verantwortlichen Supervisor angezeigt (siehe Abbildung 1.3). Aufgrund von Unsicherheiten in der Routenplanung können Sektorlasten nur ungenau prognostiziert werden. Die Überbelastungen des Verkehrsraums können letztendlich nur mit Hilfe genauerer Vorhersagen des Flugwegs vermieden werden. [5]



**Abbildung 1.3.:** System zur Planung und Analyse der Sektorkapazitäten (Verkehrsprognose in blau, tatsächlicher Verkehr in gelb) [6]

Um die Kapazitätsengpässe zu vermeiden, müssen die Position und Flugbahn eines Luftfahrzeugs vor dem Start so genau wie möglich bestimmt werden. Infolge dessen ist es möglich, die Separationen zwischen Flugzeugen zu reduzieren um somit eine effizientere Aufteilung des Luftraums zu erreichen. Genauere Vorhersagen der Flugpositionen können durch vorberechnete Flugtrajektorien getroffen werden. Das bedeutet, Fluglotsen erhalten nicht nur Informationen über die aktuelle Position eines Flugzeugs, sondern eine genaue Prognose der geplanten und vorberechneten Route bis zum Zielflughafen. 4D-Trajektorien bergen ein großes Potential für die Erhöhung von Effizienz, Umweltfreundlichkeit und Planbarkeit des Luftverkehrs, weil sie mit hoher Genauigkeit auf spezielle Flugeigenschaften, Wetterbedingungen (z.B. Rückenwind) und Umwelteinflüsse (z.B. lärmsensitive Wohngebiete) optimiert werden können. Zusätzlich ist es möglich, potentielle Konflikte (Incidents) weit im Voraus zu erkennen. Mit den genau geplanten Flugwegen können im Luftverkehrsmanagement neuartige Steig- und Sinkprofile umgesetzt werden und zeitgleiche Anflüge auf parallelen Bahnen geplant werden. Auf diese Weise tragen 4D-Trajektorien zu einer Erhöhung der Verkehrsdichte und damit zu einer deutlich besseren Kapazitätsausnutzung bei. [7] Des Weiteren kann durch die Trajektorie ein kontinuierliches Monitoring über den geplanten Flugweg geführt werden.

Die Effektivität des neuen Trajektorienkonzepts ist von der Korrektheit der Parameterprognosen abhängig. Es spielt jedoch nicht nur die Genauigkeit der Berechnung eine Rolle, sondern zur Steigerung der Wirksamkeit muss auch die Planungsunsicherheit identifiziert werden. Je eher ein Lotse über mögliche Abweichungen von der beabsichtigten Trajektorie Informationen erhält, desto schneller können Strategien zur Behandlung der Unsicherheit und damit verbundenen Auswirkungen entwickelt und angewendet werden.

Wie wichtig die Qualität der Trajektorienprognose ist, belegt eine Untersuchung von Federal Aviation Administration (FAA) und Deutsche Flugsicherung (DFS) [8]. Darin wurde der Betrieb des Flugsicherungssystems *VAFORIT* (Very Advanced Flight Data Processing Operational Requirement Implementation) analysiert und erkannt, dass die meisten Konfliktwarnungen direkt aus Abweichungen von der prognostizierten 4D-Trajektorie resultieren. Ist die mögliche Deviation schon vorher bekannt, kann ein Incident frühzeitig registriert werden. Mögliche Konflikte zwischen zwei Luftfahrzeugen müssen nur dann gelöst werden, wenn es auch mit großer Wahrscheinlichkeit zu einem Konflikt kommen könnte. Aktuell muss durch die ungenaue Planbarkeit frühzeitig durch Ausweichmanöver auf Zwischenfälle reagiert werden, obwohl es in vielen Fällen zu keiner Separationsunterschreitung gekommen wäre. Die teilweise unnötigen Strategien zur Konfliktvermeidungen erhöhen den Kerosinverbrauch und folglich die Umweltbelastung. [8, 9]

Ein weiteres Forschungsgebiet in der Trajektorienplanung beschäftigt sich mit den sog. „Green Trajectories“. Dabei sollen durch umweltschonende Flugwege Schadstoff- und Lärmbelastungen reduziert werden. Erreicht wird ein solcher Flugweg durch entsprechende Höhen- und Geschwindigkeitsprofile oder durch möglichst direkte Flüge. Präzise Anflugtrajektorien können durch direktere Anflugrouten zur Verringerung von Fluglärm und Abgasen beitragen. Damit erhöhen Unsicherheiten in der Positionsvorhersage Umwelteinflüsse wie Lärmbelastung und Abgase. [10] In diesem Zusammenhang wird eine Möglichkeit gesucht, die Einhaltung von Flugprofilen in Abhängigkeit von Planungsungenauigkeiten visuell bewerten zu können.

Die Unsicherheit der geplanten Trajektorie und die damit verbundenen Abweichungen stellen somit ein Problem für die Effizienz und Planbarkeit des Luftverkehrs dar. Das europäische Luftfahrtprojekt Single European Sky Air Traffic Management Research (SESAR) beinhaltet viele fortschreitende Arbeiten für die Verringerung der Arbeitslast der Lotsen, zur Steigerung der Kapazität und zur Verringerung von Umwelteinflüssen durch den Einsatz von 4D-Trajektorien. In SESAR sollen nachhaltige Entwicklungen des Luftverkehrs in Europa vorangetrieben werden. Auch die in dieser Masterarbeit untersuchte Problematik des Flugwegemanagements zählt zu den untersuchten Konzepten von SESAR. Der Master Plan des Projekts wurde im März 2009 offiziell durch den Europäischen Rat genehmigt. Unter der Bezeichnung „Moving from Airspace to 4D Trajectory Management“ beinhaltet das Vorhaben den Ansatz der Gate-zu-Gate Trajektorienplanung für eine globale Sicht und Steuerung eines Flugs und nicht wie bisher sektorbezogen. [11]

Werkzeuge zur Entscheidungsfindung<sup>1</sup> werden in Zukunft den betroffenen Akteuren im ATM immer mehr unterstützende Informationen bieten. So müssen, zur dauerhaften

---

<sup>1</sup>decision support tools (DST)

Umsetzung der 4D-Trajektorien, Methoden und Werkzeuge zur Erstellung, dem Betrieb und der Analyse von Trajektorien entwickelt und getestet werden. Auf diesem Gebiet ergibt sich u.a. die offene Fragestellung zur Planungsgenauigkeit der Trajektorie und dessen Einhaltung im Flug. [12] In dieser Masterarbeit wird die Problematik zur Darstellung und Analyse von Trajektorien und den dazugehörigen Ungenauigkeiten untersucht.

## 1.2. Zielsetzung und Aufgabenstellung

Im Forschungsbereich der Flugtrajektorienplanung müssen Analysetools in der Lage sein, Verkehrsszenarien zu bewerten und in Abhängigkeit von Parametern (Wetter, Wind, Luftraum) zu analysieren. Am Institut für Flugführung des DLR wurde bereits die Auswertungsumgebung „Extensible Workflow Management for Simulations“ (*EWMS*) entwickelt (siehe Abbildung 1.4). Im Rahmen von *EWMS* werden standardisierte Auswertungsalgorithmen konzipiert, entwickelt und implementiert. Zur Bewertung von Veränderungen der Flugtrajektorie und der damit verbundenen Unsicherheit in der Planung stehen aktuell noch keine Routinen in *EWMS* zur Verfügung.

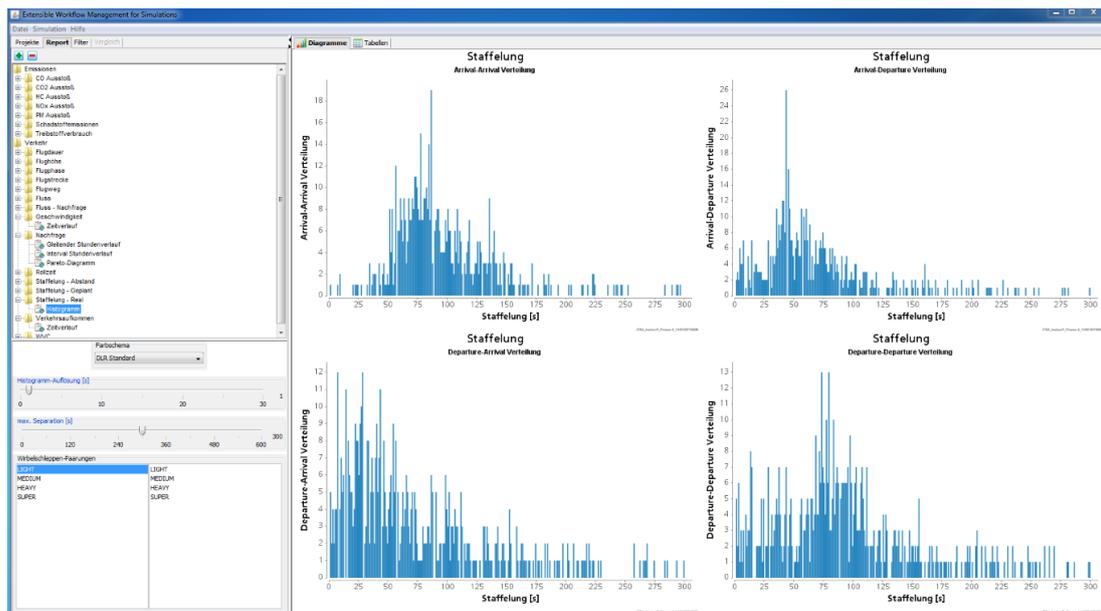


Abbildung 1.4.: Die Auswertungsumgebung EWMS

Im Rahmen dieser Masterarbeit ist ein Konzept zur Bestimmung und Darstellung von Unsicherheiten in der Trajektorienplanung zu entwerfen und zu implementieren. Die Basis für die Entwicklungen soll durch simulierte Flugversuche ausgearbeitet werden, um Einflüsse der Parameter auf die Flugspur zu messen. Auf den Messungen aufbauend soll ein Display zur Visualisierung verschiedener physikalischer Werte konstruiert werden. Dem Wissenschaftler soll es ermöglicht werden, mit Hilfe der Darstellung physikalische Größen der Flugtrajektorien zueinander in Beziehung zu bringen, um neue Zusammenhänge zu erkennen. Bspw. soll die Exaktheit einer zeitlichen Vorhersage für ein bestimmtes Ereignis wie z.B. Top of Climb (TOC), Top of Descent (TOD), Merge Point, Touch Down interpretierbar

gemacht werden. Zudem kann die räumliche Abweichung der tatsächlichen Flugspur von der geplanten Trajektorie zu einem bestimmten Zeitpunkt erfasst werden. Außerdem soll das Konzept ein Verfahren beinhalten, um die Einflüsse einer Veränderung der geplanten Trajektorie auf anderen Elementen des ATM-System in Relation zu bringen. So kann die Flugsicherung durch die simulierte Abweichung die Trajektorie in Beziehung zu anderen vorhandenen Abflügen stellen, Anflugsequenzen kontrollieren oder wetterbedingte Routenführung beeinflussen.

- Wie exakt gibt die prognostiziert Trajektorie die zukünftige Position an?
- Welche Flugzeuge werden im Umkreis des Korridors beeinflusst?

Für diese Fragestellungen gilt es ein Tool zu entwickeln, welches die Analyse der Problemstellungen vereinfacht. Das bedeutet, dass die horizontale, vertikale und temporale Planungsunsicherheit durch geeignete Darstellung interpretierbar ist. Die Größen sollen quantitativ, durch Tabellen oder Diagramme und visuell durch geografische Darstellung, analysierbar sein. In dieser Masterarbeit soll das entwickelte Konzept für die berechneten Flugtrajektorien des Traffic Simulator (*TrafficSim*) im *EWMS* implementiert und an die *EWMS*-Datenbank gekoppelt werden. Zur Anbindung des *TrafficSim* an *EWMS* müssen die Strukturen der Simulationsdaten erfasst und die relevanten Informationen gefiltert werden.

### 1.3. Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Masterarbeit zeigt die Umsetzung einer wissenschaftlichen Aufgabe der Informatik in Verbindung mit dem Anwendungsgebiet Luftfahrt. In der Arbeit soll dem Leser ein Verständnis über die Grundlagen, das Konzept und die praktische Implementierung, welche der Autor in seinen Tätigkeiten entwickelt hat, vermittelt werden. Die Inhalte aus den erwähnten Fachbereichen werden detailliert erläutert, um den Fachgruppen unbekanntes Themengebiete verständlich zu machen. Zu Beginn wird eine Einleitung in die Thematik der Aufgabenstellung gegeben. Dabei wird die zu untersuchende Fragestellung erörtert und der mögliche Einsatz der Entwicklung in Projekten dargelegt.

Das theoretische Hintergrundwissen zum gestellten Problem wird in **Kapitel 2** durch Aufarbeitungen der Literaturrecherche gezeigt. Dem Leser werden im Grundlagenkapitel alle Informationen die zum Verständnis der Ausarbeitungen notwendig sind, geschildert. Der Fokus liegt auf den Grundlagen der Luftverkehrsverfahren, dem Einsatz von 4D-Trajektorien und den damit verbundenen Herausforderungen. So werden aktuelle Luftverkehrsverfahren mit zukunftsweisenden Methoden verglichen und die wesentlichen Komponenten zur Trajektorienberechnung identifiziert. Weiterführend werden die definierten Haupteinflussparameter hinsichtlich der Berechnung und Entscheidung im Gesamtsystem der Flugsicherung analysiert. Die Wirkzusammenhänge zwischen den Eingabeparametern sind bei den Betrachtungen herauszuarbeiten. Darüber hinaus wird

die Verwendung von Simulationen von Verkehrsszenarien zur Unterstützung von Untersuchungen eingeführt und die Ursachen für Unsicherheiten in der Trajektorienplanung erarbeitet.

Die Visualisierung soll die analytische Bewertung von Trajektorien grafisch interpretierbar darstellen. Welche möglichen Frameworks und Tool-Kits es zur Informationsverarbeitung gibt, wird in **Visualisierung von Unsicherheiten (Kapitel 3)** vorgestellt. An das Framework werden klare Anforderungen definiert, nach denen das passende Programmgerüst ausgewählt wird.

Das Hauptaugenmerk dieser Masterarbeit liegt in **Kapitel 4** und ist somit der zentrale Punkt dieser Ausarbeitung. Darin wird aus den Anforderungen und Systemvoraussetzungen das Modell mit Metriken zur Bewertung von Trajektorienunsicherheiten entworfen. In dem Abschnitt werden die möglichen Abweichungen während eines Flugs dargelegt, Zeichnungen stellen den Sachverhalt und die Definitionen grafisch dar. Durch die Herleitung von Formeln aus der planaren und sphärischen Trigonometrie werden Vektoren berechnet, mit denen die Unsicherheiten durch Ellipsoide dargestellt werden können. Die eigenen Konzeptideen und Entwurfsentscheidungen leiten sich aus den Wertungen themengleicher Forschungsarbeiten ab. Auf Grundlage eines speziellen Simulationsszenarios werden die Wirkzusammenhänge der Einflussparameter exemplarisch modelliert und die Ergebnisse analysiert.

Im Rahmen der Implementierungen in **Kapitel 5** greift diese Masterarbeit interessante technische Umsetzungen auf. Neben dem Endresultat, der Visualisierung, werden auch einige Zwischenergebnisse während der Auswertung beschrieben.

In **Kapitel 6** wird der Auswertungsprozess aus Sicht des Benutzers erklärt. Hinzukommend werden die Visualisierungen und Ergebnisse in Verbindung mit Beispieldaten vorgestellt und eine Interpretationshilfe gegeben. Der Einfluss der einzelnen Parameter auf die Qualität der Trajektorie kann mit einer Reflexion des Erreichten und dem Ausblick auf weitere geplante Entwicklungen wird die Masterarbeit abgeschlossen.

## 2. Grundlagen der 4D-Trajektorienplanung

In den *Aeronautical Information Services* [13] sind Grundregeln der Luftfahrt für das Verhalten der Teilnehmer am Luftverkehr definiert. Darin sind die Verantwortlichkeiten, Rechte und Pflichten der Luftfahrzeugführer, die Flugvorbereitung, die Anwendung der Flugregeln und auch die Anzeige von Flugunfällen festgelegt. Im Wegsicherungsprozess wird durch die operativen Stellen (DFS, EUROCONTROL) ein sicherer, effizienter und wirtschaftlicher Flugbetrieb zwischen den Flugplätzen gewährleistet. Dafür werden Dienstleistungen von diesen Stellen zur Verfügung gestellt. [14]

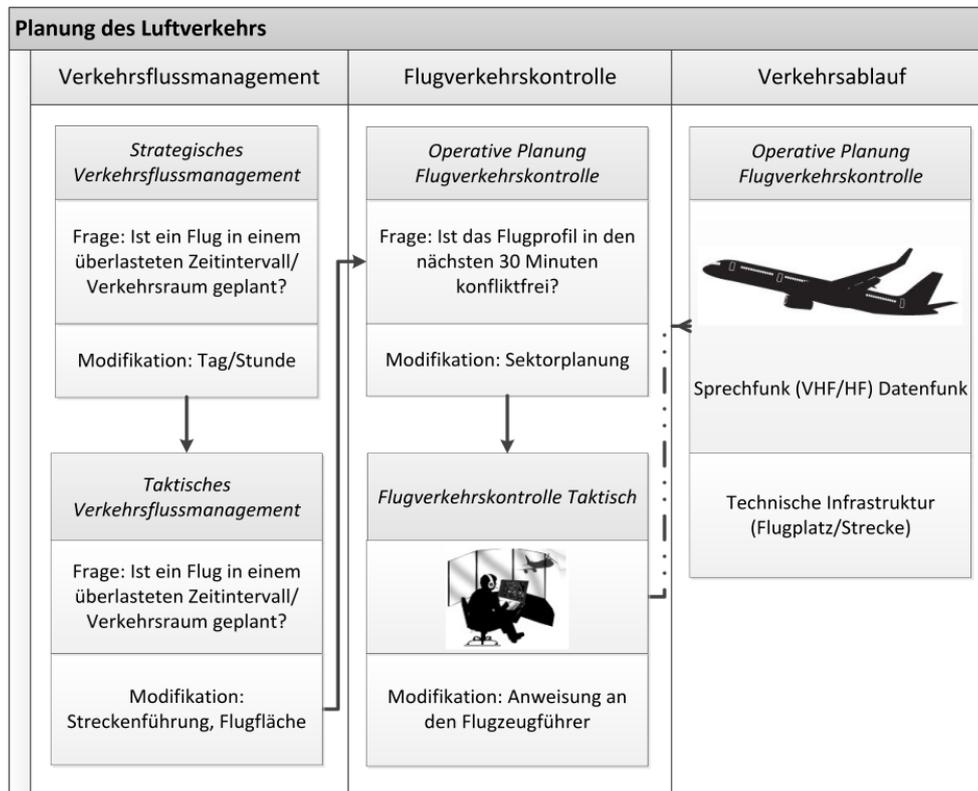
Für den Umgang mit Flugtrajektorien ist sowohl ein Verständnis über die aktuellen Verfahren im Flugbetrieb als auch über die geplanten trajektorienbasierte Flugsicherung notwendig. Die Grundlagen werden in den nachfolgenden Abschnitten erläutert. Von der aktuellen Flugführung ausgehend, werden trajektorienbasierte Konzepte vorgestellt. Des Weiteren wird die Rolle und der Einfluss von Planungsunsicherheiten betrachtet, um den Umgang und die Bewertung der Unsicherheiten kritisch zu analysieren.

### 2.1. Strategisches und Taktisches Luftverkehrsmanagement

Die Aufgabe des Air Traffic Management beinhaltet u.a. das Leiten des erwarteten Verkehrs auf den Verkehrsrouten für einen effizienten und sicheren Verkehrsfluss ohne Überlastsituationen. Nach Consiglio et al. [15] kann man von einer Verkehrsdichte im oberen Luftraum von durchschnittlich 11 bis 22 Flugzeugen pro 10.000 NM<sup>2</sup> ausgehen. Im aktuellen Flugverkehr dienen fallspezifische Vorschriften bei solch hohem Verkehrsaufkommen dazu, Zwischenfälle wie gefährliche Begegnungen von Luftfahrzeugen durch Separation zu vermeiden und somit die oben genannten Zielsetzungen zu gewährleisten. Die Zuteilung der Flugverkehrskontrolle wird räumlich in Sektoren vorgenommen. Flüge werden nach Instrumentenflugregeln, Sichtflugregeln und Flugplatzverkehr unterschieden. Für die Kontrolle eines Luftfahrzeugs ist zu jedem Zeitpunkt eine einzige Sicherungsstelle zuständig. Die Flugverkehrskontrolle umfasst das Feststellen der Verkehrslage aufgrund von Informationen (Flugplan, Radardaten und Position) und das Erlassen von daraus resultierenden Verfügungen und Freigaben. Anweisungen zu Flug- und Umweltinformationen erfolgen durch Kommunikation über Sprechfunk zwischen dem Luftfahrzeugführer und dem zuständigen Lotsen. Bei der Durchführung der Verkehrskontrolle wird die Luftverkehrssituation im Voraus grob geplant, um zukünftige Entscheidungen schnell und problemorientiert einzugrenzen.

Der Luftverkehrsplan wird durch das **Verkehrsflussmanagement**, das **Luftraummanagement** und die **Flugverkehrskontrolle** durchgeführt. Die genauen Prozesse aus Abbildung 2.1 werden im Folgenden erklärt. Im **Verkehrsflussmanagement** werden die

zeitlichen und räumlichen Flugplandaten koordiniert, d.h. Verkehrswege werden unter bestimmten Voraussetzungen bereitgestellt. Das Luftraummanagement ist für die Zuteilung und Nutzung des Luftraums, basierend auf der aktuellen Nachfrage, verantwortlich. Für einen geordneten Verkehrsfluss ist die **Flugverkehrskontrolle** zuständig. Darüber hinaus besteht ihre Aufgabe in der Vermeidung von Kollisionen zwischen Luftfahrzeugen und Hindernissen. [14]



**Abbildung 2.1.:** Prozessschritte des aktuellen Luftverkehrsmanagements (Verkehrsplanung, Verkehrsorganisation, Flugverkehrskontrolle im zeitlichen Ablauf), nach [14]

Die Prozesse in Abbildung 2.1 lassen sich nach [14] in drei Zeitintervalle gliedern:

1. Strategische Planung - 6 Monate bis 24 Stunden vor der Flugbewegung
2. Taktische Planung - 24 Stunden bis 30 Minuten vor der Flugbewegung
3. Operative Planung - 30 Minuten bis zum Eintritt des Flugereignisses

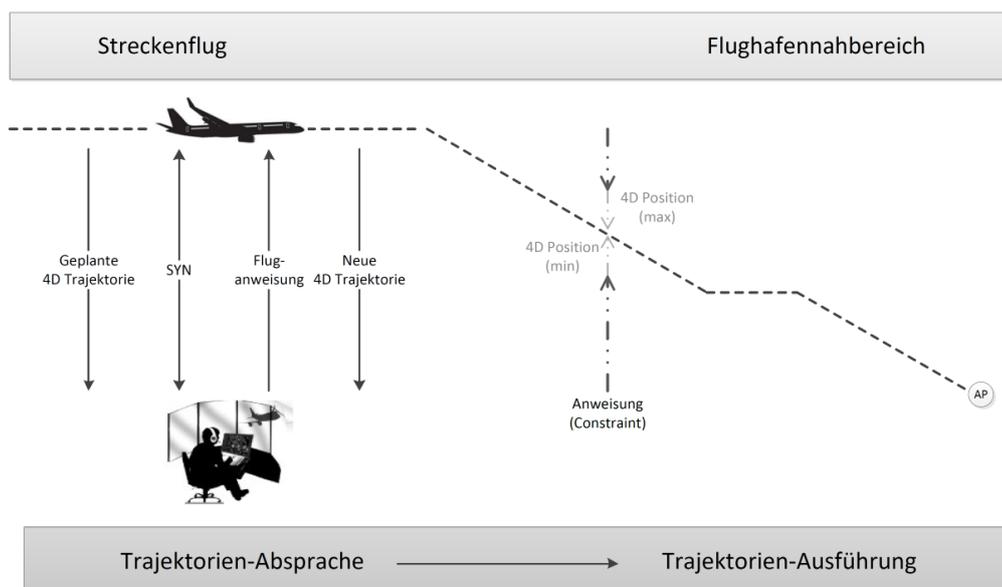
Im Kontext dieser Arbeit werden primär Weiterentwicklungen, Unterstützungsprozesse und -tools für die taktische und operative Planung betrachtet. In der taktischen Planung wird die Umsetzung der Flugpläne im Luftraum definiert. In der operativen Planung wird kurzfristig auf unvorhersehbare Ereignisse reagiert. Basis für die Verkehrskontrolle sind Flugdurchführungspläne. In den Plänen ist u.a. die Streckenführung festgelegt, jedoch keine genauen Vertikalprofile oder Überflugzeiten. Diese individuellen Flugpläne werden für jeden Flug in einem Formblatt definiert. Der sog. ATC-Flugplan und der Flugdurchführungsplan beinhalten Informationen wie Luftfahrzeugkennung, Art des Fluges, Wirbel-



Positionspunkten approximiert. Die vier Dimensionen sind:

1. Zeit
2. x-Koordinate bzw. Longitude
3. y-Koordinate bzw. Latitude
4. z-Koordinate bzw. Altitude

Die geographischen Koordinaten, Latitude und Longitude, werden in Dezimalgrad angegeben und können in x- und y-Koordinaten (NM) umgerechnet werden. Die Flughöhe wird in Fuß (ft) angegeben. Bei der Planung von Flugtrajektorien wird zwischen der luftseitigen Planung (Pilotenunterstützungssysteme) und der bodenseitigen Planung (Lotsenunterstützungssysteme) der Trajektorie unterschieden. Mit Hilfe von Sensoren am Flugzeug und Messungen am Boden wird die Flugbahn in Abhängigkeit von der Datenqualität sekunden genau bestimmt. Da sich die Berechnungen der Bodenstationen und des Flugzeuges unterscheiden, werden die Daten (z.B. Position, Ankunftszeit am nächsten Wegpunkt, geplante Trajektorie) über einen Kommunikationskanal ausgetauscht und abgeglichen (siehe Abbildung 2.3). Die Werte müssen ohne gravierenden Informationsverlust zwischen dem Planungssystem am Boden und dem Ausführungssystem an Bord des Flugzeugs ausgetauscht werden. Der Informationsaustausch kann in Form von Koordinatentupeln in regelmäßigen Abständen oder durch definierte Daten über die Flugbedingungen zur Rekonstruktion einer Trajektorie erfolgen (siehe Abbildung 2.3). Auf Basis dieser kommunizierten Daten wird eine Anweisung definiert, die einen konfliktfreien Luftraum bestimmt, in dem sich das Flugzeug aufhalten soll. [7, 16]



**Abbildung 2.3.:** Kommunikation von Fluganweisungen zwischen Bodensystem und Flugzeug, nach [17]

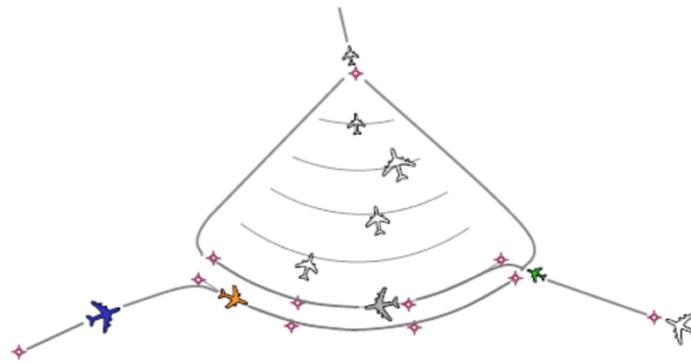
Im Verlauf eines Flugs wird die Trajektorie durch das Flight Management System (FMS) an Bord neu berechnet, aktualisiert und an den Boden geschickt. Gründe für die fortlaufende Erzeugung der neuen Trajektorien können sein:

- Neue Messungen oder Prognosen von Veränderungen der Parameter (Wind, Temperatur usw.)
- Nachregelungen durch Piloten oder Autopiloten
- Vermeidung von potentiellen Konflikten mit Trajektorien anderer Flüge oder gesperrten Gebieten wie z.B. Restricted Military Area
- Änderungen der Intentionen von Fluggesellschaft oder Piloten

Eine 4D-Trajektorie wird charakterisiert durch die Parameter Windstärke, Windrichtung, Temperatur, Gewicht und Leistungseigenschaften des Flugzeugs und kann durch diese eindeutig bestimmt werden. Die Flugzeugeigenschaften beeinflussen die Charakteristik des Steigprofils, der Flughöhe und des Sinkprofils. Beim Betrieb vom Trajektorienkonzept für Flüge lässt sich der Unterschied zwischen bordseitig berechneter Trajektorie und der bodenseitigen Trajektorie durch Differenzen in den Bewegungsmodellen, den Approximationsalgorithmen, Quantität und Qualität der verwendeten Eingangsparameter und der Frequenz von Trajektorienstützpunkten begründen. Nach Tamvaclis [18] wird zudem davon ausgegangen, dass Trajektorien mit dem FMS genauer berechnet werden können als am Boden, da aktuelle Flugzustandsparameter, lokale Windverhältnisse, das Fluggewicht und Airline spezifische Flugverfahren bekannt sind. Am Boden hingegen können für diese Parameter nur grobe Richtwerte angenommen werden.

Wie bereits zu Beginn beschrieben, wird die komplette Flugmission in Phasen eingeteilt. Die wichtigsten sind Rollen am Flughafen (engl. Taxi), Steigflug (engl. Climb), Reiseflug (engl. Cruise) und Anflug (engl. Approach). Der Anflug fasst dabei den Übergang vom Streckenflug in den Flughafennahbereich, den Endanflug und die Landung zusammen. Für die einzelnen Flugphasen gibt es unterschiedliche Anforderungen an die Güte der Trajektoriengenauigkeit. Infolge dessen muss auch die visuelle Analyse einer Bahnkurve phasensensitiv sein, um signifikante Punkte in Abflug und Anflug genauer analysieren zu können. Das bedeutet eine erhöhte Genauigkeit bei der Bestimmung und Visualisierung von Abweichungen in komplexen Phasen des Flugs.

Im ATM werden derzeit Anflugverfahren entwickelt und getestet, die Kapazität und Pünktlichkeit verbessern. Das Leistungsvermögen des Luftraums kann nur dann ausgenutzt werden, wenn Events für einen Flug sekundengenau planbar sind. Events beschreiben einen Vorgang an einem bestimmten Punkt (Kreuzen einer Bahn) oder zu einem bestimmten Zeitpunkt (Top-of-Descent). In diesem Zusammenhang kann das Point Merge Verfahren genannt werden (siehe Abbildung 2.4). Dabei wird an einem definierten Punkt eine geordnete Reihenfolge mit dem benötigten Sicherheitsabstand vor dem Endanflug hergestellt. Voraussetzung für dieses Verfahren ist eine genaue Vorhersage der Trajektorie in der sog. Collection Phase, um eine korrekte Aufreihung der Flugzeuge ähnlich wie



**Abbildung 2.4.:** Innovatives Anflugverfahren Point Merge [19]

beim Reißverschlussystem im Straßenverkehr zu erreichen. Für solche Anwendungsfälle ist es wichtig, die Planungsgenauigkeit für die Collection Phase bzw. den Merge Point zu wissen.

Die Verwendung von dreidimensionalen Trajektoriendarstellungen bringt vielseitige Verwendungsmöglichkeiten im operationellen und strategischen Flugsicherungsbetrieb mit sich. So verbessern Visualisierungen der Flugkurven und potentiellen Abweichungen zum einen die Untersuchungsmöglichkeiten von operationellen Methoden, zum anderen werden ausführende Controller in den Flugführungsmaßnahmen und der Entscheidungsfindung unterstützt.

### 2.3. Einfluss des Trajektorienkonzepts auf die Bereiche der Luftfahrt

In der Flugplanung soll gewährleistet sein, dass jede Trajektorie zu jedem Zeitpunkt konfliktfrei zu allen weiteren Luftfahrzeugen ist. Konfliktfreie Anflugstrecken auf einen Flughafen lassen sich durch trajektorienbasierte Planung berechnen. In den nachfolgenden Ausführungen sind mögliche Verbesserungen in der Luftfahrt durch Trajektorien erklärt. Zusätzlich werden Möglichkeiten erläutert, in welchem Kontext Visualisierungen den Betrieb unterstützen können. Ein Monitoring der geplanten Flugspuren ermöglicht allen Teilnehmern am Verkehrsmanagement das Abrufen der Positionen und Bahnkurven anderer Flugzeuge in einem Luftraumsegment. Diese bordautonome Erfassung der Verkehrssituation nahezu in Echtzeit erlaubt es den Lotsen sogar, die Verantwortung für die Einhaltung von Sicherheitsabständen zu anderen Verkehrsteilnehmern an die Piloten zu delegieren (self-separation). Eine zentrale Rolle bei der trajektorienbasierten Flugführung spielt das FMS an Bord. Es dient sowohl zur Eingabe der Flugroute vor dem Start als auch zur automatischen Führung der Maschine entlang der aktuellen Flugbahn während des Flugs bis hin zur Landung. [20]

Zusätzlich wird trajektorienbasiertes Flugmanagement auch das Flughafenmanagement

tangieren. Denkbar ist eine Vernetzung der Prozesse auf dem Vorfeld eines Flughafens mit den geplanten 4D-Trajektorien. Der Mensch spielt bei zukünftigen Entwicklungen weiterhin die zentrale Rolle, jedoch werden sich die Aufgabengebiete der Akteure signifikant ändern. Der Automatisierungsgrad wird erhöht, dadurch werden die Akteure von Routineaufgaben entlastet und bekommen durch Tools wertvolle Unterstützung z.B. bei Konflikterkennungen und -lösungen. Durch die bereits beschriebene präzisere Planung des genauen Flugweges werden weniger taktische Eingriffe durch den Lotsen notwendig sein. Das bedeutet, der Lotse kann mehr Flugzeuge im zuständigen Sektor leiten. Die Piloten gewährleisten ein möglichst genaues Einhalten der vereinbarten Trajektorie. Sie übernehmen in bestimmten Lufträumen die Verantwortung für die Separation zu anderen Flugzeugen. [21]

Mögliche Abweichungen im Flug von der geplanten Trajektorie führen zu möglichen Konflikten zu anderen Flugtrajektorien mit einer gewissen Unsicherheit. So ergeben 15 Minuten Zeitabweichung beim Starten am Flughafen im Reiseflug in etwa eine laterale Abweichung von 100 NM. Je kleiner die Unsicherheit in der Trajektorie ist, desto weniger Verzögerungen kommen durch Ausweichmanöver zustande. [22]

Nach Knorr [8] wird bekräftigt, dass es für die Effizienz des trajektorienbasierten Flugverkehrsmanagements entscheidend ist, den Einfluss von Prognoseunsicherheiten auf die Flugbahn zu verstehen und vorherzusagen. Mit der geplanten Visualisierung können Unsicherheiten der Trajektorie dargestellt werden und somit z.B. auf potentielle Konflikte hin untersucht und die Qualität der Szenarienplanung anhand von Indikatoren analysiert werden. Ein Bewertungsparameter ist bspw. die Anzahl von möglichen Konflikten. Beim Durchqueren von zwei Flugbahnen mit Positionsunsicherheit entsteht ein Schnittkörper. Das Volumen gibt damit Informationen über die Wahrscheinlichkeit eines Konflikts. Eine weitere Verbesserung durch die Visualisierung wird bei der Sektorzuweisung erreicht. Unsicherheiten in der 4D-Trajektorienplanung beeinflussen Fluglotsen in ihrer Arbeitslast. So kann sich die Komplexität im kontrollierten Sektor unvorhersehbar vergrößern und somit die Last der Lotsen erhöhen. Durch Berücksichtigung der mögliche Abweichungen bei der Sektoreinteilung kann frühzeitig auf mögliche Engpässe in den Sektoren reagiert werden. [8]

## 2.4. Simulation von Luftverkehrsszenarien

Grundlage für Untersuchungen von Trajektorien sind Flugbahn-Daten. Für die vorliegende Arbeit werden die Rohdaten (Bahnkurven) zur Messung und Visualisierung von Trajektorienunsicherheiten durch Schnellzeitsimulationen generiert. Eine Erklärung des Prinzips von Schnellzeitsimulation im ATM-Bereich folgt im nachstehenden Abschnitt. Außerdem werden die in den Simulationen generierten Daten und die Eigenschaften des Datenformats für die Verarbeitung analysiert. Die Echtzeit- und Schnellzeitsimulationsmodelle bilden Verkehrsszenarien an Flughäfen, im Flughafennahbereich und im oberen Luftraum durch analytische Berechnungen ab. Bei Echtzeitsimulationen liegt der Fokus der Untersuchungen auf den realen Arbeitsprozessen, d.h. Interaktionen der beteiligten Personen und Systeme.



Das Flugszenario wird mit der DLR Software *TrafficSim* [24] aufgebaut und berechnet. Die Software wurde in der Abteilung Pilotenassistenz des Instituts für Flugführung entworfen und kontinuierlich weiterentwickelt. Der *TrafficSim* dient zum einen zur Entwicklung und Validierung von Pilotenassistenzsystemen und zum anderen zur Entwicklung und Validierung von Luftverkehrsszenarien und -operationen. So unterstützt *TrafficSim* u.a. „Large Scale“ Szenarien (>30000 Luftfahrzeuge) zum Testen von zukünftigen ATM-Konzepten wie 4D-Trajectory-Contracts. Eine graphische Benutzeroberfläche steht zur Analyse und Konfiguration von Flügen zur Verfügung (siehe Abbildung 2.5).

Die für die Verkehrssimulation in dieser Masterarbeit genutzte Hauptfunktion ist das Simulieren mit einer variablen Anzahl an Flugzeugen, Flugzeugtypen und Flugplänen. Auf Basis eines Flugplans (szenario, siehe Tabelle 2.1), einer Detailbeschreibung zu jedem Flug (constraint, siehe Anhang A.2.2) und den Flugzeugeigenschaften aus den Base of Aircraft Data (BADA) [25] wird die 4D-Flugtrajektorie nach einem Punkt-Masse-Modell simuliert. Im Flugplan werden zeilenweise die Flüge mit Startflughafen, Zielflughafen, Startzeit, Rufzeichen und Flugzeugtyp beschrieben. Weiterhin müssen entsprechende meteorologische Daten (Druck, Wind, Temperatur) definiert werden. Ein entscheidender Grund für die Verwendung des *TrafficSim* ist, dass in den Simulationen die Datenkommunikation und Verhandlung zwischen Flugzeug und Fluglotsen für prognostizierte 4D-Trajektorien, wie in Abschnitt 2.2 und Abbildung 2.3 beschrieben, modelliert ist. [24]

Abflughafen (ICAO)	Abflugzeit	Rufzeichen	Flugzeugtyp (ICAO)	Flugfläche
EDDH	09:46:32	LH567	A320	370
EDDH	09:50:17	BER589	B737	370

**Tabelle 2.1.:** Flugplandaten für ein *TrafficSim*-Szenario

## 2.5. Unsicherheiten in der Trajektorienplanung

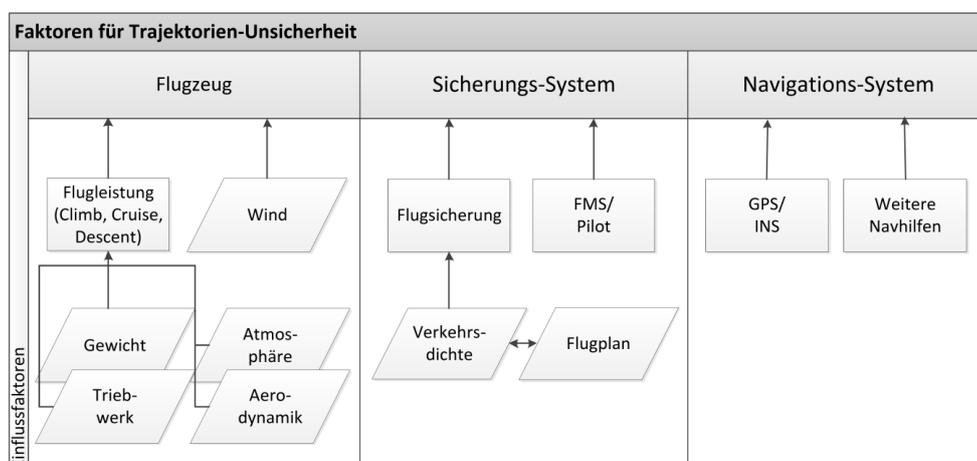
Alex Pang hat in [26] einige Grundbegriffe, darunter auch *Fehler*, *Ungenauigkeit* und *räumliche Unsicherheit*, definiert und voneinander abgegrenzt. Als Fehler bezeichnet man eine Diskrepanz zwischen einem gegebenen Wert und einem tatsächlichen Wert (z.B. GPS Messung kann bis 3 Meter von realer Position abweichen). Die Differenz zwischen einem gegebenen Wert und dessen modellierten Wert ist als Ungenauigkeit definiert. Eine räumliche Unsicherheit ist ein Fehler oder eine Ungenauigkeit in einer geografischen Position bzw. einer Positionseigenschaft (Geschwindigkeit, Schub).

### 2.5.1. Definition

Die Unsicherheit einer Flugtrajektorie beschreibt die mögliche Abweichung der tatsächlich geflogenen Bahnkurve gegenüber der prognostizierten. Dabei grenzt die Abweichung einen Wertebereich ein, in dem die vier Dimensionen sowohl einzeln als auch in Kombination variieren. Ziel bei der Bestimmung von Prognoseunsicherheit ist es, ein Intervall zu definieren, welches die tatsächlichen Werte der Trajektorie einschließt. Das Flugzeug befindet sich während des tatsächlichen Flugs symmetrisch zum prognostizierten Flugpunkt. Die Position ist durch einen Ausdruck der Form *geplantePosition*  $\pm$  *Abweichung* angegeben.

### 2.5.2. Ursachen

Abweichungen von einer berechneten Flugtrajektorie können mehrere Ursachen haben. In Abbildung 2.6 sind die verschiedenen Faktoren systematisch aufgelistet. Zusätzlich sind nachfolgend die Wirkungen der jeweiligen Parameter auf die Trajektorie konzeptionell beschrieben.



**Abbildung 2.6.:** Einflussfaktoren auf die Qualität der Trajektorienprognose, nach [27]

### Flugzeugeigenschaften:

Bedeutenden Einfluss auf das Flugprofil haben die Leistungsdaten des Flugzeugs. Vor allem das Gewicht und die Triebwerkleistung bestimmen die Möglichkeiten für die Geschwindigkeit sowie das Steig- und Sinkprofil. Das aktuelle Fluggewicht, das sich aus dem Eigengewicht, der Zuladung und der Restmenge Treibstoffs ergibt, hat laut DLR [23] den größten Einfluss bei der Trajektorienberechnung.

### Umwelteinflüsse:

Auswirkungen auf die Fluggeschwindigkeit und den Steuerkurs hat zusätzlich die Temperatur, Windstärke und -richtung. Aus den Positionsabweichungen bzw. Geschwindigkeitsunterschieden resultiert eine Unsicherheit in der Flugdauer und somit in der zeitlichen Dimension, aber auch in den Steigprofilen durch Leistungsschwankungen. In den meteorologischen Festlegungen der ICAO [28] ist eine Norm-Atmosphäre für die Luftfahrt definiert. Dabei gilt für die Temperatur als globaler Mittelwert im mittleren Meeresniveau (NN)  $T_0 = 288,15 \text{ K}$  ( $15 \text{ °C}$ ). Für die Unterschiede der Temperaturen je Höhe ist in der ICAO-Standardatmosphäre (ISA) eine lineare Temperaturabnahme von  $0,65 \text{ K}$  pro  $100 \text{ m}$  bis zur Tropopause in  $11 \text{ km}$  Höhe festgelegt. In weiteren Höhen bleibt die Temperatur konstant. Die nachfolgende Tabelle 2.2 zeigt einige Werte der ISA.

Höhe in m ü. NN	Luftdruck in hPa	Temperatur in °C	Luftdichte in $\text{kg m}^{-3}$
-1.000	1.139,29	21,5	1,3470
0 NN	1.013,25	15,0	1,2250
1.000	898,75	8,5	1,1116
3.000	701,09	-4,5	0,9091
7.000	410,61	-30,5	0,5895
9.000	701,09	-4,5	0,9091
11.000	701,09	-4,5	0,9091
13.000	701,09	-4,5	0,9091

**Tabelle 2.2.:** Werte der ICAO-Standardatmosphäre (ISA) [28]

### Luftverkehrskontrolle:

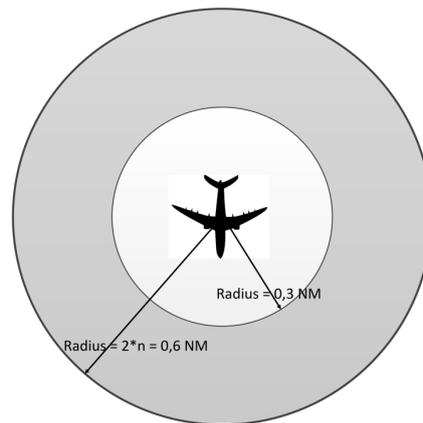
Für taktische Veränderungen der Flugroute sind die Sicherungssysteme verantwortlich. Die Änderung Flugintention ist abhängig von der Art des Kontrollsystems und des Flugmanagementsystems. Die Analyse von Flugtrajektorien wird in dieser Arbeit mit Hilfe von einem einheitlichen Sicherungssystem entwickelt, aufgrund dessen eine Deviation des Flugwegs in dieser Masterarbeit nicht betrachtet wird. Mögliche Quellen für Unsicherheiten durch Luftverkehrskontrolle sind: Flugsteig-Freigabe, Rollweg-Anweisungen bzw. Start-Freigabe.

Im Allgemeinen haben die beschriebenen Parameter bei Langstreckenflügen, aufgrund des höheren Startgewichts, einen größeren Einfluss als bei kürzeren Flugstrecken. Hinzu kommt eine größere Wirkung von Unsicherheiten bei den Steig- und Sinkflug-Phasen in geringeren Höhen, da die Steig- und Sinkraten mit der Höhe abnehmen.

### Navigationsleistung:

Die vierte Komponente umfasst die Navigationssysteme. In diesem Bereich haben Fehler durch ungenaue Positionsbestimmungen Einfluss auf die Qualität der geflogenen Route.

Zur Standardisierung der Leistungsvermögen der Navigationsmodule hat die Internationale Zivile Luftfahrtorganisation ein Konzept definiert, die sog. Required Navigation Performance (RNP) [29]. Darin ist festgelegt, mit welcher Qualität die Position für den Betrieb in der Luftfahrt bestimmt werden muss. Flugzeugtypen wird nach einer Zertifizierung eine RNP-n Kategorie zugewiesen. In der Praxis werden RNP-0.3, RNP-4, RNP-10 und RNP-12.5 verwendet. Der Wert gibt die maximale Entfernung an der gemessenen Position von der tatsächlichen Position an (siehe Abbildung 2.7).



**Abbildung 2.7.:** Definierte Navigationsleistung (Kategorie 0.3), nach [30]

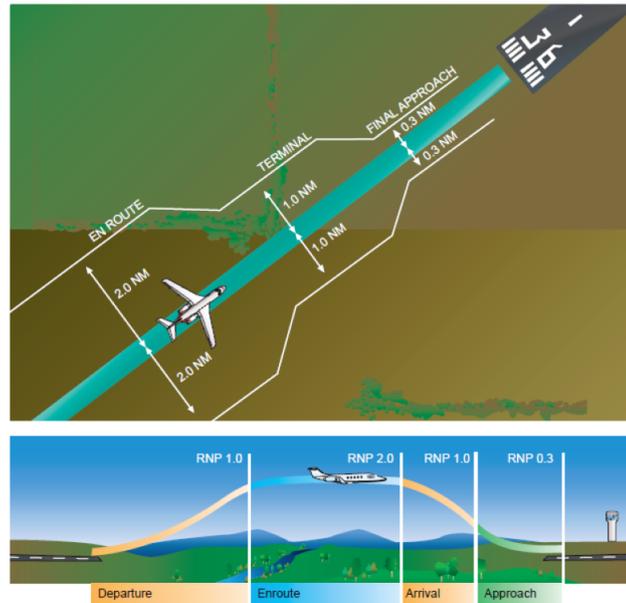
Durch die Kategorien wird eingeschränkt, in welchem Luftraum das Flugzeug betrieben werden darf. So können RNP-4 Flugzeuge bspw. nicht in einem Luftraum operieren, in dem RNP-0.3 gefordert wird (siehe 2.8). Weiterhin wird im Konzept festgelegt, dass die Abweichung in 95% der geflogenen Zeit eingehalten wird und in den Fehlern eine Abweichung von maximal  $d = 2 * n$  auftreten darf. Bei einer Überschreitung der Grenze wird vom RNP-System ein Alarmsignal ausgelöst. In den weiterführenden Entwicklungen wird ein Ansatz angewendet mit dem der Einfluss von Navigationsfehlern modelliert wird. Bei dem Ansatz werden variable Bereiche an den constraint-Punkten der Simulation festgelegt.

### 2.5.3. Stand heute

Für die Vorhersage von Unsicherheiten in der Planung von Flugtrajektorien wurden in wissenschaftlichen Arbeiten bereits verschiedene Methoden entwickelt. Es wird auf Ansätze eingegangen, die gute Ergebnisse geliefert haben.

#### **Arbeiten zur Messung und Prognose von Unsicherheiten:**

In Mueller [31] ist ein Ansatz beschrieben, bei dem Ursachen für Unsicherheiten durch statistische Streuung repräsentiert werden. Durch Monte-Carlo Simulation wird die Auswirkung von Parametervariation auf die Trajektorie bestimmt. Mit dem Ansatz von Mueller können spezielle Szenarien und Flugmanöver (Anflüge, TOD) sehr genau untersucht und mögliche Abweichungen berechnet werden. Jedoch lässt sich, aufgrund der Betrachtung



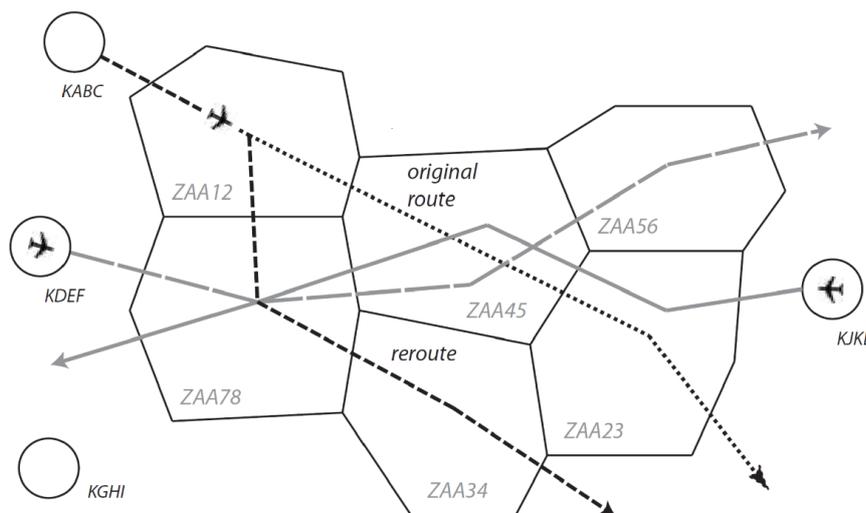
**Abbildung 2.8.:** Anforderungen an die Navigationsleistung in den Flugphasen, nach [29]

tion von einzelnen Flugphasen und nicht des gesamten Flugs, kein allgemeingültiges Simulationsmodell ableiten.

Bei einem weiteren Ansatz nach Wanke [32] werden empirische Daten studiert und die Differenz zwischen vorausgesagter und tatsächlich geflogener Trajektorie untersucht. Die gemessenen Daten können für ein allgemeingültiges Modell genutzt werden. Die Methode spiegelt die Realität vergleichbar wider, denn selbst für Vorhersagen ohne Fehler zur Realität stimmt der tatsächliche Verkehr nicht mit dem Geplanten überein. Als Ergebnis wird eine kummulierte Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Abweichung von der geplanten Trajektorie ermittelt und auf weitere Verkehrsszenarien angewendet.

In einer Folgearbeit von Wanke [33] sind die positiven Ideen aus beiden vorangegangenen Arbeiten zusammengefügt. Der Ansatz basiert ebenfalls auf empirischen Messungen. Die Wahrscheinlichkeiten für Planungsunsicherheiten werden in Kategorien gegliedert. Aus den Statistiken werden fallspezifische Szenarien konfiguriert. Um eine statistische Verteilung zu erhalten, wird die bestimmte Unsicherheit abschließend durch eine Monte-Carlo-Simulation ermittelt. Allerdings ist die Idee zur Darstellung des Flugwegs so vereinfacht, dass die Flugbahn nur durch die Eintritts- und Austrittspunkte der Sektoren beschrieben wird (siehe Abbildung 2.9). Für den Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit ist die Abstraktion ungeeignet.

In Wankes Untersuchung werden die Auswirkungen von Unsicherheiten bei der Sektorzuweisung betrachtet und für die Flugstrecke zwischen den Sektoreintrittspunkten und Sektoraustrittspunkten interpoliert. Die Idee zur Prognose von Unsicherheiten durch Kombination von Messungen und analytischer Simulation, stellt Methoden dar, welche auf Simulationsdaten abstrahiert und angewendet werden können.

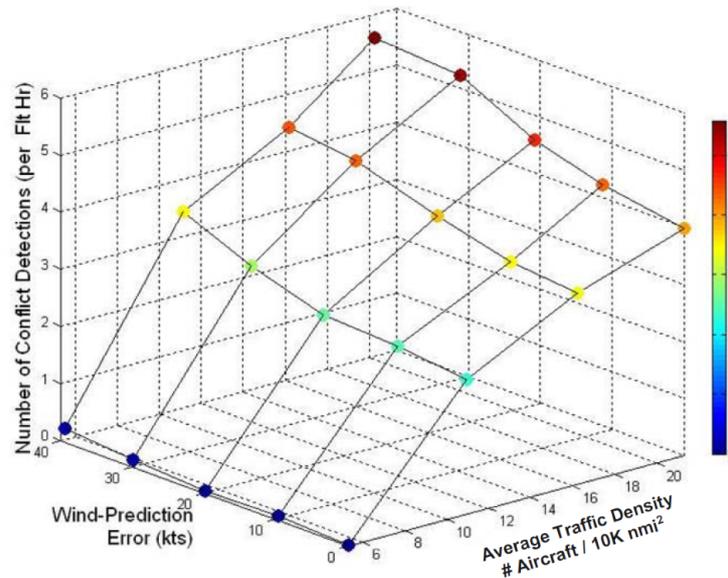


**Abbildung 2.9.:** Darstellung von Sektorunsicherheit [33]

Consiglio [15] hat ausgeführt, welche Variationen der Windkomponente als realistisch betrachtet werden können. Hier wurde ausschließlich der Einfluss der Windvorhersage auf die Trajektoriengenauigkeit untersucht. Bei der Simulation können Windfehler von 0–40 kn angenommen werden. Ziel der Arbeit von Consiglio et al. war es, unsicherheitsbedingte Separationsunterschreitungen zu messen. Dabei wurden die Verkehrsdichte und der Windfehler für den Simulationsraum (Kugelraum mit 160 NM Durchmesser) variiert. Alle Flugzeuge befanden sich in gleicher Höhe und somit konnten nur laterale Konfliktlösungen angewendet werden. Anhand von 45 Simulationsläufen konnte gezeigt werden, dass die Unterschreitung der Separation sowohl von der Verkehrsdichte, als auch von den Windabweichungen abhängig ist (siehe Abbildung 2.10). Z.B. resultierten, bei einer angenommenen Separation von 5 NM, viele Separationsunterschreitungen in einem Abstand von weniger als 0,5 NM zwischen den Flugzeugen. Consiglio [15] bekräftigt die Meinung, dass trotz verbesserter Windprognosen große Fehler auftreten. Denn vor allem longitudinale Abweichungen in der Windvorhersagen haben besonders großen Einfluss auf die Trajektorie. So kann ein mittlerer Fehler von durchschnittlich 15 kn in der Windkomponente entlang der Flugroute eine Positionsungenauigkeit von 5 NM zur Folge haben. Für die Simulationen kann im Allgemeinen ein maximaler Fehler von bis zu 80 kn in der Windvorhersage angenommen werden.

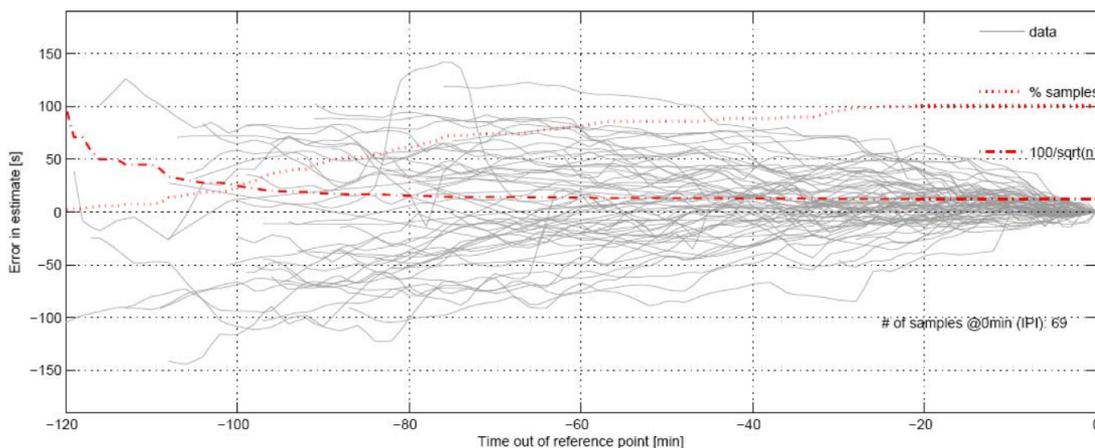
### **Arbeiten zur Visualisierung von Trajektorienabweichungen:**

Mit der Visualisierung von Unsicherheiten können räumliche Fehler und zeitliche Abweichungen ermittelt werden. Durch die Darstellungen wird das Management vom Luftverkehr in der Entscheidungsfindung unterstützt. In verwandten Ausarbeitungen werden die zwei möglichen Darstellungen voneinander getrennt entwickelt. Ein Modell für die zeitliche Planungsungenauigkeit bei konkreten Flugmissionen wird in einer Studie über die zeitliche Vorhersagegenauigkeit von Flugbewegungen [7] konstruiert. Als Ergebnis wird für einen bestimmten Flugpunkt ein zweidimensionaler Graph dargestellt (siehe Abbildung 2.12). Auf der x-Achse ist die verbleibende Zeit bis zur Ankunft am Flugpunkt aufgetragen, die



**Abbildung 2.10.:** Anzahl Konflikte pro Stunde [15]

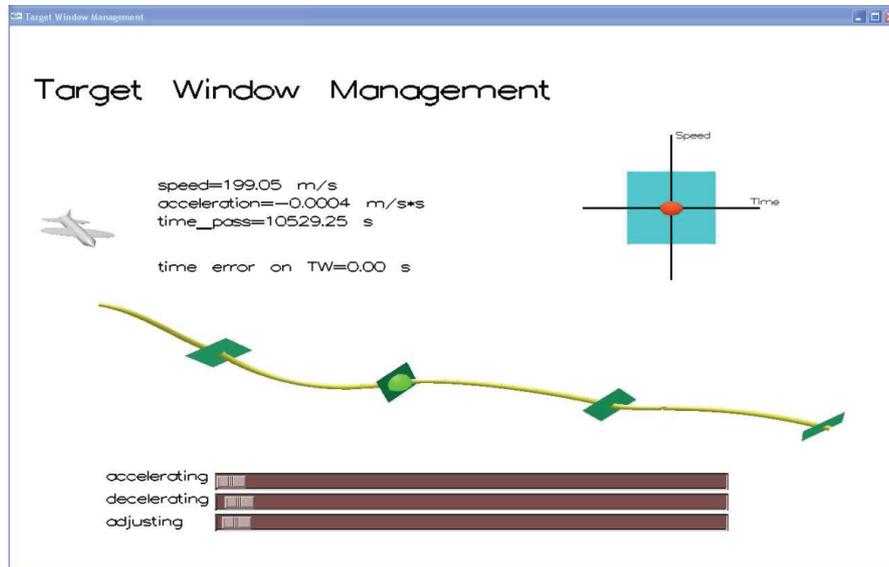
y-Achse repräsentiert die Abweichung der prognostizierten Ankunftszeit am Flugpunkt von der tatsächlichen Ankunftszeit. Die Interpretation soll mit einem Beispiel verdeutlicht werden: Ein Flugzeug überfliegt um 11:20:30 Uhr einen signifikanten Wegpunkt. 80 Minuten vor dem Ereignis wurde vom System eine Überflugzeit von 11:19:45 Uhr prognostiziert. Das bedeutet, je weiter ein Flugzeug vom Wegpunkt entfernt ist, desto ungenauer ist die zeitliche Prognose. Die Art der Darstellung wurde mit DLR-Experten kontrovers diskutiert und als uneindeutig in der Interpretation bewertet. Folglich ist es erforderlich, auf den Ausführungen von Bronsvort [7] aufbauend, eine Darstellung zu konzipieren, welche die Untersuchungsparameter deutlich herausarbeitet.



**Abbildung 2.11.:** Zeitliche Unsicherheit für Top of Descent [7]

Das Projekt „3D-in-2D Display“ [34] der EUROCONTROL untersucht die Möglichkeiten der zweidimensionalen Visualisierungen von 3D Informationen. Dabei wurden Prototypen zur Integration von neuen Darstellungen in die aktuellen Radar-Displays entwickelt. In

der Untersuchung wurden auch die Möglichkeiten einer zeitlichen Vorhersage betrachtet, um Fragestellungen zur Verkehrssituation in den nächsten 5–15 Minuten beantworten zu können.



**Abbildung 2.12.:** Visualisierung einer Trajektorie von EUROCONTROL [34]

Mit dem Abschluss des Grundlagenkapitels werden Informationen zur strategischen und trajektorienbasierten Flugführung gegeben. Auf den Grundlagen zu 4D-Trajektorien aufbauend sind der Einfluss und die Bereiche herausgearbeitet, die durch eine Implementierung betroffen sind. Simulationen von Luftverkehrsszenarien dienen zur Modellbewertung von neuen Konzepten. Die Ansätze von Simulationen wurden erläutert und die Vorteile bei der Lösung der Problemstellung betrachtet. Ferner wurde eine detaillierte Auflistung der Ursachen von Planungsunsicherheiten gegeben (Flugzeugeigenschaften, Flugsicherung, Umwelteinflüsse und Navigationsleistung). Der aktuelle Forschungsstand liefert einen Überblick über relevante Arbeiten auf dem Gebiet der Prognose von Planungsunsicherheiten und deren Darstellungen. Die erzielten Ergebnisse werden in Kapitel 4 aufgegriffen und brauchbare Ansätze für den entwickelten Anwendungsfall modifiziert.

## 3. Visualisierung von Unsicherheiten

Simulationen des Luftverkehrs helfen bei der Analyse von operationellen Verfahren und ermöglichen das Konfigurieren von Parametern zur Verfahrensoptimierung. Ein Großteil der resultierenden Datensätze und Ergebnisse haben komplexe Strukturen. Um bestimmte Ergebnisse und Parameter der Simulation intuitiv untersuchen zu können, müssen die Daten visuell dargestellt werden. Visualisierung ist ein Prozess, bei dem Daten zur Informationsvermittlung in Bilder umgewandelt werden. [35] Mit Visualisierungen von Unsicherheiten sollen Daten gemeinsam mit möglichen Abweichungen bzw. Fehlern repräsentiert werden. Dieses Kapitel ist zur Erläuterung verschiedener Arten von Unsicherheiten und den jeweils geeigneten Darstellungen verfasst.

### 3.1. Umgang mit Unsicherheiten in der Informationswissenschaft

Die Zunahme von großen Datenmengen mit komplexen Beziehungen führten in den letzten Jahren zu zahlreichen Forschungsarbeiten zur Verarbeitung von Informationen. Griethe [36] stellt in seiner Untersuchung einen Ansatz zum methodischen Vorgehen bei der Visualisierung von Daten vor. Zu Beginn der Verarbeitung werden nach dem Ansatz die meist komplexen Daten klassifiziert und getrennt voneinander betrachtet. Auf diese Arbeit angewendet, können zuerst die vier Dimensionen einer Trajektorie jeweils getrennt voneinander untersucht werden. Als zweiten Schritt können die Werte der einzelnen Dimensionen in Diagrammen als skalare Größen dargestellt werden. In einer weiteren Verarbeitung können zwei Parameter in einer Tree-Map in Relation gebracht werden, z.B. die Flughöhe in Abhängigkeit vom Flugzeuggewicht.

Zur wissenschaftlichen Verarbeitung von unsicheren Geo-Daten ist in *Kategorien für die Darstellung von Unsicherheiten* [37] ein Klassifizierungs-Modell erläutert. Das Modell typisiert unterschiedliche Arten von Unsicherheiten und bietet damit eine Basis zur Konstruktion von Visualisierungen. Davon ausgehend, dass Daten wie Position oder Zeit gemeinsam mit Abweichungen in vielen wissenschaftlichen Bereichen auftreten, werden die Daten nach Art und möglicher Unsicherheit in Kategorien eingeteilt [37].

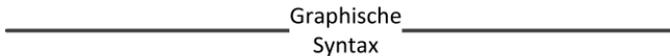
Folgende Kategorien sind in der Untersuchung identifiziert:

- Fehler/Abweichungen zwischen Prognose und Realität
- Präzision von Messungen
- Vollständigkeit von Informationen

- Konsistenz von Daten
- Korrektheit der Informationsquelle
- Datenunabhängigkeit
- Angemessener Zeitraum

Für die Einteilung von Geoinformationsdaten stützt sich das Klassifizierungs-Modell auf erste Ausarbeitungen von Buttenfield [38]. In Abbildung 3.1 sind die Art von Geo-Daten (Zeilen) und die möglichen Unsicherheiten (Spalten) aufgeführt. Es wird zwischen drei verschiedenen Datentypen unterschieden: diskrete Daten (Punkte, Linien, Positionen), kategorische Daten (Eigenschaften von Gebieten in Kategorien eingeteilt) und Zusammenhängende Gebiete (Flächen, Körper).

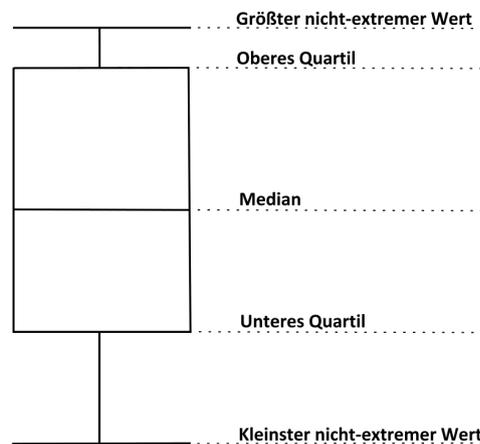
Daten Typ \ Daten Qualität	Positions-Genauigkeit	Attribut-Genauigkeit	Logische-Korrektheit
<b>Diskrete Daten</b> <b>(Position &amp; Linie)</b>	Größe & Form der Ungenauigkeit  (Ellipsoid, Band)	Wert (z.B. Geschwindigkeit)  (farbliche Abstufung)	Werte sind topologisch klar  (Höhe >> 0 ft)
<b>Kategorische Daten</b> <b>(Eigenschaften, z.B. Temperatur)</b>	Korrekte Grenzen und Werte	farbliche Darstellung konsistent zu numerischen Wert	Werte sind schlüssig  (-50°C < Temp < 50°C)
<b>Zusammenhängende Gebiete</b> <b>(Flächen &amp; Körper)</b>	Exakte Grenzen	Korrekte farbliche Sättigung	Größe der Fläche  (Straße < 20 m)



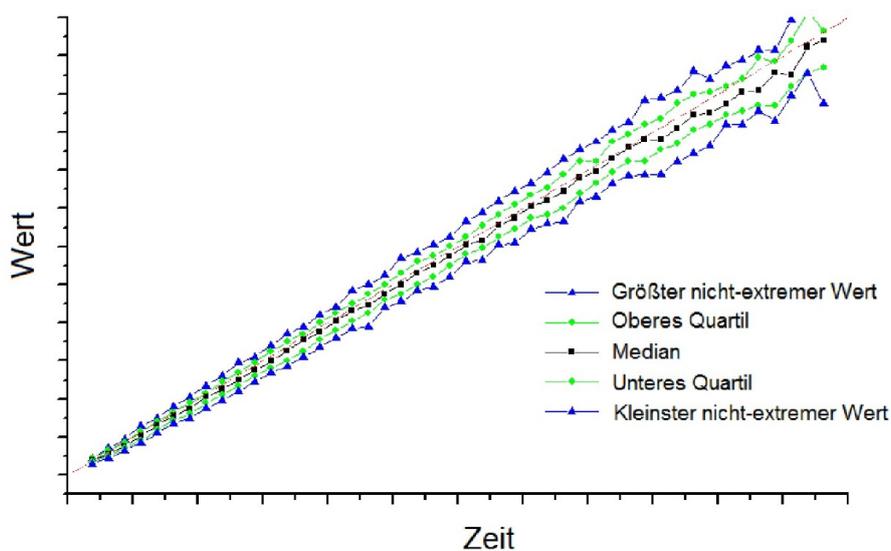
**Abbildung 3.1.:** Klassifizierung von kartografischen Daten, nach [37]

Die generierten Flugbewegungsdaten, welche in dieser Arbeit auftreten, sind durch diskrete Eigenschaften in der oberen Zeile der Tabelle ausgezeichnet. In der Masterarbeit werden die Unsicherheiten von Position (Latitude, Longitude, Altitude) und Positionseigenschaften (Geschwindigkeit, Treibstoffverbrauch) in Bezug auf Prognosen untersucht. Laut der Klassifizierung ist für die Beschreibung von Unsicherheiten der Wert und die Form der Abweichung notwendig. Damit könnte die Höhe (14.000 ft) und eine Unsicherheit ( $\pm 800$  ft) als Beispiel angegeben werden.

Auch für die resultierende Darstellung von Unsicherheiten wurden in der Informatik zahlreiche Arbeiten angefertigt. Dabei gilt die Kombination von Daten und deren Unsicherheiten in einer gemeinsamen Visualisierung als grundlegende Herausforderung. Eine Möglichkeit bietet sich durch Verwendung von Transparenz [26]. Bei den meisten Methoden werden die zuverlässigen Daten getrennt von den unsicheren Daten verarbeitet und dargestellt. Die Bereiche in denen Planungsunsicherheit auftritt werden als zusätzliche Werte bzw. Variablen behandelt. Dabei werden die Abweichungen von einem Referenzwert transparent aufgezeichnet. Weitere Verfahren zur Präsentation von Streuung bieten Boxplot oder Quantile-Quantile-Plot. Durch Boxplot, oder auch Kastengrafik, werden verteilte skalare Daten dargestellt. Damit wird ein schneller Eindruck über den Bereich der Daten und die Verteilung vermittelt. Die Verteilung wird beim Boxplot in vier Wertebereiche gegliedert: Größter nicht-extremer Wert, Oberes Quartil, Median, Unteres Quartil, Kleinster nicht-extremer Wert (siehe Abbildung 3.2). Auch der Quantile Plot stellt statistische Abweichungen von einem Referenzwert dar (siehe Abbildung 3.3).

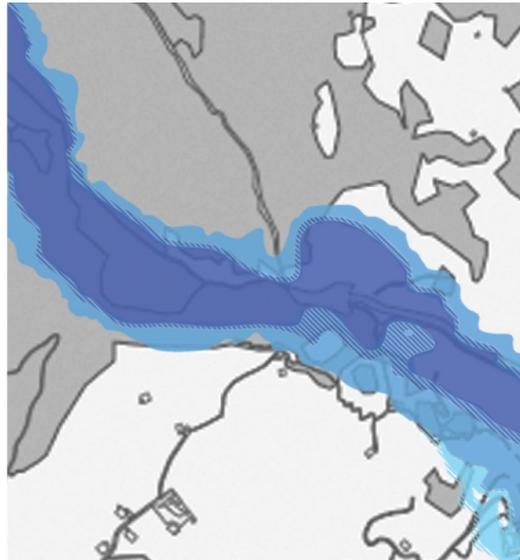


**Abbildung 3.2.:** Darstellung von Abweichungen durch Boxplot



**Abbildung 3.3.:** Darstellung von Abweichungen durch Quantile-Plot, nach [39]

Im Kontext von Katastrophengebieten werden durch Kunz et al. [40] Methoden zur Darstellung von unsicheren Bereichen in Geo-Informationssystemen (GIS) beschrieben. In dem Bericht wird weiterführend thematisiert, ob die Darstellung von unsicheren Informationen in Karten sinnvoll ist oder eher verwirrenden Einfluss hat. Als Ergebnis der Studien haben sowohl erfahrene als auch neue Anwender die Informationen interpretieren können. Für eine erfolgreiche Darstellung empfiehlt Kunz für Unsicherheiten die Verwendung von verschiedenen Farbsättigungen, Rasterung, Transparenz, Texturen und zusätzlichen Formen wie Pfeilen oder Balken (siehe Abbildung 3.4).



**Abbildung 3.4.:** Darstellung von Unsicherheiten durch Transparenz und Farbsättigung [40]

In diversen Geo-Informationssystemen sind Techniken zur Visualisierung von Unsicherheiten umgesetzt. Bei den analysierten Daten handelt es sich ausschließlich um skalare Werte mit kontinuierlichen Ausmaß. Z.B. repräsentieren eingefärbte Gebiete oder Umrisslinien Bereiche, welche unsichere Daten enthalten. Außerdem werden Animationen wie blinkende Punkte zur Darstellung von zeitabhängigen Unsicherheiten verwendet. Dabei sollte nach MacEachen et al. [41] die Farbintensität und der Farbton zwischen sicheren Daten und möglichen Abweichungen variieren.

## 3.2. Frameworks

Im Folgenden werden Tools und Frameworks für die Visualisierung wissenschaftlicher Daten vorgestellt. Dabei werden jeweils geeignete Datenstrukturen, Funktionen und Filter, die für die Visualisierung der Simulationsdaten geeignet sind, analysiert. Die ausgewählten Toolkits werden auf die folgenden Anforderungen untersucht.

- Vorhandenes Java-Interface
- Konfigurieren einer Darstellung aus dem Programmlauf
- Datenstrukturen zur Verarbeitung von Geodaten
- Umfangreiche Dokumentation der Programmierschnittstelle und Funktionen

Die Frameworks zur Unterstützung der Visualisierung können in zwei verschiedene Typen gegliedert werden. Zum einen die Tools zum Erstellen von Diagrammen und zum anderen Programmier-Schnittstellen zur Visualisierung von Flächen, Körpern und geografischen Karten. Diagramme eignen sich vor allem für quantitative Untersuchungen von skalaren Größen, bei denen der exakte Wert entscheidend ist. Kartendarstellungen hingegen vermitteln dem Benutzer ein qualitatives Verständnis über die Dimensionen und Lokalisation der Daten.

### Diagramm-Tools

Für die Erstellung von aussagekräftigen Diagrammen sind die Java-Bibliotheken *Jzy3d*<sup>1</sup>, *JFreeChart*<sup>2</sup> und *Google Chart Tool*<sup>3</sup> zu nennen. *JFreeChart* ist, unter der GNU Lizenz, eine freie Java-Bibliothek zum Erstellen von komplexen Diagrammen. Die Chart-Typen umfassen Torten-, Balken- (horizontal und vertikal), Linien-, Streu-Diagramme und viele mehr (siehe 3.5). Für die Konfiguration und Verarbeitung der Visualisierungen kann das Bild über die definierten Schnittstellen aus beliebigen Implementierungen erzeugt, vergrößert oder exportiert (JPEG, PNG, SVG, PDF) werden. *JFreeChart* ist komplett in Java entwickelt und ist mit Java-Plattform ab JDK1.3 kompatibel. Die Bibliothek ist durch einen verfügbaren Developer Guide vollständig dokumentiert. Die *Jzy3d*-Schnittstellen stellen Funktionen zum Abbilden von Flächen, Balkendiagrammen und eine Menge von 3D Körpern bereit. Die Bibliothek baut auf der Anbindung von Java an OpenGL (JOGL<sup>4</sup>) auf. Für die Auswertung der skalaren Fehler sind die Entwicklungsschritte bis zu einem sinnvollen Ergebnis zu komplex. *Google Chart Tool* besitzt einen ähnlichen Aufbau wie *JFreeChart* und bietet viele identische Diagrammtypen. Aufgrund der ausführlicheren Dokumentation, welche im DLR zur Verfügung steht, und der größeren Benutzer-Gemeinschaft wird in der Masterarbeit das Tool *JFreeChart* verwendet.

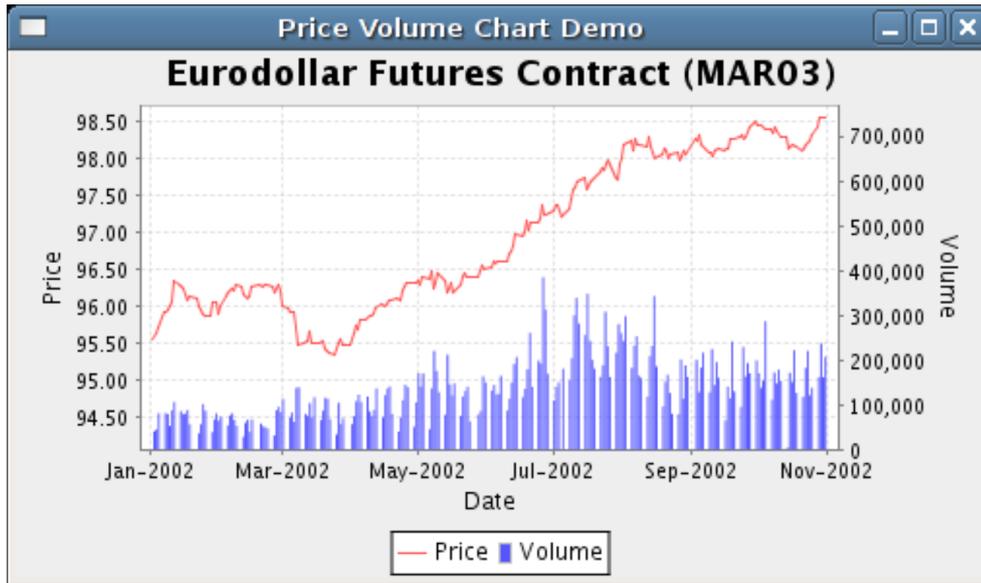
---

<sup>1</sup><http://www.jzy3d.org/index.php>

<sup>2</sup><http://www.jfree.org/jfreechart/>

<sup>3</sup><https://developers.google.com/chart/>

<sup>4</sup><https://jogl.dev.java.net>



**Abbildung 3.5.:** Linien- und Balkendiagramm mit *JFreeChart*  
(<http://www.jfree.org/jfreechart/images/PriceVolumeDemo1.png>)

Der komplette Zeichenprozess von Diagrammen wird in der Klasse *JFreeChart* koordiniert. Durch die Methode

```
public void draw(Graphics2D g2, Rectangle2D area);
```

wird das *JFreeChart* Objekt zum Zeichnen konstruiert. Die relevanten Daten werden aus einem *Dataset* bezogen. Für die verschiedenen Graphen gibt es jeweils spezielle Implementierungen der Datensammlung (siehe Tabelle 3.1).

Dataset:	Diagrammtyp:
<i>PieDataset</i>	<i>PiePlot</i>
<i>CategoryDataset</i>	<i>CategoryPlot</i>
<i>XYDataset</i>	<i>XYPlot</i>
<i>IntervalXYDataset</i>	<i>VerticalXYBarRenderer</i>
<i>HighLowDataset</i>	<i>HighLowRenderer</i>
<i>CandleStickDataset</i>	<i>CandleStickRenderer</i>

**Tabelle 3.1.:** Datensammlungen mit den kompatiblen Diagrammtypen

Über die Tabelle hinaus gibt es jede Menge Kombinationen. Als Hauptaussage kann festgehalten werden, dass jedes Diagramm ein *Dataset* und ein *Plot* hat. Auf die genaue Implementierung zur Darstellung von Unsicherheiten in Abweichungs-Diagrammen wird in Kapitel 5.5 eingegangen.

### **GeoTools, NASA World Wind und Co.**

Quantitative Auswertungen in Tabellen- oder Diagrammform liefern detaillierte Informationen über die berechneten Werte. Ausmaße, Dimensionen und Relationen von Objekten

werden meist durch dreidimensionale Zeichnungen in einem geografischen Referenzsystem verständlich. Nachstehend werden Tools untersucht, die solche Visualisierungen ermöglichen.

*Visualisierungs Toolkit (VTK)* ist ein Framework für wissenschaftliche Visualisierungen. Das Framework stellt verschiedene Datentypen und umfangreiche Algorithmen bereit, welche Datensätze verarbeiten und neue Daten erzeugen. Es handelt sich um eine umfangreiche Bibliothek, die Bausteine für komplexe Visualisierungsanwendungen bereitstellt. Die Bibliothek bietet APIs (engl. application programming interface) für Java, C++ und Python. Innerhalb der *VTK* Software wird zwischen dem sog. Visualisierungsmodell und dem Grafikmodell unterschieden. Durch die Modelle werden die Schritte Datentransformation bzw. Abbildung der Daten abstrahiert. Dabei beschreibt das Visualisierungsmodell den Datenfluss einer Visualisierung durch ein Netzwerk von Filtern. Durch das Grafikmodell werden die Daten auf Grafikprimitive<sup>5</sup> der zugrundeliegenden Grafikbibliothek abgebildet. [35]

*VisIt*<sup>6</sup> ist ein Tool mit dem Wissenschaftlern die Visualisierung von beliebigen Daten ermöglicht wird. *VisIt* baut größtenteils auf der *VTK*-Bibliothek auf. Zusammen mit der modularen Architektur bietet es viele verschiedene Datentypen zur Verarbeitung. Außerdem ermöglichen die Schnittstellen dem Benutzer, eigene Plugins zu entwickeln und auf die Datentypen zuzugreifen. Durch die eigenständige Benutzeroberfläche bietet *VisIt* primär die Möglichkeit Dateien einzulesen, jedoch kann aus einer Java-Applikation nicht direkt eine Visualisierung konfiguriert werden. Durch die Java API können eigene Plugins implementiert werden. Das Tool bietet keinen geografischen Bezug und ist nur in geringem Umfang dokumentiert.

Weitere Tools wie Processing<sup>7</sup>, GeoVISTA<sup>8</sup>, ESTAT<sup>9</sup> und InfoScope<sup>10</sup> bieten ausgezeichnete Visualisierungsfunktionen in geschlossenen Software-Systemen bzw. mit Processing eine eigene Programmierumgebung. Allerdings sind die vorhandenen Programmierschnittstellen zum Erfüllen der Anforderungen nicht ausreichend. Mit *Java 3D*<sup>11</sup> wird eine Bibliothek von Java-Klassen, zur Erzeugung und Konfiguration dreidimensionaler Grafiken innerhalb einer Java-Anwendung, zur Verfügung gestellt.

Zur Verwendung von geografischen Karten wird für die Masterarbeit *Unfolding Maps*<sup>12</sup>, *GeoTools*<sup>13</sup>, *ArcGIS*<sup>14</sup> und *NASA World Wind*<sup>15</sup> (*NWW*) in Betracht gezogen. *Unfolding* ist eine Java-Bibliothek, mit der interaktive und thematische Karten und Geovisualisierungen entworfen werden können. Mit den Funktionalitäten können Merkmale mit geografischen Positionen auf verschiedene Karten, wie z.B. OpenStreetMap oder TileMill, gezeichnet

<sup>5</sup>Die Primitive ist die unterste Ebene eines Modells, dessen Funktion sich nicht weiter vereinfachen lässt. (Bsp. aus zwei Primitiven Punkten lässt sich eine Strecke ableiten)

<sup>6</sup><https://wci.llnl.gov/codes/visit/about.html>

<sup>7</sup><http://www.processing.org/>

<sup>8</sup><http://www.geovista.psu.edu/index.jsp>

<sup>9</sup><http://www.geovista.psu.edu/ESTAT/index.html>

<sup>10</sup><http://www.macrofocus.com/public/products/infoscope/>

<sup>11</sup><http://www.java3d.org/>

<sup>12</sup><http://unfoldingmaps.org/>

<sup>13</sup><http://www.geotools.org/>

<sup>14</sup><http://www.arcgis.com/about/>

<sup>15</sup><http://worldwind.arc.nasa.gov/java/>



**Abbildung 3.6.:** Geo-Kodierung mit ArcGIS

(<http://www.esri.com/~media/Images/Content/Software/arcgis/arcgis-for-desktop/graphics/geocoding-lg.jpg>)

werden. Die Karten basieren auf einem Kachel-Konzept. *GeoTools* ist eine weitere open source Java-Bibliothek zur Unterstützung von Manipulation geografischer Daten. Durch *ArcGIS* werden GIS Funktionalität und Daten in Anwendungen angeboten (siehe Abbildung 3.6).

*NASA World Wind* liefert Funktionen mit denen geografische Daten und geometrische Objekte dem Benutzer ausgegeben werden können. Die Displays können durch die open-source API jeder Java-Anwendung hinzugefügt werden. Der Vorteil sind hochauflösende Luftbilder und Geländebilder als Hintergrundkarten von NASA-Servern. Somit zählt *NASA World Wind* in der Kategorie der Welt-Visualisierungen als kostenloser Konkurrent zu *Google Earth*. Im Gegensatz zu dem Produkt von Google haben die NASA Entwicklungen wissenschaftlichen Hintergrund und bieten eine maximale Auflösung von 15 Meter. Durch einfache Erweiterungen und Implementierungen kann die Oberfläche des Planeten kostenfrei verändert werden (siehe Abbildung 3.7). Gleiche Möglichkeiten sind bei *Google Earth* kostenpflichtig.

Zu den geometrischen Objekten in *NWW* zählen neben Punkt, Linie, Polygon auch Körper wie Zylinder, Ellipsoide oder Pyramiden. Zudem können die Formen mit Beschriftungen markiert oder transparent gezeichnet werden. Die Ausgabe kann als Bilddatei (JPG, PNG) oder im GIS Format (KML, GML) exportiert werden. Des Weiteren sind Rechnungen mit verschiedenen Koordinatensystemen integriert. Die Software wurde vom *NASA Ames Research Center* (ARC) entwickelt, um Daten mit innovativen Technologien zu verwenden und zu präsentieren. Seit Herbst 2004 ist das Programm kostenlos unter einer Open Source Lizenz erhältlich. *NWW* verwendet Public Domain Daten von hauseigenen Satelliten. Infolge der Vorteile von *NASA World Wind* wird die Visualisierung mit geografischem Bezug durch dieses Framework umgesetzt.

Die ausgewählten Java-Bibliotheken stellen für spezielle Aufgaben umfassende Funktionen zur Verfügung. Nach den Klassifizierungen aus Butteenfield [38], lassen sich die Simulationsergebnisse als diskrete Daten mit Positionsgenauigkeit einteilen. Angesichts der flexiblen Konfiguration und Erstellung von *JFreeChart*-Diagrammen, werden in der

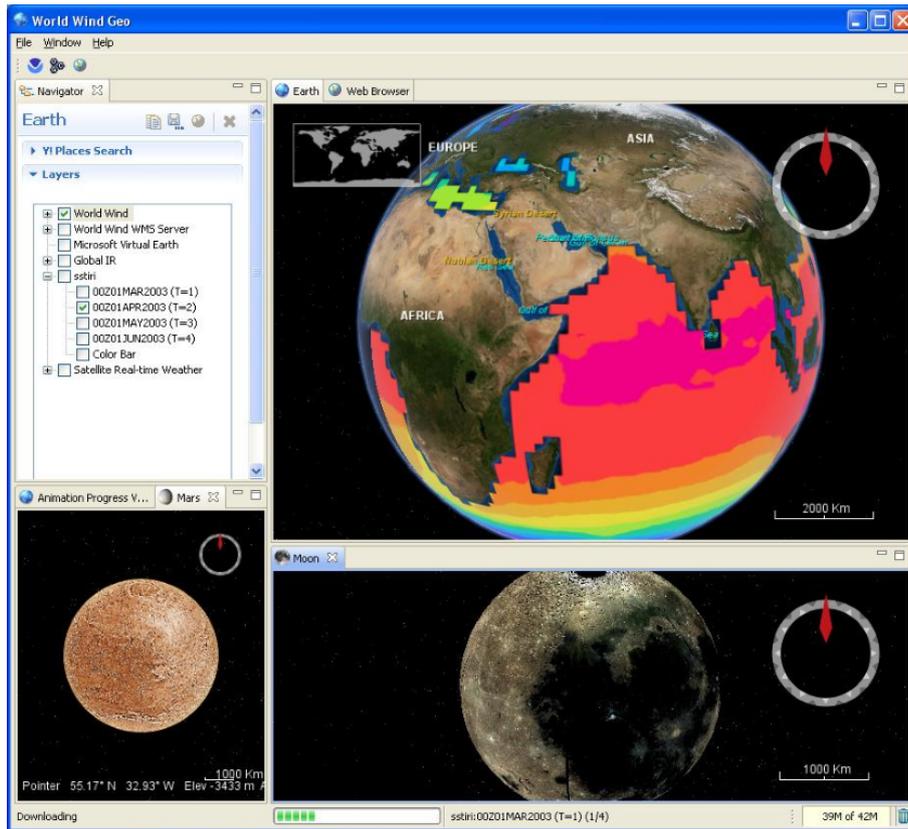


Abbildung 3.7.: Darstellung von Flächen und Figuren mit NASA World Wind  
(<http://worldwindrcp.googlecode.com/files/wwgeo-main-ss.jpg>)

Masterarbeit die skalaren Größen der Abweichungen durch die Chart-Darstellungen umgesetzt. NASA World Wind hingegen bietet exzellente Möglichkeiten die Trajektorie und die Unsicherheiten auf einer Karte zu visualisieren.

## 4. Analyse und Entwurf

In diesem Kapitel werden die Routinen und Funktionen für das Softwaremodul entworfen. Darüber hinaus wird festgelegt, welche Anforderungen das Modul erfüllen muss und auf welchen Daten die Berechnungen basieren.

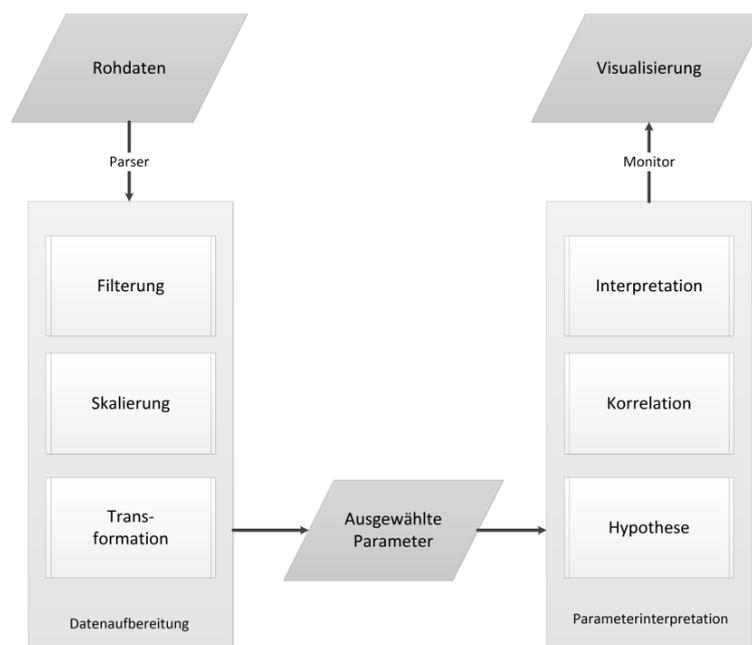
In der vorliegenden Masterarbeit soll ein unterstützendes Werkzeug zur Visualisierung von Unsicherheiten und deren Auswirkungen auf den Luftverkehr entwickelt werden. Zur Analyse von Unsicherheiten in der Trajektorienplanung muss eine Methode entwickelt und umgesetzt werden, die es zum einen ermöglicht, Abweichungen zu messen und zum anderen die Unsicherheiten in Form eines Modells zu simulieren. Bei den Messungen wird der Gesamtverkehr eines simulierten Szenarios auf jedes individuelle Flugzeug aufgelöst, um die einzelnen Flugspuren zu analysieren. Die Simulation soll die Abweichungen von der Trajektorienprognose für verschiedene Verkehrssituationen vorhersagbar machen. Dafür können im Allgemeinen, bei der Bewertung von Trajektorien, verschiedene Parameter (Geschwindigkeit, Winkel usw.) analysiert werden. In dieser Arbeit wird die Genauigkeit der Trajektorienvorhersage als Parameter untersucht. Fehler der Flugspur in Bezug auf die Prognose können in den räumlichen Dimensionen als auch der zeitlichen Dimension auftreten.

Zur Visualisierung von Trajektorienunsicherheiten sind drei Hauptaufgaben entscheidend: die Simulationsaufbereitung, die Unsicherheitsberechnung und die Anbindung der Daten an *JFreeChart* und *NASA World Wind*. Die minimalen Anforderungen an die Rohdaten sind die drei Raumkoordinaten zur Bestimmung der Position und der zugehörige Zeitstempel. Die physikalischen Werte Orientierung, Geschwindigkeit und Neigung werden aus den Positionspunkten berechnet. Als erschwerender Aspekt bei der Datenaufbereitung gibt es Unterschiede bei den Formaten der Trajektoriengeneratoren, so z.B. die Bezeichnungen, Einheiten oder Taktfrequenzen. Aus diesem Grund wird für die Entwicklung der Visualisierung das einheitliche Datenformat des *TrafficSim* beispielhaft verwendet. Um in Zukunft weitere Datenquellen in die Auswertung implementieren zu können, wird ein generisches Datenmodell zum Einlesen herangezogen. Die Daten der Eingabedatei werden in einzelne Objekte aufgeteilt und in einer relationalen Datenbank gespeichert. Der Softwareaufbau und die Implementierung der Datenbank sind im Kapitel 5 *Implementierung* dokumentiert.

### 4.1. Auswertungskonzept

Der Auswertungsprozess wird analog zum *EWMS* Konzept [42] in zwei Phasen gegliedert (siehe Abbildung 4.1). Zuerst werden aus den Simulationsrohdaten die relevanten Parameter generiert. Aus den Parametern werden in der zweiten Phase Zusammenhänge

analysiert und interpretierbar dargestellt. Die Ergebnisse dienen der Schlussfolgerung von Erkenntnissen aus den Simulationsszenarien. Wie in der Abbildung 4.1 zu sehen, besteht der Datenaufbereitungsprozess aus verschiedenen Teilaufgaben. Während des Einlesens werden die nicht benötigten Rohdaten heraus gefiltert. Bei der Skalierung werden die Einheiten in das gleiche Format gebracht. Beispielsweise wird die Höhe immer in Fuß angegeben oder eine Skalierung von Meter in Fuß vorgenommen. Neben dem Angleichen von Einheiten werden einige Daten in ein anderes Format transformiert. Beispielsweise werden geographische Koordinaten von Grad, Minuten und Sekunden in Dezimalgrad umgerechnet. In der Dateninterpretation werden, ausgehend von den Parametern, Aussagen zu Übereinstimmungen der Positionen getroffen. Dabei setzt man die Parameter in eine entsprechende Korrelation gesetzt. Das heißt zwei Trajektorien werden in Hinblick auf den Abstand untersucht. Das Ergebnis der Korrelation wird entsprechend dargestellt.

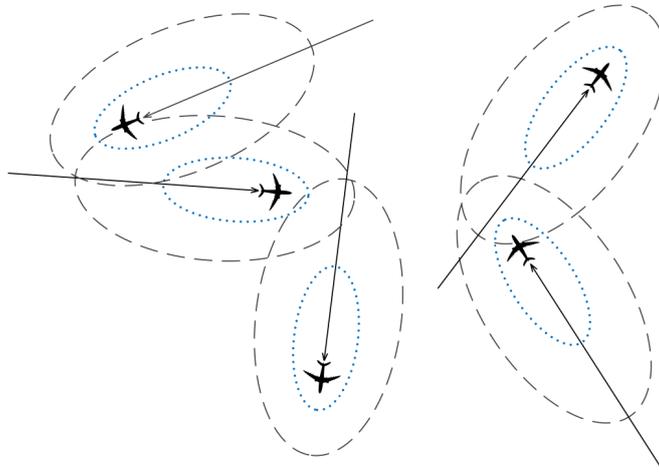


**Abbildung 4.1.:** Phasen des Auswertungsprozess, nach [42]

Im Folgenden wird aus dem allgemeinen Interpretationsprozess das spezielle Vorgehen zur Analyse von Unsicherheiten in der Trajektorienplanung beschrieben. Die einzelnen Prozessschritte sollen durch die System-Implementierung weitgehend automatisiert werden.

Physikalische Objekte können bei einer Abweichung von einer geplanten Trajektorie Divergenzen in allen vier Dimensionen aufweisen. Das bedeutet, die drei räumlichen Unsicherheiten zu einem bestimmten Zeitpunkt sind durch ein Ellipsoid beschreibbar. Die Größe solcher Fehler-Ellipsoide wird durch Vektoren in Richtung der drei Achsen angegeben: longitudinaler Fehlervektor (*along-track*), diagonaler Fehlervektor (*cross-track*) und vertikaler Fehlervektor. Um die Vektoren berechnen zu können, werden in Berechnungsverfahren zur *Trajektorienbewertung* (4.4) die zugehörigen Gleichungen hergeleitet. In Abbildung 4.2 ist die Projektion der Ellipsoide auf die horizontale 2D Ebene gezeigt. Es wird deutlich, dass der Ellipsoid bei besseren Parameterprognosen eine kleinere Varianz aufweist (blaue

Linie). Als Folge überschneiden sich die unsicheren Bereiche nicht, dadurch entstehen keine möglichen Konflikte. [8]



**Abbildung 4.2.:** Visualisierung von Unsicherheiten durch Ellipsoide, nach [8]

#### **Messung der Varianz:**

In den Entwicklungen dieser Arbeit wird für einen Flug eine Referenztrajektorie unter durchschnittlichen Umweltbedingungen mit Hilfe einer Schnellzeitsimulation berechnet. Die Referenztrajektorie repräsentiert die vom Trajektoriengenerator (siehe Kapitel 2.2) am Boden oder im Flugzeug prognostizierte Trajektorie. Die mögliche Varianz des Ellipsoids (Unsicherheit) wird bestimmt, indem der gleiche Flug mit variierten Input-Parametern (aus Kapitel 2.5.2) erneut durch den Simulator abgeflogen wird. Zwischen den Iterationen werden die Parameter endlich oft in einem Bereich, welcher der Realität entspricht, verändert. Die Menge der neuen Trajektorien repräsentiert die tatsächlich geflogenen Flugrouten. Die Summe der Flüge ergibt einen Trajektorienchwarm. Zur Bestimmung der Abweichung werden die tatsächlichen Flugrouten mit der Referenzroute verglichen.

Bei zu großen Datenmengen soll es möglich sein, dass die Fehler nicht für jeden sekundlich aufgezeichneten Spurpunkt berechnet werden. Dafür wird die Trajektorie in Phasen eingeteilt. Es werden nur die Positionen zu signifikanten Ereignissen (Eintritt in den Flughafennahbereich, Erreichen von einer Höhe von 1000 ft), Phasenübergängen (TOC, TOD) und während der einzelnen Flugphasen im Abstand von 15 Minuten analysiert. Steig- und Sinkflug gilt es genauer zu betrachten und detaillierter darzustellen, da diese schwieriger vorausszusehen sind.

#### **Erfassung der Statistiken:**

Mit Hilfe der unterschiedlichen Trajektorien wird durch Interpolation ein möglicher Bereich (Ellipsoid) bestimmt, in dem sich das Flugzeug potenziell aufhält. Der Bereich resultiert aus den Abweichungen der Ist-Parameter von den geschätzten Eingangsparametern. Von den Messungen ausgehend wird eine Bibliothek mit Statistiken aufgestellt. Ähnlich zu Tabelle 4.1 wird dokumentiert, wie sehr die Trajektorie bei bestimmten Umweltveränderungen von der vorhergesagten Trajektorie abweicht. Die Abweichungen definieren die Ausmaße des Ellipsoids und stellen so die Unsicherheit dar.

Time/ Position	Environment	Horiz. Err [NM]	Diag. Err [NM]	Long. Err [NM]	Vert. Err [ft]
20:34:00 N 533915,13 E 0093542,24	Wind: -6 kt Temp.: +8°C Weight: +0,2 t	2,1	-0,1	2,1	2096
21:40:23 N 483546,90 E 0121626,14	Wind: -20 kt Temp.: +12°C Weight: -0,4 t	16,5	8,9	-21,5	4952

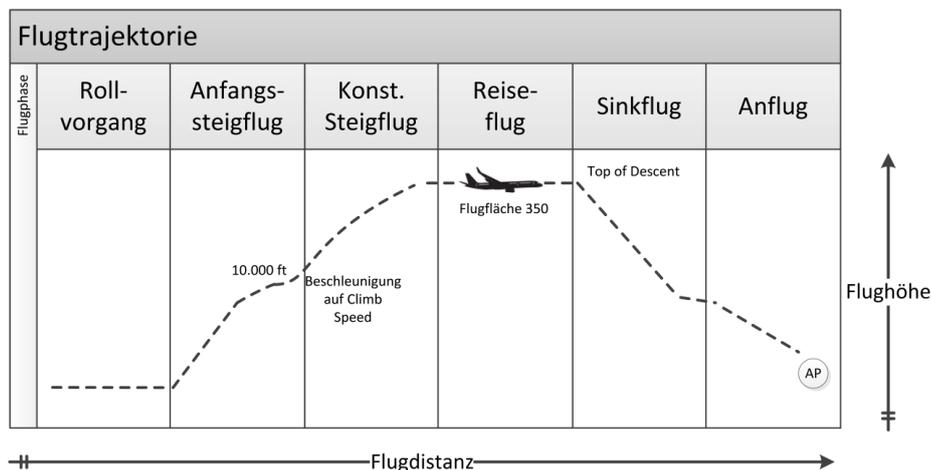
**Tabelle 4.1.:** Metrik zur Bewertung von Trajektorienabweichungen, nach [43]

### Modell der Unsicherheiten:

Anhand der Messungen und Statistiken wird in dieser Masterarbeit die Planungsunsicherheiten modelliert. Durch Wahrscheinlichkeitsverteilung wird um die Referenzkurve ein Raum berechnet, in dem sich ein Flugzeug aufhalten wird. Damit ist man in der Lage, mögliche Abweichungen von der prognostizierten Route auf verschiedene Verkehrssituationen zu übertragen.

### Visualisierung:

Von der Referenztrajektorie ausgehend wird der unsichere Bereich dargestellt. In Form von Abweichungs-Diagrammen kann ausgehend von einer Referenz (entspricht 0 Abweichung) der Wertebereich des Fehlers gezeichnet werden. Für die qualitative Analyse wird die Trajektorie gezeichnet und die Unsicherheit durch veränderte Farbe oder Intensität ergänzt. Da die Planungsgenauigkeit vom Zeitpunkt der Vorhersage abhängig ist, wird in der Auswertung die Option eines Zeitreglers zur Verfügung gestellt.



**Abbildung 4.3.:** Trajektorienrepräsentation durch das Point-Transit-Modell, nach [33]

### Software:

Der gewählte Ansatz wird durch eine Java-Anwendung umgesetzt. Nach dem EVA-Prinzip (Eingabe-Verarbeitung-Ausgabe) wird die Anbindung des Simulators durch Laden der Rohdaten in eine relationale Datenbank realisiert. Die Datenbank dient in der Verarbeitungsphase als Filter der Input-Daten. Schließlich werden die Daten zur Trajektorienun-

sicherheit für die graphische Ausgabe generiert. Für die Repräsentation der Trajektorie gibt es verschiedene Modelle. In der Modulentwicklung wird das in Abbildung 4.3 dargestellte *Point-Transit-Modell* als Basis gesehen. Bei diesem Ansatz werden Flugbahnen durch zeitliche Punktübergänge abstrahiert. Zwischen den Punkten wird mit konstanter Geschwindigkeit linear interpoliert. Die Geschwindigkeit kann aus Weg und Zeit berechnet werden. Die Positionsdaten werden vom *TrafficSim* etwa im fünf Sekunden Takt aufgezeichnet.

## 4.2. Anforderungen an das Visualisierungsmodul

Für den gewählten Ansatz dieser Arbeit werden Anforderungen definiert, um die Funktionalität eindeutig gewährleisten zu können. In den nachstehenden Abschnitten wird der Funktionsumfang des Moduls erarbeitet.

### Bestimmung von Planungsunsicherheiten:

Es wird im Folgenden zwischen Prozess A und Prozess B unterschieden, welche die getrennten Arbeitsschritte der Auswertungssoftware kennzeichnen. Im Prozesslauf A liegen für einen Flug mehrere Trajektorien vor und es sind noch keine Statistiken über Abweichungen erstellt (siehe Abbildung 4.4). Der Trajektorienschwarm wird in Bezug auf die Referenztrajektorie untersucht. Aus den berechneten Fehlern wird anschließend die Statistik über die Unsicherheit der geplanten Trajektorie ermittelt. Weiterführend werden die Fehler in der Darstellung ausgegeben.

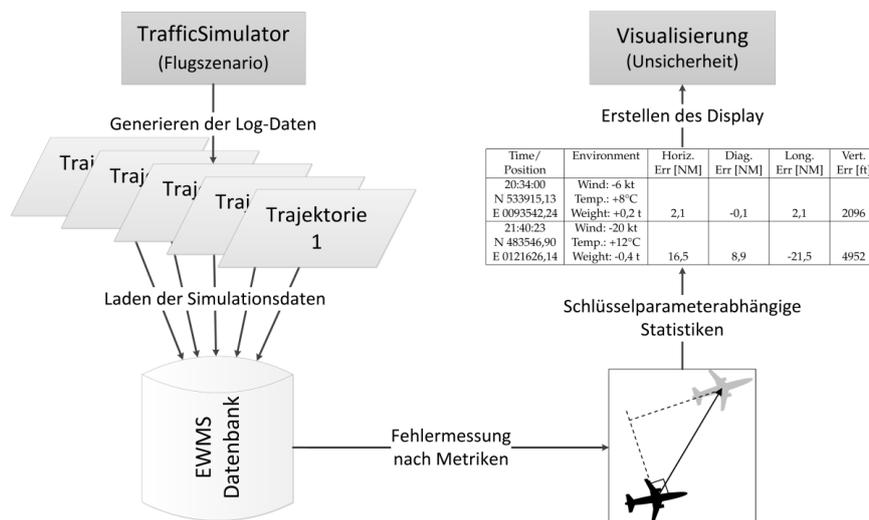


Abbildung 4.4.: Auswertungsprozess A (noch keine Statistik aufgestellt)

Prozess B unterscheidet sich von A, indem die Unsicherheiten zu einer bestimmten Trajektorie simuliert werden (siehe Abbildung 4.5). Für diesen Anwendungsfall muss eine Statistik über Abweichungen bereits berechnet sein. Das heißt, die Statistiken aus Prozess A werden zur Prognose herangezogen.

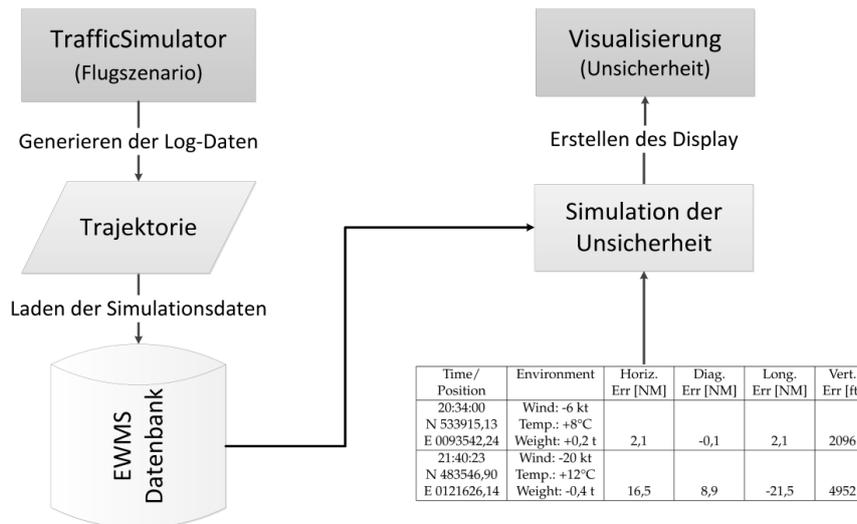


Abbildung 4.5.: Auswertungsprozess B (Unsicherheiten werden anhand der Statistiken simuliert)

### Anforderungen an die Datenbank:

Der Algorithmus zur Bewertung von Planungsunsicherheiten arbeitet mit großen Datenmengen, die gespeichert und abgefragt werden müssen (siehe Abbildung 4.6). Die Tabellen der Datenbank müssen so aufgeteilt sein, dass sie gute Suchmöglichkeiten aufweisen. Das heißt, die Daten müssen in so viele nützliche Tabellen wie möglich gegliedert werden. In dieser Arbeit werden Flugtrajektorien aus berechneten Simulationsdaten gelesen, dabei bleibt das Format konsistent. Jedoch soll das Modul in der Lage sein, Daten aus beliebigen anderen Quellen (Radardaten oder anderen Simulationen) mit anderen Formaten einzulesen und zu speichern. Daraus folgt, dass das Datenbankschema generisch für die Schlüsselindikatoren entwickelt werden muss.

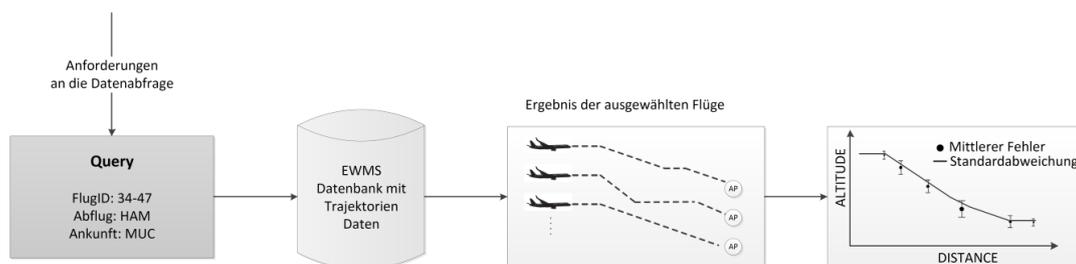


Abbildung 4.6.: Konzeptionelle Datenbankabfrage, nach [44]

### Display:

Unsicherheiten eines Objekts mit einer Orientierung zu einem bestimmten Zeitpunkt im Raum können als 3D-Ellipsoid mit angegebener Bewegungsrichtung betrachtet werden. Je größer die Unsicherheiten der Parameter sind, desto größer ist das Ellipsoid. Potenzielle Konflikte lassen sich durch das Überlappen der Ellipsoide identifizieren. Ein Maß für die Wahrscheinlichkeit eines Konflikts ist die Volumengröße der Schnittkörper. Das Display soll zum einen die Diagramme für die skalaren Werte darstellen und zum anderen eine geografische Visualisierung anbieten. Die prognostizierten Werte sollen in einem gesättigten

Farbton und die möglichen Abweichungen heller oder transparent gezeichnet werden. Des Weiteren ist eine interaktive Kontrolle über die Darstellung zu implementieren um Informationen beim Anklicken zu erhalten.

Mögliche Darstellungen:

- Prognoseunsicherheit in Bezug auf die Flugzeit
- Ellipsoid zu einem bestimmten Zeitpunkt auf einer Karte
- Flugroute mit Unsicherheiten auf einer Karte

Einstellungen und Interaktionen mit dem Benutzer:

- Zooming
- Szenarioinformationen in Textform
- Label an das Ellipsoid

Zur Analyse der Ergebnisse soll ein Export in Form einer Excel Tabelle mit Zeit, Position, maximaler horizontaler Abweichung [NM], maximaler vertikaler Abweichung [ft] und zeitlicher Abweichung [s] implementiert werden.

### 4.3. Trajektoriengenerierung und -bewertung

Die Berechnung der Trajektorien basiert, wie in Abschnitt 2.2 bereits thematisiert, auf den Eigenschaften des Flugzeugs nach BADA<sup>1</sup> und den Umweltbedingungen (Wind, Temperatur). In der BADA-Datenbank sind die Bewegungs- und Performance Modelle der verschiedenen Flugzeugtypen gespeichert. Die Daten werden von *Eurocontrol* in Zusammenarbeit mit *Boeing Research* entwickelt und verwaltet. Fehlerquellen bei der Trajektoriengenerierung werden nach *ERASMUS* [45] in fünf Kategorien eingeteilt:

1. Modellierungsfehler
2. Fehler in der Initialisierung des Zustandsvektors
3. Flugzeugspezifische Fehler
4. Fehler in den meteorologischen Prognosen
5. Fehler in den angenommenen Flugabsichten

Die Exaktheit der vorberechneten Trajektorien wird durch die Qualität der Input-Daten und des Berechnungsmodells bestimmt. In diesem Abschnitt wird unter anderen der Nachweis der Einflussparameter, durch das Einführen der Bewegungsgleichungen (siehe Formeln 4.1–4.5) aus dem Modell zur Trajektoriengenerierung, gebracht. Die Gleichungen sind in *Trajektorienberechnung zur Automatisierung des Luftverkehrs* [46] hergeleitet und veranschaulichen den potenziellen Effekt von Prognoseunsicherheiten von Parametern unter der Annahme einer konstanten Masse ( $\dot{m} = 0$ ).

#### Nomenklatur

$D$	=	Strömungswiderstandskoeffizient [lb]
$h$	=	Höhe [ft]
$L$	=	Dynamischer Auftrieb [lb]
$m$	=	Flugzeugmasse [lb]
$T$	=	Triebwerksschub [lb]
$V_g$	=	Geschwindigkeit über Grund [kn]
$V_t$	=	Tatsächliche Geschwindigkeit [kn]
$W_l$	=	Horizontale Windstärke [kn]
$x, y$	=	Positionen [NM]
$\gamma_a$	=	Winkel relativ zur Luft [grad]
$\gamma_i$	=	Trägheitswinkel zur Flugbahn [grad]
$\phi_a$	=	Querneigungs-Winkel [grad]
$\psi_i$	=	Heading [grad]
$\psi_w$	=	Windrichtung [grad]
$\psi_{rel}$	=	Relative Windrichtung, $\psi_i - \psi_w$ [grad]

<sup>1</sup>Eurocontrol Datenbank - BADA (engl. Base of Aircraft Data) [25]

## Bewegungsgleichungen zur Trajektorienberechnung

$$\dot{V}_t = \frac{T - D}{m} - g \cdot \gamma_a - \frac{d(W_I \cdot \cos \psi_{rel})}{dt} \quad (4.1)$$

$$\dot{h} = V_t \cdot \gamma_a = V_g \cdot \gamma_i \quad (4.2)$$

$$\dot{\psi}_i = \frac{L \cdot \sin \phi_a}{m \cdot V_g} \quad (4.3)$$

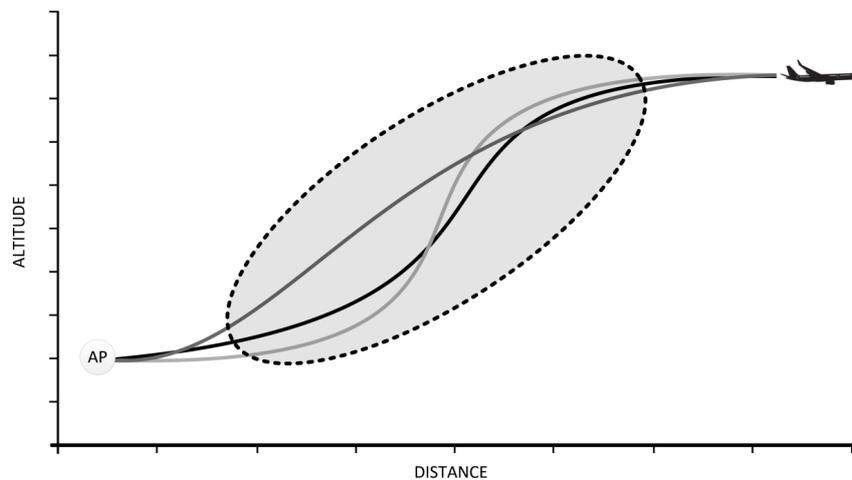
$$\dot{x} = V_g \cdot \sin \psi_i \quad (4.4)$$

$$\dot{y} = V_g \cdot \cos \psi_i \quad (4.5)$$

In Gleichungen 4.1 und 4.2 haben Abweichungen von Flugzeuggewicht ( $m$ ), Schub ( $T$ ), Strömungswiderstand ( $D$ ), Windstärke ( $W_I$ ) und -richtung ( $\psi_{rel}$ ), aufgrund der Veränderung der Geschwindigkeit ( $\dot{V}_t$ ), Einfluss auf die Höhe der Trajektorie. Darüber hinaus verändert sich, basierend auf Unsicherheiten der Parameter, die Fluggeschwindigkeit und somit die x-y-Position (siehe Gleichungen 4.3–4.5). Die Flugzeugspezifischen Daten sind nicht allgemeingültig definiert, sondern können auch zwischen einzelnen Flugzeugen des selben Typs und der selben Airline abweichen. Somit ist die erste Fehlerquelle in den Performance-Daten zu sehen. Eine weitere Komponente bei der Berechnung sind die Windvorhersagen, die vom Wetterdienst bekannt gegeben werden. Da es auch in Zukunft keine perfekten Prognosen über die Windverhältnisse geben kann, verbirgt sich in den Windvorhersagen eine weitere Fehlerquelle. Die Luft-Temperatur beeinflusst zum einen den Strömungswiderstand und zum anderen die Leistungsfähigkeit der Triebwerke. Hierfür ist zu beachten, dass die Fluggeschwindigkeit zwischen Geschwindigkeit über Grund GS (engl. ground speed) und wahrer Fluggeschwindigkeit TAS (engl. true air speed) unterschieden wird. Die TAS ist die Geschwindigkeit relativ zur umgebenden Luft. Bei einer höheren Temperatur erhöht sich auch der Luftwiderstand. Daraus resultiert, dass sich bei gleichbleibender korrigierten Fluggeschwindigkeit CAS (engl. calibrated air speed), die tatsächliche Luftgeschwindigkeit TAS und somit auch der GS erhöht. Jedoch verringert sich die Leistung der Triebwerke bei höheren Temperaturen, sodass der Schub für eine konstante CAS erhöht werden muss. Daraus resultiert, dass mit erhöhter Schubkraft mehr Treibstoff verbraucht wird. [47]

Selbst unter der Annahme von exakter Informationen über die Einflussparameter würden Berechnungsmodelle keine fehlerfreie Vorhersage für die Flugtrajektorie treffen. Das ist durch die Vereinfachungen und Approximationen bei der Modellierung der Realität zu begründen. Nach ERASMUS [45, S. 19] gibt es drei verschiedene Ansätze zur Modellierung von Flugtrajektorien (six degree-of-freedom-, point mass- and macroscopic model), die im Grad der Approximation abnehmen. Die Berechnungen des *TrafficSim* basieren

auf dem Punkt-Masse-Modell. Bei der Modelldefinition stellt es eine Schwierigkeit dar, den menschlichen Parameter und die persönlichen Verhaltensweisen eines Piloten zu modellieren. So ist vorstellbar, dass eine Fluganweisung des Lotsen durch den Piloten zu unterschiedlichen Zeiten und in verschiedenen Formen ausgeführt wird. Als Beispiel wird in Abbildung 4.7 die Anweisung des Lotsen zur Änderung der Flughöhe bis zu einem bestimmten Punkt angeführt. Wann genau der Pilot mit seinem Steigflug beginnt und in welcher Form dieser ausgeführt wird, kann nicht klar definiert werden. Der Bereich der unterschiedlichen Flugbahnen wird als Unsicherheit in Form eines Ellipsoids, wie in der Abbildung 4.7, definiert. [8]

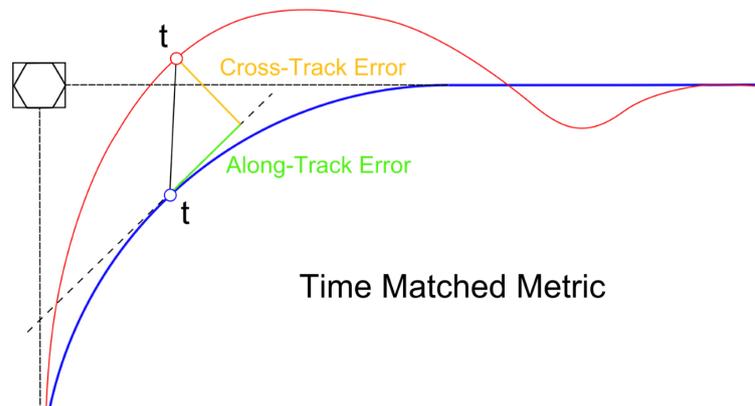


**Abbildung 4.7.:** Unsicherheit bei unterschiedlichen Steigprofilen, nach [8]

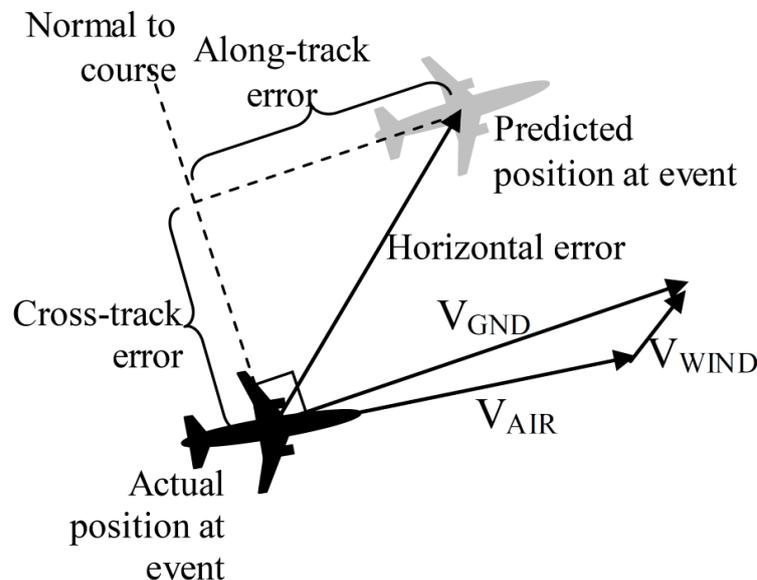
Beim Ansatz in dieser Masterarbeit werden Piloten und Lotsen von der Simulationssoftware modelliert. Die Flugabsichten bleiben über die gesamte Flugdauer konsistent. Außerdem wird von einer exakten Übereinstimmung der durch den Simulator geflogenen Trajektorie mit der geplanten Trajektorie des FMS ausgegangen. Der menschliche Einfluss kann durch Variation von Flugvarianten an den Wegpunkten nachgebildet werden. Für die zu entwickelnde Anwendung haben der flugzeugspezifische Prognosefehler (Leistungsdaten, Flugzeuggewicht) und Fehler in den Vorhersagen der meteorologischen Daten (Luftdruck, Temperatur, Wind) Einfluss auf die Planungsgenauigkeit der Flugtrajektorien. Als Genauigkeit einer Trajektorienplanung wird der Übereinstimmungsgrad der berechneten Trajektorie zu der tatsächlich geflogenen Trajektorie bezeichnet [43]. Zur Bestimmung der Genauigkeit werden die prognostizierten Trajektorien mit dem eigentlichen Flugweg verglichen. Die Abweichungen von der Trajektorienvorhersage werden für die verschiedenen Dimensionen (lateral, vertikal, longitudinal und temporal) gemessen [12]. Unterschiede können in allen drei Raum-Koordinaten und in der Zeit auftreten. Das bedeutet, die Differenz von zwei Punkten lässt sich in Bezug auf die räumliche oder zeitliche Komponente beschreiben.

Die Berechnung der **räumlichen Abweichung** zwischen zwei Trajektorien erfolgt mit der *Interval Based Sampling Technique* nach [43]. Diese Methode basiert auf zeitlichem Abtastverfahren und wurde durch die FAA entwickelt. Es wird jeweils ein Punkt der zu vergleichenden Trajektorien mit identischer Zeitkoordinate ausgewählt (siehe Abbildung

4.8). Die räumliche Distanz wird dreidimensional oder getrennt für die horizontale und die vertikale Komponente berechnet. Das Aufteilen der horizontalen Abweichungskomponente erfolgt je nach Zielsetzung anteilig in Quer- und Längsrichtung zum Flug. Diese Fehleranteile werden durch Vektoren beschrieben, dabei spricht man von den Vektoren für *Cross-track error* und *Along-track error*. Als Summe der beiden Vektoren ergibt sich der Vektor für den *horizontal error* (siehe Abbildung 4.9). [43, 45, S. 81]



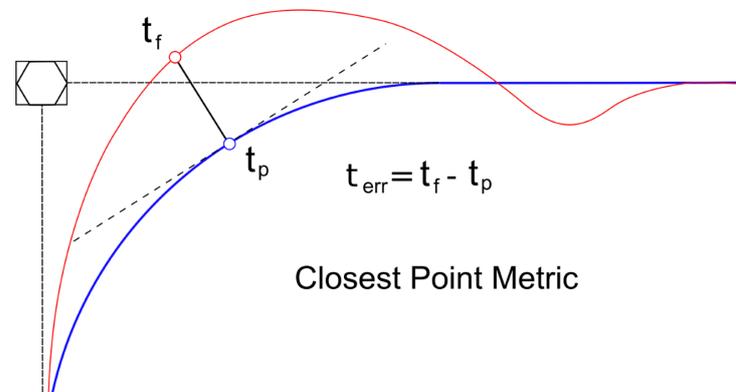
**Abbildung 4.8.:** Methode zur Berechnung der räumlichen Abweichung zwischen zwei Trajektorien [45]



**Abbildung 4.9.:** Fehlervektoren bei der räumlichen Abweichung [12].

Bei der Bestimmung der **zeitlichen Abweichung** werden zwei geometrische Punkte mit der größten Annäherung bestimmt und die Differenz der Zeit berechnet (siehe Abbildung 4.10). Bei dieser Analyse beschreibt der zeitliche Fehler die Zeitdifferenz zwischen der prognostizierten und der entsprechenden tatsächlichen Trajektorie zum Zeitpunkt eines bestimmten Events. Dieser Ansatz wird angewendet, um für eine bestimmte Position (Landebahn, Parkposition) oder Ereignis (TOC, TOD) zu untersuchen, ob das Flugzeug evtl.

zu früh oder zu spät ankommt. Der minimale Abstand muss dabei identifiziert werden, da z.B. die Schwelle der Landebahn eine Strecke ist und es endlich viele Positionen gibt, an denen sie überflogen werden kann.



**Abbildung 4.10.:** Methode zur Berechnung der zeitlichen Abweichung zwischen zwei Trajektorien [45]

In den vorangegangenen Abschnitten wurde ein Überblick und ein Grundverständnis über die Verarbeitung von Trajektorien Daten vermittelt, welches für das Verständnis des Darstellungskonzepts benötigt wird.

## 4.4. Berechnungsverfahren zur Trajektorienbewertung

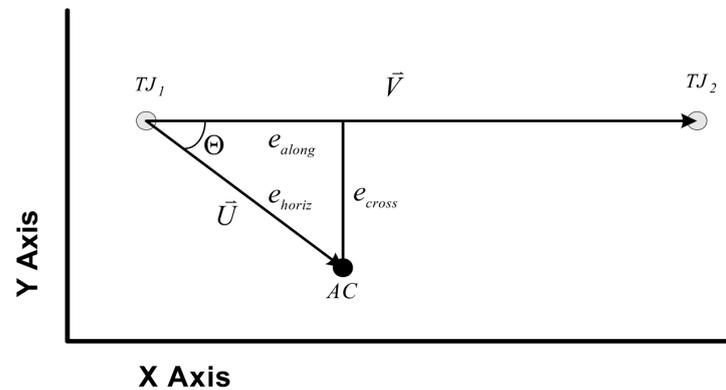
Laut den in Abschnitt 4.2 definierten Anforderungen ist eine generische Metrik zur Bewertung der Trajektoriengenauigkeit zu definieren. In diesem Kontext bedeutet generisch die Möglichkeit der Auswertung für jeden beliebigen Punkt zweier beliebiger Trajektorien sowohl im kartesischen Koordinatensystem als auch in geographischen Koordinatensystem. Durch die Metrik wird ein elliptischer Raum, in dem sich ein Flugzeug zu einem Zeitpunkt befinden kann, berechnet. Wie bereits beschrieben, wird bei der Trajektorienbewertung zwischen räumlicher und zeitlicher Abweichung unterschieden. Für die räumliche Abweichung werden horizontale Abweichungen der x-, y-Koordinaten bzw. Latitude, Longitude getrennt von der vertikalen Abweichung der z-Koordinate oder Altitude untersucht. In der theoretischen Beschreibung des Berechnungskonzepts werden die Formeln für die Berechnung im kartesischen System basierend auf ebener Trigonometrie und im geographischen System basierend auf sphärischer Trigonometrie hergeleitet.

### 4.4.1. Horizontale Abweichung der Flugroute

Bei der Herleitung der horizontalen Abweichung ist zu unterscheiden, ob kartesische Koordinaten oder geographische Koordinaten verwendet werden.

### Berechnung mit kartesischen Koordinaten:

Um die Metriken für die Berechnung zu beschreiben und Formeln verständlich zu entwickeln, ist in Abbildung 4.11 eine Abstraktion von Abbildung 4.9 dargestellt. Die Darstellung hilft bei der folgenden Herleitung der Formeln nach [43].



**Abbildung 4.11.:** Drei Metriken zur Bewertung der Planungsgenauigkeit (planare Trigonometrie) [43]

Zu Beginn werden die Koordinaten der Trajektorienpunkte ( $TJ_1$  und  $TJ_2$ ) und des Flugzeugs ( $AC$ ) durch Gleichungen 4.6 definiert.

$$\begin{aligned} AC &= \begin{pmatrix} x_{AC} \\ y_{AC} \end{pmatrix} \\ TJ_1 &= \begin{pmatrix} x_{TJ_1} \\ y_{TJ_1} \end{pmatrix} \\ TJ_2 &= \begin{pmatrix} x_{TJ_2} \\ y_{TJ_2} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Eine Abweichung bzw. Unsicherheit von der prognostizierten Trajektorie wird durch Vektor  $\vec{U}$  dargestellt. Vektor  $\vec{V}$  gibt das Streckensegment zwischen zwei aufeinanderfolgenden Wegpunkten an. Der Abstand wird durch die Gleichungen 4.7 und 4.8 berechnet.

$$\vec{U} = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{AC} - x_{TJ_1} \\ y_{AC} - y_{TJ_1} \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

$$\vec{V} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{TJ_2} - x_{TJ_1} \\ y_{TJ_2} - y_{TJ_1} \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

In den nächsten Berechnungsschritten werden die Formeln zum Ermitteln der Fehler  $e_{horiz}$ ,

$e_{along}$  und  $e_{cross}$  hergeleitet und erläutert.

**Horizontale Abweichung**  $e_{horiz}$

Trivial kann der horizontale Fehler als Betrag von Vektor  $\vec{U}$  dargestellt werden:

$$e_{horiz} = |\vec{U}| = \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \quad (4.9)$$

**Abweichung in Flugrichtung (Longitudinal)**  $e_{along}$

Für den *along-track* Fehler muss der Winkel  $\Theta$ , dargestellt in Abbildung 4.11, zwischen den Vektoren  $\vec{U}$  und  $\vec{V}$  ermittelt werden. Das Skalarprodukt gibt Auskunft über den Winkel zwischen zwei Vektoren und kann wie folgt dargestellt werden:

$$\vec{U} \cdot \vec{V} = |\vec{U}| \cdot |\vec{V}| \cdot \cos \Theta \quad (4.10)$$

$$\cos \Theta = \frac{\vec{U} \cdot \vec{V}}{|\vec{U}| \cdot |\vec{V}|} \quad (4.11)$$

Der *along-track* Fehler ( $e_{along}$ ) ist die Projektion von  $\vec{U}$  auf  $\vec{V}$ . Für die Projektion muss der Winkel zwischen den beiden Vektoren bestimmt werden.

$$e_{along} = |\vec{U}| \cdot \cos \Theta = \frac{|\vec{U}| \cdot (\vec{U} \cdot \vec{V})}{|\vec{U}| \cdot |\vec{V}|} = \frac{(\vec{U} \cdot \vec{V})}{|\vec{V}|} \quad (4.12)$$

Numerisch kann man diesen Fehler berechnen aus:

$$e_{along} = |\vec{U}| \cdot \cos \Theta = \frac{(\vec{U} \cdot \vec{V})}{|\vec{V}|} = \frac{u_x v_x + u_y v_y}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \quad (4.13)$$

**Diagonaler Fehler**  $e_{cross}$

Für die Definition des *cross-track* Fehler muss das Kreuzprodukt der Vektoren  $\vec{U}$  und  $\vec{V}$  berechnet werden:

$$\vec{U} \times \vec{V} = \hat{n} \cdot |\vec{U}| \cdot |\vec{V}| \cdot \sin \Theta \quad (4.14)$$

Dabei beschreibt  $\hat{n}$  den Einheitsvektor, der senkrecht auf  $\vec{U}$  und  $\vec{V}$  steht. Folgend wird die Gleichung zur Vereinfachung umgeformt. Der Betrag des Kreuzprodukts gibt den Inhalt

der von  $\vec{U}$  und  $\vec{V}$  aufgespannten Fläche an:

$$|\vec{U} \times \vec{V}| = |\vec{U}| \cdot |\vec{V}| \cdot \sin \Theta \quad (4.15)$$

$$\sin \Theta = \frac{|\vec{U} \times \vec{V}|}{|\vec{U}| \cdot |\vec{V}|} \quad (4.16)$$

Durch Erweiterung kann die Formel für  $e_{cross}$  zusätzlich vereinfacht werden:

$$e_{cross} = |\vec{U}| \cdot \sin \Theta = \frac{|\vec{U}| \cdot (|\vec{U} \times \vec{V}|)}{|\vec{U}| \cdot |\vec{V}|} = \frac{(|\vec{U} \times \vec{V}|)}{|\vec{V}|} \quad (4.17)$$

Es sollte bedacht werden, dass für die z-Koordinaten der Wert „null“ angenommen wird. Daraus ergibt sich folgende numerische Auflösung der Formel:

$$e_{cross} = \frac{u_x v_y - u_y v_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \quad (4.18)$$

Um die Kennzahl für die horizontale Abweichung anwenden zu können, wird zur Position einer Flugroute (Punkt  $AC$  in Abbildung 4.11) die zeitkorrespondierende Position einer Referenztrajektorie (Punkt  $TJ_1$ ) bestimmt. [43]

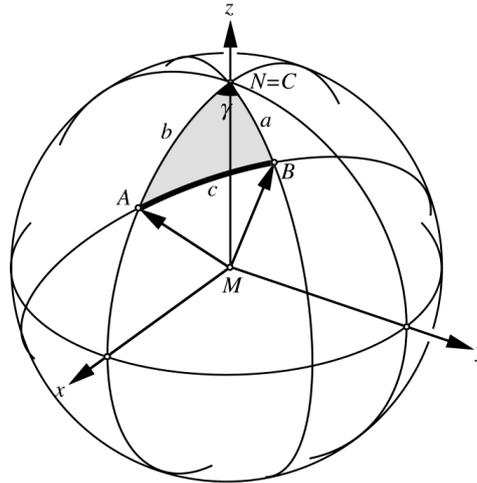
Interpretation:

- *along-track* Abweichung ist negativ ( $e_{along} \leq 0$ ) → das Flugzeug befindet sich östlich der geplanten Trajektorie.
- *cross-track* Abweichung ist negativ → das Flugzeug befindet sich in Flugrichtung links der Vorhersage.

### **Berechnung mit geografischen Koordinaten:**

Von den Gleichungen der sphärischen Trigonometrie ausgehend, müssen zusätzlich die Winkel und Abstände aus den geografischen Koordinaten berechnet werden. Die Formeln zur Berechnung werden mit Hilfe der sphärischen Trigonometrie aus [48] hergeleitet. Die Herleitungen unterliegen der Annahme, dass der Erdkörper der Form einer Kugel gleicht. Für die Berechnung von Abständen und Winkeln in der Luftfahrt ist die sphärische Trigonometrie nach [49] ein verbreitetes Verfahren. Wichtige Unterschiede zur ebenen Geometrie: Eine Dreiecksseite wird als Winkel zwischen zwei Punkten und dem Mittelpunkt

aufgefasst. Zudem sind die drei Winkel eines sphärischen Dreiecks nicht voneinander abhängig. In Abbildung 4.12 ist ein allgemeines Kugeldreieck dargestellt, wobei sich der Koordinatenursprung in Punkt  $M$  befindet.



**Abbildung 4.12.:** Bezeichnungen in der sphärischen Trigonometrie (Kugeldreieck), nach [48]

Für die Berechnung von Abständen und Winkeln zwischen zwei beliebigen Punkten gilt in einem allgemeinen Kugeldreieck der Seiten-Kosinussatz (siehe Formeln 4.19 – 4.21).

$$\cos a = \cos b \cdot \cos c + \sin b \cdot \sin c \cdot \cos \alpha \quad (4.19)$$

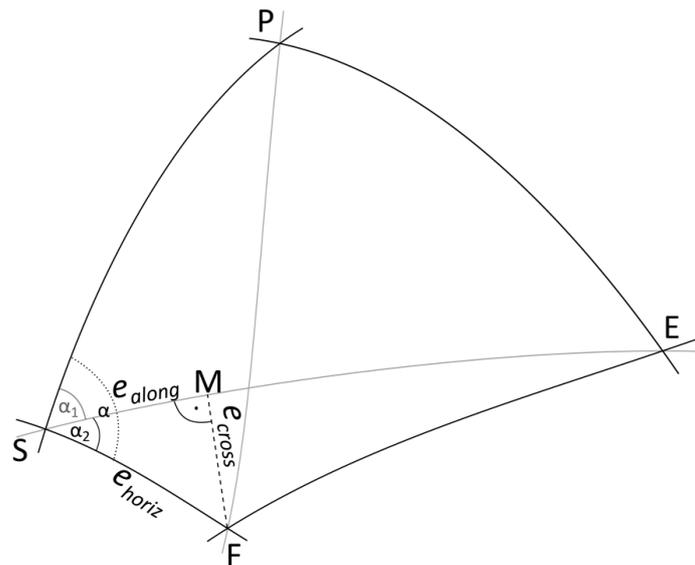
$$\cos b = \cos a \cdot \cos c + \sin a \cdot \sin c \cdot \cos \beta \quad (4.20)$$

$$\cos c = \cos a \cdot \cos b + \sin a \cdot \sin b \cdot \cos \gamma \quad (4.21)$$

Der geografische Breitengrad einer Koordinate definiert die Lage zum Nordpol und der Winkel von Nordpol zum Äquator beträgt  $90^\circ \hat{=} \frac{\pi}{2}$ . Diese Eigenschaft wird ausgenutzt, indem der Punkt  $C$  des Dreiecks mit der Position des Nordpols gleichgesetzt wird. Die Beziehung zwischen Nordpol ( $P$ ), 1. Trajektorienpunkt ( $S$ ), 2. Trajektorienpunkt ( $E$ ) und Position des Flugzeugs ( $F$ ) wird durch die Abbildung 4.13 skizziert.

Ausgehend von den Punkten  $E(\varphi_E, \lambda_E)$  und  $S(\varphi_S, \lambda_S)$  wird die Strecke  $\overline{SP}$  zum Nordpol durch Formel 4.22 und Seite  $\overline{EP}$  durch Formel 4.23 angegeben. Zusätzlich ist der Zwischenwinkel  $\lambda_E - \lambda_S$  gegeben und die gegenüberliegende Seite  $\overline{SE}$  ist gesucht.

$$\overline{SP} = 90^\circ - \varphi_S \quad (4.22)$$



**Abbildung 4.13.:** Drei Metriken zur Bewertung der Planungsgenauigkeit (sphärische Trigonometrie)

$$\overline{EP} = 90^\circ - \varphi_E \quad (4.23)$$

Aus dem Seiten-Kosinussatz ergibt sich:

$$\cos \overline{SE} = \cos (90^\circ - \varphi_E) \cdot \cos (90^\circ - \varphi_S) + \sin (90^\circ - \varphi_E) \cdot \sin (90^\circ - \varphi_S) \cdot \cos (\gamma_E - \gamma_S) \quad (4.24)$$

$$\cos \overline{SF} = \cos (90^\circ - \varphi_F) \cdot \cos (90^\circ - \varphi_S) + \sin (90^\circ - \varphi_F) \cdot \sin (90^\circ - \varphi_S) \cdot \cos (\gamma_F - \gamma_S) \quad (4.25)$$

Da  $\cos (90^\circ - \varphi) = \sin \varphi$  und  $\sin (90^\circ - \varphi) = \cos \varphi$ , erhalten wir  $\overline{SE}$  in Grad. Für den Abstand der Strecke [NM] muss noch mit  $r = 60$  multipliziert werden (ein Grad entspricht 60 NM):

$$|\overline{SE}| = r \cdot \arccos (\sin \varphi_E \cdot \sin \varphi_S + \cos \varphi_E \cdot \cos \varphi_S \cdot \cos (\gamma_E - \gamma_S)) \quad (4.26)$$

$$|\overline{SF}| = r \cdot \arccos (\sin \varphi_F \cdot \sin \varphi_S + \cos \varphi_F \cdot \cos \varphi_S \cdot \cos (\gamma_F - \gamma_S)) \quad (4.27)$$

Zur vollständigen Herleitung der Metrikwerte sind die Winkel  $\alpha$ ,  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  zu berechnen. Aus dem Dreieck  $\triangle SEP$ , in dem alle Strecken bekannt sind, kann  $\alpha_1$  mit Formel 4.28, welche sich durch Umstellen von Formel 4.19 ergibt, berechnet werden. Analog berechnet sich  $\alpha$  in dem Dreieck  $\triangle SFP$ . Zum Berechnen von  $\alpha_2$  im Zieldreieck  $\triangle SFM$  ist eine Fallunterscheidung zu machen. Befindet sich der Punkt  $F$  östlich von  $S$  erhält man  $\alpha_2 = \alpha - \alpha_1$ , befindet sich  $F$  vor dem Startpunkt  $S$  ergibt sich  $\alpha_2 = \alpha - (180 - \alpha_1)$ .

$$\cos \alpha_1 = \frac{\cos \overline{EP} - \cos \overline{SP} \cdot \cos \overline{SE}}{\sin \overline{SP} \cdot \sin \overline{SE}} \quad (4.28)$$

$$\cos \alpha = \frac{\cos \overline{FP} - \cos \overline{SP} \cdot \cos \overline{SF}}{\sin \overline{SP} \cdot \sin \overline{SF}} \quad (4.29)$$

Das identische Vorgehen wird zur Berechnung der Strecken  $\overline{SF}$  und  $\overline{FP}$  gewählt. Dabei sind die Vorzeichen wie folgt zu beachten:

- Nördliche Breite  $\rightarrow \oplus$
- Südliche Breite  $\rightarrow \ominus$
- Östliche Länge  $\rightarrow \oplus$
- Westliche Länge  $\rightarrow \ominus$

#### **Horizontale Abweichung** $e_{horiz}$

Der horizontale Fehler ist der Abstand  $\overline{SF}$  zwischen prognostizierter Position und tatsächlicher Position des Flugzeugs zum Zeitpunkt  $t$  und ergibt sich aus Formel 4.30 mit  $r = 60\text{NM}$ .

$$e_{horiz} = |\overline{SF}| \quad (4.30)$$

#### **Abweichung in Flugrichtung (Longitudinal)** $e_{along} = \overline{SM}$

Aus den vorangegangenen Entwicklungen sind in dem rechtwinkligen Zieldreieck  $SFM$  die Strecke  $\overline{SF}$  und der Winkel  $\alpha_2$  gegeben. Aus Formel 4.31 für das rechtwinklige Kugeldreieck ergibt sich für den longitudinalen Fehler die Länge der Strecke  $\overline{SM}$ .

$$\tan \overline{SM} = \tan \overline{SF} \cdot \cos \alpha_2 \quad (4.31)$$

$$e_{along} = |\overline{SM}| = r \cdot \arctan (\tan \overline{SF} \cdot \cos \alpha_2) \quad (4.32)$$

**Diagonaler Fehler**  $e_{cross}$

$$\sin \overline{FM} = \sin \alpha_2 \cdot \sin \overline{SF} \quad (4.33)$$

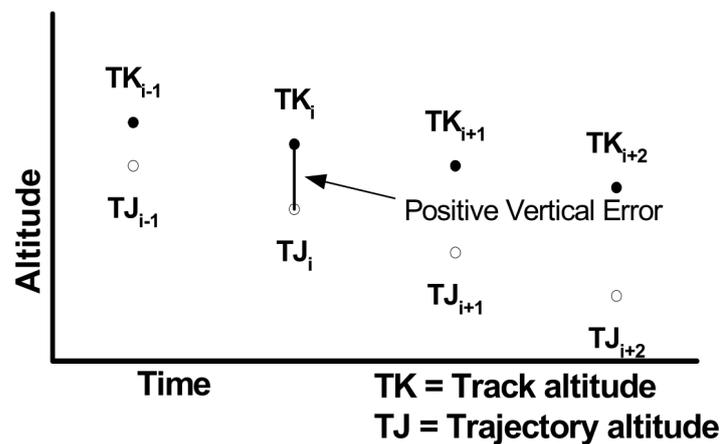
$$e_{cross} = |\overline{FM}| = r \cdot \arcsin(\sin \alpha_2 \cdot \sin \overline{SF}) \quad (4.34)$$

Interpretation:

- $\alpha_2 = \alpha - \alpha_1 < 0 \rightarrow$  Das Flugzeug befindet sich nördlich der geplanten Trajektorie.
- $\alpha_2 = \alpha - \alpha_1 > 0 \rightarrow$  Das Flugzeug befindet sich südlich der geplanten Trajektorie.

**4.4.2. Vertikale Abweichung der Flugroute**

Als vertikale Abweichung wird die Differenz der Flughöhen von prognostizierter Trajektorie und tatsächlichem Flugweg bezeichnet (siehe Abbildung 4.14). Dieser Fehler wird durch einen Vektor, der senkrecht auf der x-y-Ebene liegt, beschrieben. [43] Ein positiver Vektor sagt aus, dass die tatsächliche Position des Flugzeugs höher ist als die prognostizierte. Bei negativem Vorzeichen liegt die tatsächliche Flugbahn unterhalb der geplanten Flugbahn.



**Abbildung 4.14.:** Vertikale Trajektorienabweichung [43]

Die Position des Flugzeugs kann in Richtung der drei Achsen abweichen. Mit der möglichen Varianz der drei Achsen wird der Ellipsoid zur Beschreibung der Unsicherheit aufgebaut. Mit der Dauer des Fluges werden fortlaufend endlich viele Ellipsoide berechnet und ein Array:

$$A = t_i, E_i$$

mit dem Zeitstempel  $t$  der Position und der Form  $E$  des Ellipsoids gefüllt. Die Vereinigung der Ellipsoide beschreibt die gesamte Varianz des Fluges.

#### 4.4.3. Zeitliche Abweichung der Flugroute

Wie bereits oben beschrieben, bestimmt die zeitliche Abweichung die Zeitdifferenz zwischen zwei nächstgelegenen Positionen. Das heißt, für die Berechnung der zeitlichen Abweichung einer Flugzeugposition wird die Position der prognostizierten Trajektorie mit dem geringsten Abstand bestimmt. Die Distanz zwischen zwei Koordinaten wird nach der Formel von Vincenty [50] berechnet. Dabei wird zuerst die Entfernung zur zeitkorrespondierenden Position berechnet. Darauf folgt die Berechnung der Vorgänger und Nachfolger. Die Spurpunkte werden dann sequentiell in Richtung der kleineren Distanz abgesucht. Bei zwei Positionen mit identischem geringsten Abstand wird der Punkt mit der geringsten Zeitdifferenz gewählt, ist diese auch identisch wird zufällig einer definiert. Es können drei verschiedene Situationen auftreten:

- Die Position mit dem geringsten Abstand liegt vor dem zeitkorrespondierenden Spurpunkt → Das Flugzeug ist später als prognostiziert an der Position.
- Die Position mit dem geringsten Abstand liegt nach dem zeitkorrespondierenden Spurpunkt → Das Flugzeug ist früher als prognostiziert an der Position.
- Die Position mit dem geringsten Abstand stimmt mit dem zeitkorrespondierenden Spurpunkt überein → Das Flugzeug hat keine zeitliche Abweichung.

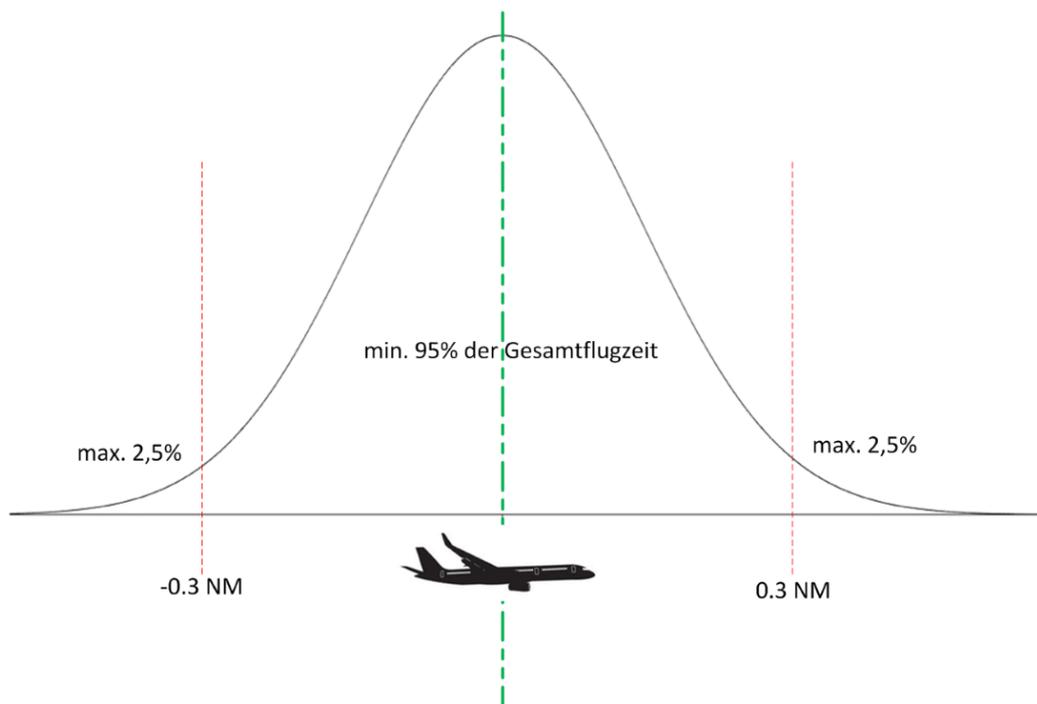
### 4.5. Modell der Trajektorienabweichung

Die gemessenen Abweichungen aus den in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Schritten müssen statistisch analysiert werden, um quantitative Aussagen treffen zu können. Des Weiteren soll durch die gespeicherten Statistiken klar definiert werden, in welchem Maß die Flugroute unter bestimmten Umweltbedingungen von der prognostizierten Trajektorie abweicht. Der Fokus bei der Abweichungsbestimmung und -simulation wird auf den *cross-track* Fehler (siehe Formel 4.18) gelegt. Es muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass das entwickelte Modell zur Simulation der Abweichung die Realität lediglich abstrahiert. Durch Vereinfachungen und Annahmen stellen die Prognosen die Realität nur mit Einschränkungen dar.

#### 4.5.1. Modellierung der zeitlichen Planungsgenauigkeit

In Untersuchungen der *Airservices Australia* [7] wurde die Genauigkeit der zeitlichen Vorhersage einer Flugbahn bestimmt. Für die Bestimmung der Abweichungen wurden

Standardflugrouten vom Autopilot ohne menschlichen Eingriff abgeflogen und Messungen der Flugzeugdaten<sup>2</sup> ausgewertet. Dabei konnte für die zeitliche Unsicherheit, aber auch für die räumliche Unsicherheit, eine statistische Gaußverteilung identifiziert werden (siehe Abbildung 4.15). Eine detaillierte Beschreibung des Data Links zwischen Luftfahrzeug und Bodenstation unter Verwendung von ADD wird in dieser Arbeit aufgrund des Umfangs nicht geliefert. Weiterführende Informationen zum Verfahren sind allerdings in der Untersuchung von Eurocontrol [18] beschrieben. Die Onboard-Systeme können die Flugtrajektorie für die zeitnahe Zukunft genauer vorhersagen als für zeitlich entferntere Punkte. [7] Daraus kann schlussgefolgert werden, dass die Ungenauigkeit der Position zu einem Zeitpunkt des Fluges kleiner wird, je näher das Flugzeug an diesem Zeitpunkt ist. Aus diesem Grund ist die Darstellung der Trajektorienungenauigkeit zeitsensitiv und bietet eine zeitabhängige Information an.



**Abbildung 4.15.:** Modellierung der Navigationsfehler nach Gaußscher Normalverteilung

Die Ergebnisse aus [7] für die Abweichung der zeitlichen Vorhersage werden für diese Arbeit als Grundlage angenommen. Hierbei wird betrachtet, wie groß die Abweichung der tatsächlichen Ankunftszeit von der vorausgesagten Ankunftszeit an einem bestimmten Wegpunkt (z.B. Top of Descent, TOD) ist. So ist in [7] die zeitliche Ungenauigkeit für das Flugzeugmodell Airbus 340–500 für den TOD untersucht, dabei beträgt die zeitliche Planungsungenauigkeit zum Zeitpunkt 120 Minuten vor dem TOD, zwischen  $-150$  und  $+150$  Sekunden. Zum Zeitpunkt 20 Minuten vor Erreichen des TOD kann von einer Genauigkeit von  $-50$  bis  $+50$  Sekunden ausgegangen werden. Pro Flugminute kann, in Form einer Gaußsche Verteilung, eine Sekunde Abweichung auftreten.

<sup>2</sup>engl. Aircraft Derived Data, ADD

## 4.5.2. Modellierung der räumlichen Planungsgenauigkeit

Die räumliche Abweichungen sollen durch eine Gaußsche Verteilung modelliert werden. Die Standardabweichung der Fehler wird durch Simulation nach [12] generiert. Nach [51] (siehe Abbildung 4.16 und 4.15) wird ein *along-track* Fehler von - 0,3 NM bis + 0,3 NM simuliert. Für den *cross-track* Fehler wird eine Abweichung vom - 0,15 NM bis + 0,15 NM angenommen.

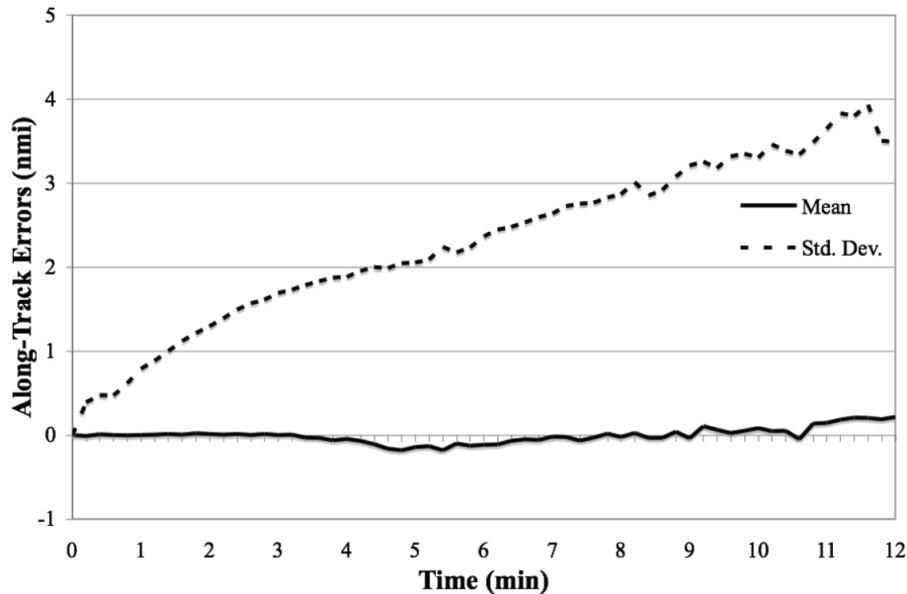
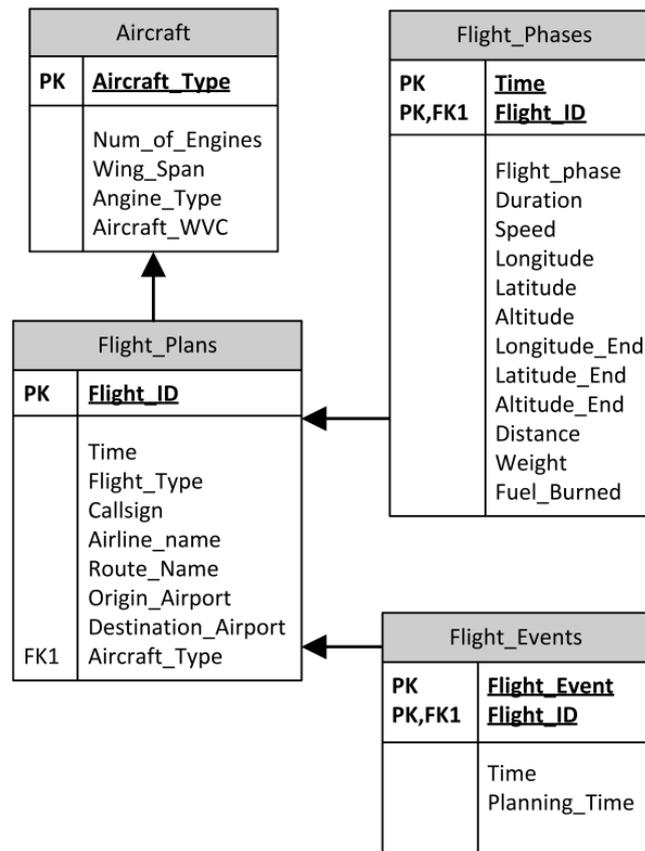


Abbildung 4.16.: Longitudinaler Fehler, nach [51]

## 4.6. Datenmodell

Die Visualisierung von Daten setzt Wissen über dessen Struktur voraus. Die Struktur der Daten wird in den weiteren Ausführungen anhand der Datenbanktabellen beschrieben. Nach dem Einlesen und Vorverarbeiten der Simulationsergebnisse kann die Datenbank mit den Werten geschrieben werden. Aus der *EWMS*-Datenbank sind fünf Tabellen relevant (siehe Abbildung 4.17). In der **Aircraft Tabelle** sind die einzelnen Flugzeugtypen definiert. Dazu gehören die eindeutigen Bezeichnungen nach ICAO Codes, Triebwerkstyp, Anzahl Triebwerke und die Maße des Luftfahrzeugs. Die Informationen zum Flugplan, wie z.B. Flugzeugtyp, Startzeit, Start- und Zielflugplatz, werden in **Flight\_Plans** gespeichert. Einem Eintrag in **Flight\_Plans** können mehrere Flugphasen (**Flight\_Phases**) zugeordnet werden. Darin werden wichtige Werte zu einem Streckenabschnitt gespeichert. Eine Phase muss immer aus zwei Positionen bestehen.



**Abbildung 4.17.:** Relevante Tabellen aus der EWMS-Datenbank

## 4.7. Betrachtungsgrenzen

Auf die Durchführung eines Flugs haben komplexe Prozesse und viele Richtlinien entscheidenden Einfluss. So ist die Abflugzeit eine wichtige Komponente für zeitliche Unsicherheiten [33]. Auch hier wirken sich viele Komponenten und komplexe Entscheidungsalgorithmen auf die Abflugzeit aus, die der Pilot kaum beeinflussen kann. Das Beispiel zeigt, dass es in dieser Untersuchung nicht möglich ist, alle entscheidenden Vorgänge einfließen zu lassen. Demzufolge werden zur Erstellung der Modelle folgende konstante Annahmen getroffen:

- Messstörungen treten nicht auf.
- Alle Flugzeuge sind mit aktuellen Systemen ausgestattet.
- Windabweichung zwischen 0 bis 40 kn.

Folgende Parameter, beschrieben in Kapitel 2.5, werden in der Simulation variiert:

- Bei einer Fluganweisung des Lotsen an das Flugzeug (Änderung der Bahnkurve)

ist die Verzögerung vom Zeitpunkt der Anweisung bis zur Ausführung des Piloten unsicher.

- Flugzeugeigenschaften: Gewicht, Geschwindigkeit, Schub, Klappenstellungen. Die Flugzeugeigenschaften sind nicht genau definiert, sondern sind eine Schätzung und liegen in BADA [25] vor.
- Meteorologische Bedingungen: Windvektor-Fehler, Temperatur.
- Beschränkungen und Vorgaben (in dem Constraints-File): Fehler der Geschwindigkeitsvorgabe, Fehler der Positionsvorgabe.

Weiterhin wird das Modell vereinfacht, indem Häufigkeiten und Wahrscheinlichkeiten für Unsicherheiten nicht betrachtet werden, da es für einen möglichen Konflikt keine Bedeutung hat, ob sich ein Flugzeug zu 1 % an einer Position befindet oder mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 %.

## 4.8. Simulationsszenario zur Modulentwicklung

Die Funktionalität der Anwendung wird mit Hilfe von Messungen von Simulationsergebnissen entwickelt und validiert. Der Prozess der Szenariengenerierung und Simulation wird beschrieben, um ein besseres Verständnis über die Vorbedingungen und Durchführung einer Luftverkehrssimulation, sowie über die Flugdaten zu vermitteln.

In der Masterarbeit wird die innerdeutsche Strecke zwischen Hamburg und München betrachtet und durch den *TrafficSim* simuliert. Die Route erfüllt alle in Abschnitt 2.4 definierten Anforderungen. Das Szenario wird, wie in 2.4 beschrieben, durch ein Flugplan definiert. Darin sind die einzelnen Flüge mit Rufzeichen, Flugzeugtyp, Startflughafen, Zielflughafen und Startzeit festgelegt (siehe Tabelle 2.1). Ausgehend von diesen Informationen werden für jeden Flug die Wegpunkte für eine grobe Route angegeben. Die Wegpunkte mit den jeweiligen Koordinaten werden für die Simulation als sog. Constraints angegeben (siehe Anhang A.2.2). Die Deutsche Flugsicherung gibt die Standardrouten für den innerdeutschen Verkehr monatlich im Luftfahrthandbuch, den sog. AIP, bekannt. Darin sind Standardrouten von Start- zum Zielflughafen definiert. Der Lotse leitet die Flugzeuge im operationellen Betrieb nach den Vorgaben der Wegpunkte und Streckensegmente. Ein Beispiel für den Luftraum des Flughafennahbereichs in Hamburg wird in den Abbildungen 4.18 und 4.19 dargestellt.

Aufgrund von Interpolationen zu nachfolgenden Wegpunkten werden die Koordinaten nicht exakt überflogen. Der erste Wegpunkt ist der Austrittspunkt aus der Standard Instrument Departure Route (SID), Wegpunkt AMLUH siehe Abbildung 4.19. Für die Route bis zum Wegpunkt AMLUH werden von der DFS GPS-Punkte angegeben. Der letzte Wegpunkt auf der Route ist der Eintrittspunkt für die Standard Arrival Route (STAR). Die STAR im Simulationsbeispiel ist in Abbildung 4.22 dargestellt. Die genauen Abflug- und



Trajektoriengenerator der Simulationssoftware berechnet.

Vom Flughafen Hamburg (ICAO-Code: EDDH) nach München (EDDM) ist folgende Route vorgegeben:

1. AMLUH (53.42888900N 10.32250000E)
2. POVEL (52.12833333N 10.82833333E)
3. GALMA (51.39833333N 11.45166667E)
4. LULAR (49.36666667N 12.75833333E)
5. LANDU (48.59666667N 12.27333333E)

Die Simulationssoftware benötigt neben den Flugplan- und Flugstreckeninformationen auch Werte zu den Flugzeugeigenschaften sowie Wind und Temperatur. Zur Validierung der Strecke und der Parameter wird dem Benutzer von *TrafficSim* der Flug wie in Abbildung 4.21 angezeigt. Für den Referenzflug wird ein durchschnittlicher Wettertag (29. August 2012) in Deutschland verwendet. Das Meteo-Grid-File, eine Datei mit den nötigen Wetterinformationen für die Simulation, wurde von der Homepage des Deutschen Wetterdiensts geladen. In der Wetterdatei wird für ein Segment der Fläche  $1^{\circ}lat \times 1^{\circ}lon$  und einer Höhe von 500 ft die Temperatur, Windstärke und Windrichtung definiert. In Abbildung 4.20 ist beispielhaft ein Segment dargestellt. Die Koordinaten  $50^{\circ}N$  und  $8^{\circ}E$  geben den süd-westlichen Punkt des Segments an, welches in etwa dem Bereich des Frankfurter Flughafens abdeckt. In der vierten Zeile sind die meteorologischen Informationen in der entsprechenden Höhenebene angegeben. Die Temperatur ist in Kelvin [K] angegeben, die Windstärke in Knoten [kn] und die Richtung in der Gradzahl [°] auf der Kompassrose.

ID	LATITUDE	LONGITUDE		
W0082,	50.00,	8.00		
HÖHE [FT]	TEMP [K]	WIND [kn]	RICHTUNG [°]	
45000.00	199.01	30.00	240.00	
40000.00	208.91	30.00	240.00	
35000.00	218.82	30.00	240.00	
30000.00	228.72	30.00	240.00	
25000.00	238.63	30.00	240.00	
20000.00	248.54	30.00	240.00	
15000.00	258.44	30.00	240.00	
10000.00	268.35	30.00	240.00	
5000.00	278.25	28.00	240.00	
2500.00	283.21	25.00	240.00	
1000.00	286.18	15.00	240.00	
500.00	287.17	12.00	235.00	
0.00	288.16	10.00	230.00	

**Abbildung 4.20.:** Meteorologische Angaben in einem Luftraumsegment

Die Flugzeugeigenschaften liest der *TrafficSim* aus einem Performance Parameter File (*PERF\_PARMS*) oder aus BADA [25]. Durch die Software wird erst geprüft, ob ein Perfor-

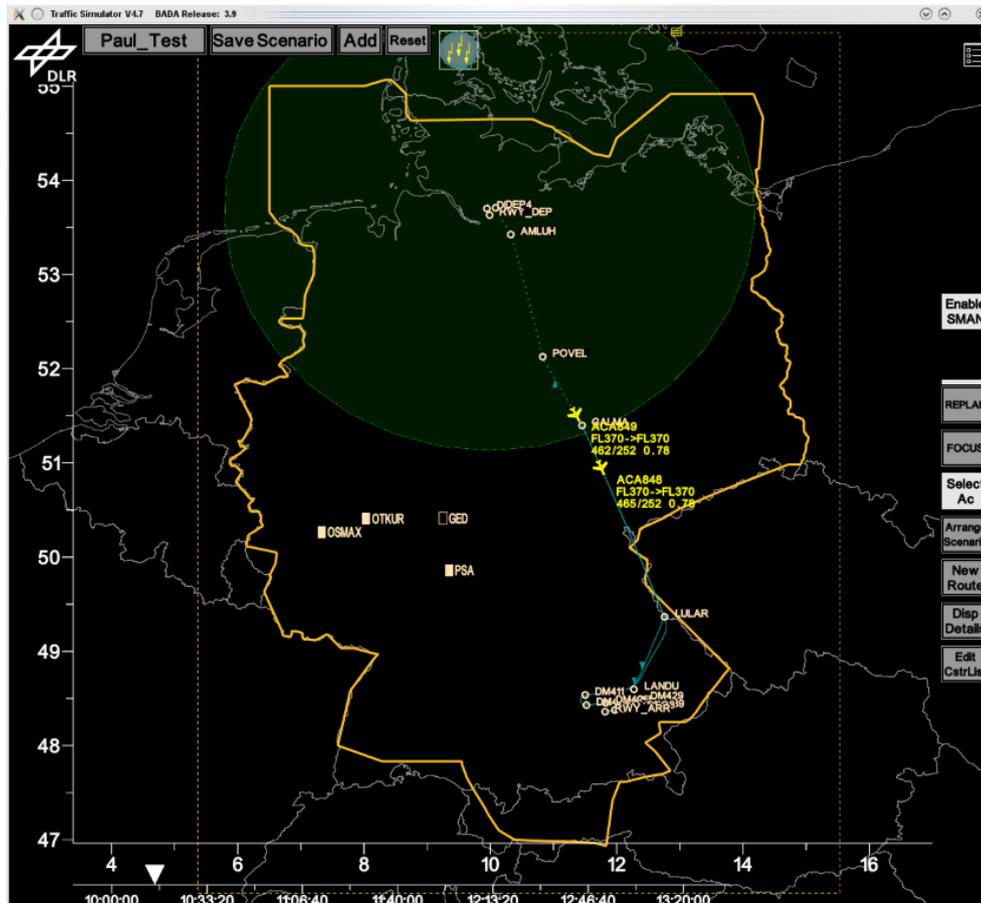


Abbildung 4.21.: Simulation von EDDH nach EDDM im *TrafficSim*

mance File, wie im Anhang A.2.1 abgebildet, für das gewünschte Flugzeug existiert. Falls die Datei für den Flugzeugtyp nicht vorhanden ist, wird BADA verwendet. Die `PERF_PARMS` Datei hat den Vorteil, dass die Parameter individuell konfiguriert werden können. Für die Versuche sind die Werte für Flugzeuggewicht und Fluggeschwindigkeiten entscheidend. Das Startgewicht des Flugzeugs wird vom *TrafficSim* aus dem Leergewicht plus 80% des maximalen Ladegewichts plus der für die Flugstrecke benötigten Treibstoffmasse berechnet (siehe Formel 4.35). Für die Versuche werden die Geschwindigkeitswerte im Reiseflug untersucht. Oberhalb der Flugfläche FL 270 (entspricht nach Standardzuweisung etwa 8300 m) wird die Fluggeschwindigkeit in Mach angegeben. Die Mach-Zahl ist das Verhältnis der TAS zur Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der vorherrschenden Lufttemperatur. [52]

$$M_{start} = m_{leer} + \frac{4}{5} \cdot m_{landung} + m_{kerosin} \quad (4.35)$$

Für die Experimente zur Analyse von Unsicherheiten in der Trajektorienplanung werden Ungenauigkeiten in der Messung und Prognose künstlich erzeugt. Die oben beschriebenen Parameter können in den Input Dateien des Simulator variiert werden. Folgende Prognoseabweichungen wurden generiert:

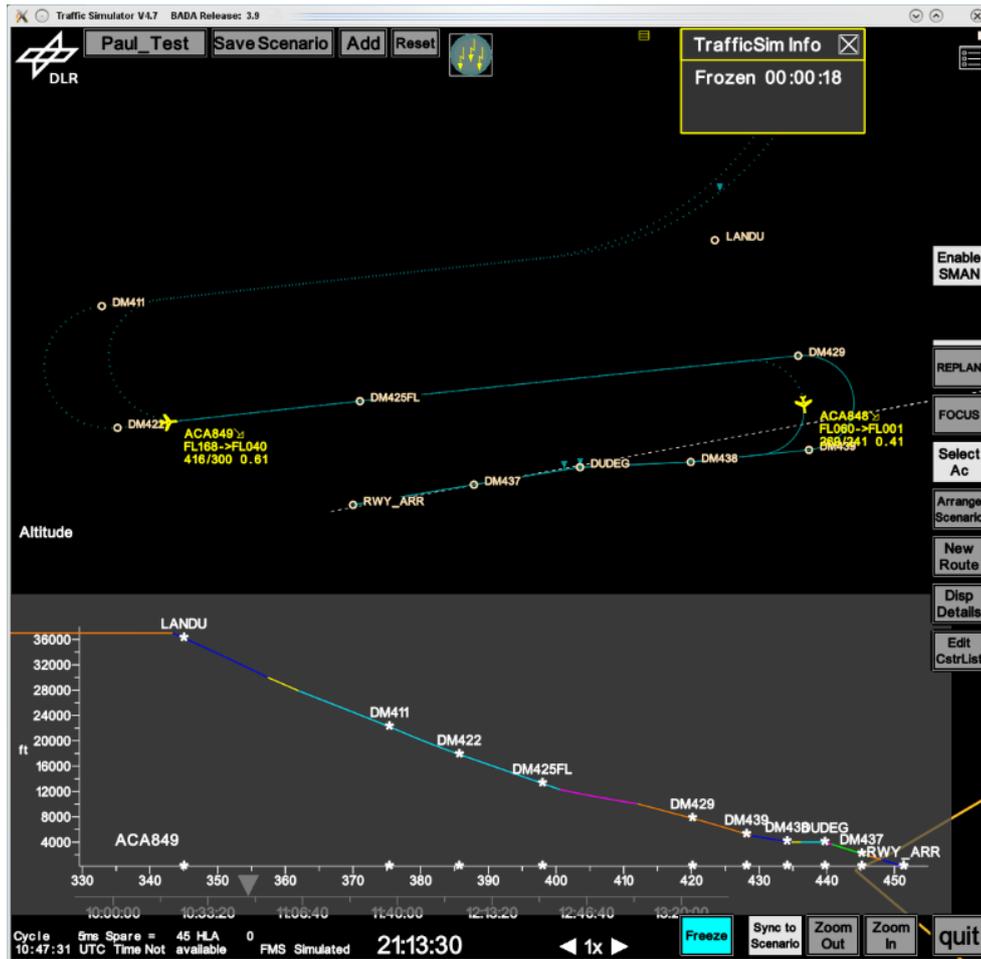


Abbildung 4.22.: Anflug auf den Flughafen München im *TrafficSim*

Windrichtung in [°]							
0	+ 45	+ 90	+ 135	+ 180	+ 225	+ 270	+ 315

Windstärke am Boden in [kn]				
0	+ 10	+ 20	+ 30	+ 50

Temperatur am Boden in [°C]				
- 5	+ 5	+ 15	+ 25	+ 35

Masse des Flugzeugs in [kg]					
97%	90%	80%	70%	60%	50%
65857	61312	54500	47687	40875	34062

Fluggeschwindigkeit im Reiseflug in [Mach]		
0,72	0,78	0,82

Tabelle 4.2.: Variation der Eingabeparameter

Mit Hilfe der Parametervariationen können zahlreiche Flugtrajektorien von Hamburg nach München simuliert werden. Dieser Trajektorienschwarm kann, nach der Umsetzung der beschriebenen Funktionen in das Software-System, detailliert untersucht werden. Entscheidende Parameter sind der vertikale Fehler, der horizontale Fehler, der longitudinale Fehler, der diagonale Fehler und der zeitliche Fehler. Zusätzlich wurde in den Betrachtungsgrenzen erfasst, welche Verfahren in der Generierung von Unsicherheiten als korrekt angenommen werden.

## 5. Implementierung

Die Beschreibung der Implementierungsaufgaben im vorliegenden Projekt wird gegliedert in Eingabe von Daten, Verarbeitung der Rohdaten bzw. Berechnung der Fehler und der visuellen Ergebnisausgabe. Die Struktur der Implementierung passt sich dem allgemeinen *EWMS*-Prozesskonzept von Auswertungen an (siehe Abbildung 4.1). Durch diese Gliederung sollen in den folgenden Ausführungen interessante Arbeitsschritte des Entwicklungsprozess dokumentiert werden. Die im Entwurf beschriebenen Prozesse zur Bewertung und Darstellung von Unsicherheiten in der Trajektorienplanung werden in einer Java Applikation, als Module, umgesetzt. Im DLR Institut für Flugführung werden Auswertungskonzepte bzw. -module in dem Softwaresystem „Extensible Workflow Management for Simulations“ (*EWMS*) [42] zusammengefasst. Das *EWMS* wird zur Unterstützung der Simulationsanalyse eingesetzt und weiterentwickelt. In Abbildung 1.4 ist die Auswertungsumgebung im Einsatz zu sehen. Die Darstellung von Trajektorien soll die Auswertungsumgebung modular erweitern. Dafür sind von eine definierte Architektur, Schnittstellen und Datenstrukturen für Datenhandling und Datendarstellung vorgegeben. Der Auswertungsablauf kann in mehrere Hauptaufgaben unterteilt werden:

1. Eingabe: Parsen<sup>1</sup> der relevanten Trajektoriendaten, sowie Prüfen und Laden der Daten in die relationale Datenbank.
2. Verarbeitung/Datenanalyse: Berechnung und Simulation der Abweichungen gemäß dem zuvor beschriebenen Konzept.
3. Ausgabe: Darstellung und Analyse der Ergebnisse.

Für die Datenverarbeitung ist die relationale Datenbank die wichtigste Komponente. Durch einen bereits implementierten Filter können bei der Auswertung speziell definierte Daten vom User zur Berechnung ausgewählt werden. Das genaue Schema der Datenbank und die Datentypen wurden in Abschnitt 4.6 beschrieben.

### 5.1. Software-Architektur

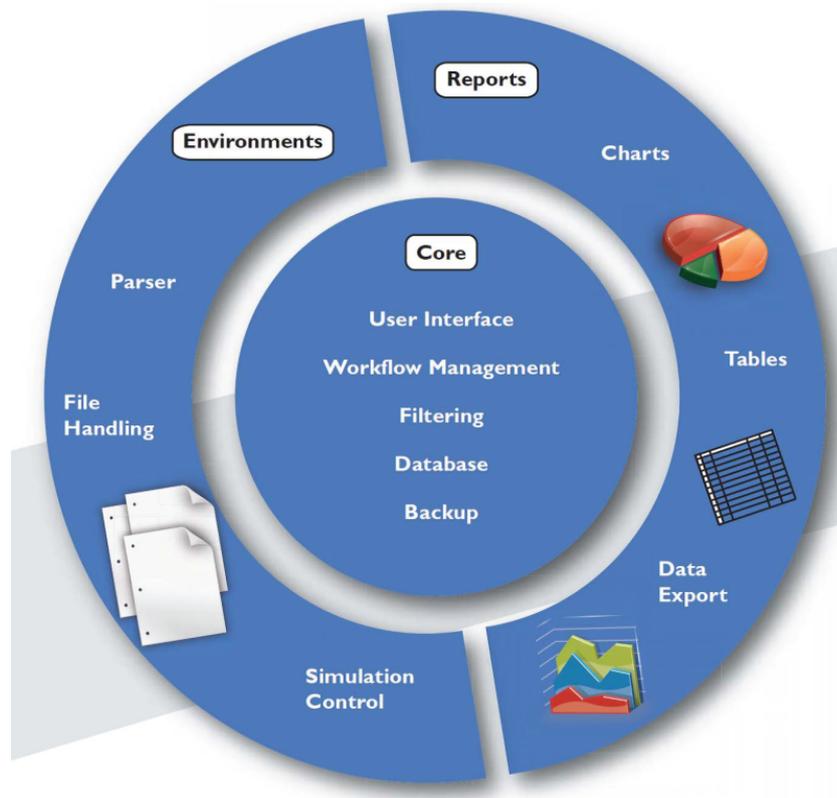
#### **Extensible Workflow Management for Simulations (*EWMS*)**

Die Bewertung von Simulationsszenarien erfolgt auf Basis der aufgezeichneten Simulationsdaten mit Hilfe der Auswertungssuite *EWMS*. Daten können unabhängig von der verwendeten Simulationsumgebung mit einheitlichen Verfahren durch *EWMS* bewertet

---

<sup>1</sup>Analyse und Übersetzen des Datenformats der Aufzeichnungsdatei in ein standardisiertes Format zur Weiterverarbeitung

werden. Die flexible Software-Architektur ermöglicht eine unkomplizierte Anbindung von Simulationssystemen an die Auswertung. Die modulare Struktur der Software besteht aus drei Bereichen. Der *EWMS*-Kern wird durch verschiedene Simulationsumgebungen und die Auswertungen zum Gesamtsystem ergänzt (siehe Abbildung 5.1). Durch den Kern werden die Benutzeroberfläche, die Datenbank und Anwendungslogiken gesteuert. Der *EWMS*-Kern ist zusätzlich für die Verknüpfung der Simulationsumgebung und den Auswertungen verantwortlich.



**Abbildung 5.1.:** Modulares Konzept von *EWMS*, nach [42]

Bei den Simulationsumgebungen ist zu beachten, dass jeder Simulator spezifische Funktionalitäten und Datenformate aufweist. Mit der Environment-Funktion werden die unterschiedlichen Simulationsergebnisse auf die allgemeinen *EWMS*-Datenmodelle abgebildet. Dafür werden die Simulationsdaten durch Parser eingelesen und in die *EWMS*-Datenbank gespeichert. Echtzeitsimulatoren wie der *Tower*- oder *Approach-Simulator* sowie Schnellzeitsimulatoren wie *Simmod* oder *AirTOP* können bereits von *EWMS* verarbeitet werden. Als Erweiterung wird im Rahmen dieser Arbeit die Anbindung des verwendeten *TrafficSims* an die Auswertung implementiert.

Das dritte *EWMS*-Modul setzt die Hauptfunktionen für die Auswertungen um. Die Algorithmen verwenden ausschließlich die generischen Daten in der Datenbank und sind vollständig von der Simulationsumgebung entkoppelt. Eine Auswertung wird erst dann aktiv, wenn die notwendigen Analyseparameter aus den Rohdaten eingelesen werden können. Diese dynamische Report-Konfiguration ermöglicht es, einen neuen Report wie in dieser Masterarbeit zu entwickeln und in das System zu integrieren.

## 5.2. Anbindung des TrafficSim an EWMS

Beim ersten wichtigen Programmschritt werden die Output-Daten der Simulation gelesen und zum Laden in die Datenbank konvertiert. Um die Daten einer Simulationssoftware einlesen zu können, benötigt *EWMS* einen Parser. Der Parser übersetzt das Datenformat der Aufzeichnungsdatei und schreibt die Daten in die standardisierte *EWMS*-Datenbank. Die Funktionsweise des *TrafficSim*-Parsers wird nachfolgend aufgezeigt. Die implementierten Algorithmen und die benötigten Eingabedaten werden in Tabellenform und Diagrammen dargestellt. Anhand der Beschreibung kann der Datenfluss und damit die Funktionsweise nachvollzogen werden. Wie in Kapitel 4.6 bereits beschrieben, bestehen die Flugverkehrsdaten des Simulators aus allgemeinen Fluginformationen (Flugplan, Callsign, Flugzeugtyp usw.) und Statusinformationen während des Flugs (Zeit, Position, aktuelles Gewicht, Lagewinkel).

Der *TrafficSim*-Parser arbeitet auf Basis einer Eingabedatei (Logdatei der Simulation im ASCII Format). Die Fluginformationen sind vom Simulator berechnet und weisen keine Messfehler auf. Aus diesem Grund kann auf Plausibilitätstests verzichtet werden, allerdings muss die Vollständigkeit der Datei überprüft werden. *EWMS* erkennt nach der Dateiauswahl automatisch, welche Art von Eingabedatei eingelesen werden soll. Hierfür muss die Eingabedatei feste Kriterien erfüllen und bei *TrafficSim* der Dateiname mit der Endung „.TRAFFSIM“ abschließen. Die **TRAFFSIM**-Datei wird während der Simulation vom *TrafficSim* geschrieben und enthält alle relevanten Inhalte über Flugplan, Constraints und Flugwege. In Tabelle 5.1 sind die Inhalte der Datei beschrieben. Für den Zweck der Trajektorienuntersuchung sind die erforderlichen Werte in der vierten Spalte gekennzeichnet. Informationen wie Callsign, Startflughafen, Zielflughafen, Flugzeugtyp und Startzeit sind Flugplanspezifisch. Die Daten ermöglichen die Zuordnung der Flugwege zu einem Luftfahrzeug. Unterhalb der allgemeinen Fluginformationen sind in der **TRAFFSIM**-Datei alle Flugwegpunkte aufgezeichnet. Zu jedem Flugpunkt sind für diese Arbeit die geographische Position, Zeit, Gewicht und geflogene Strecke notwendig. Die Aufzeichnungsrate ist variabel (in der Regel zwischen einer und zehn Sekunden) und richtet sich nach der Frequenz von signifikanten Änderungen im Flugprofil.

Ist die Datei ausgewählt, so liest der *TrafficSim*-Parser diese zeilenweise ein, lädt die Flugplantabelle mit den Fluginformationen in die Datenbank und setzt die Flugweginformationen in Bezug zu den geladenen Flugplänen. Die Struktur des *TrafficSim*-Parsers und seine Funktionen lassen sich anschaulich auf Quellcode-Ebene beschreiben (siehe Abbildung 5.2). Die zentrale Klasse für die *TrafficSim* Umgebung ist der sog. *Environment-Connector*. Der Connector ist die Schnittstelle zum *EWMS*-Kern und registriert die Simulatorumgebung im *EWMS*-System. Soll ein Projekt erkannt oder geladen werden, so ruft der *EWMS*-Kern den passenden Connector auf.

Für die Identifizierung der **TRAFFSIM**-Datei besitzt der Parser den sog. *TrafficSim-Detektor*. Der Detektor prüft, ob die angegebene Datei eine korrekte Log-Datei ist. Ist die Prüfung erfolgreich abgeschlossen, erscheint für den *EWMS*-Benutzer der Menüpunkt „Als TraffSim-Projekt laden“. Wählt der Benutzer diese Funktion aus, so wird die zweite Haupt-

Traffic Simulator Log-Datei			
Voraussetzung	Endung: .TRAFFSIM		
Eingelesene Elemente	<b>Element (TrafficSim)</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Erforderlich</b>
	Callsign::Text()	Eindeutige Rufnummer des Flugs	x
	Startflughafen::Text() Geo-Position::Double() Startflughafen	ICAO Code Lat, Lon, Alt (Dezimalgrad, ft)	x
	Zielflughafen::Text() Geo-Position::Double() Startflughafen	ICAO Code Lat, Lon, Alt (Dezimalgrad, ft)	x
	Flugzeugtyp::Text()	ICAO Code	x
	Startzeit::Time()	Startzeit	
	Positionsnummer::Int()	Nummer der Position	
	Zeit::Time()	Zeit der Position	x
	Geo-Position::Double()	Koordinaten (Lat, Long, Alt)	x
	Distanz::Double()	Geflogene Strecke [NM]	
	Gewicht::Double()	Aktuelles Fluggewicht [kg]	x

**Tabelle 5.1.:** Parameter der *TrafficSim* Ergebnisse

funktionalität aktiviert. Der *TrafficSim*-Parser bekommt den Dateipfad der Simulation übergeben und beginnt mit dem Einlesen der einzelnen Zeilen. In den Folgeschritten werden die Werte in die *EWMS*-interne Datenbank geschrieben. Der Ablauf ist im Flussdiagramm in Abbildung 5.3 dargestellt. Im ersten Schritt wird die Datei mit Hilfe von regulären Ausdrücken nach Flugplaninformationen durchsucht. Im zweiten Schritt wird jedem Flug die Trajektorie zugeordnet, diese Informationen beschreiben den Zustand eines Flugs. Beim Laden der Datei werden die Daten in der Datenstruktur *FlightPhaseData()* zwischengespeichert, bevor sie in die Datenbank geschrieben werden. Die Datenstruktur ist so aufgebaut, dass der Streckenabschnitt zwischen zwei Flugspurpunkten abgespeichert wird.

Neben dem Laden des Projekts besitzt der Parser noch einige kleinere Aufgaben wie die Generierung eines Konfigurationsmenüs und des Projektnamens. Auf diese Funktionalitäten wird in den Abschnitten allerdings nicht weiter eingegangen. Im Projektrahmen von *EWMS* sieht das Qualitätssystem eine Prüfung des Parsers auf Korrektheit vor. Es soll geprüft werden, ob der Datenimport in die Datenbank vollständig und ohne Fehler durchgeführt wird. Zum Testen wird bei *EWMS* der Black-Box-Test verwendet. Das bedeutet, zur Verifikation werden die Daten aus der Datenbank in eine Excel Tabelle geladen und mit den Rohdaten verglichen. Der implementierte Parser wurde mit Simulationsdaten, die über 1200 Flugbewegungen enthalten, getestet und fehlerfrei eingesetzt.

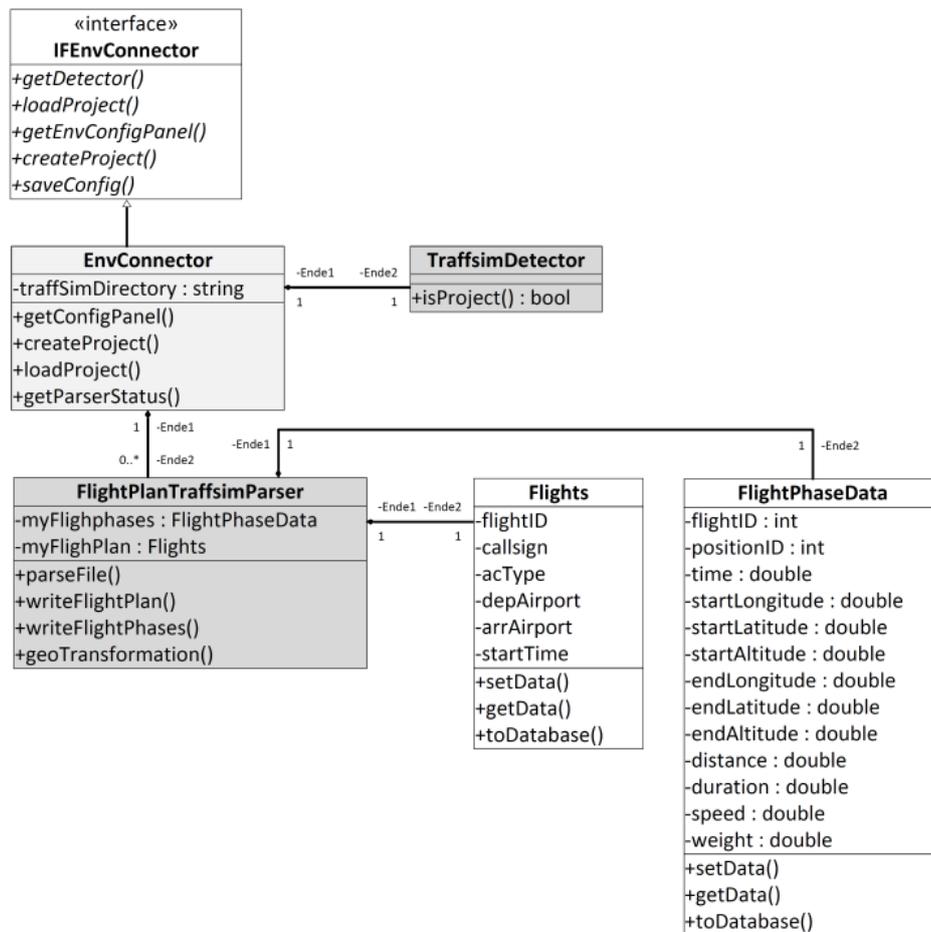
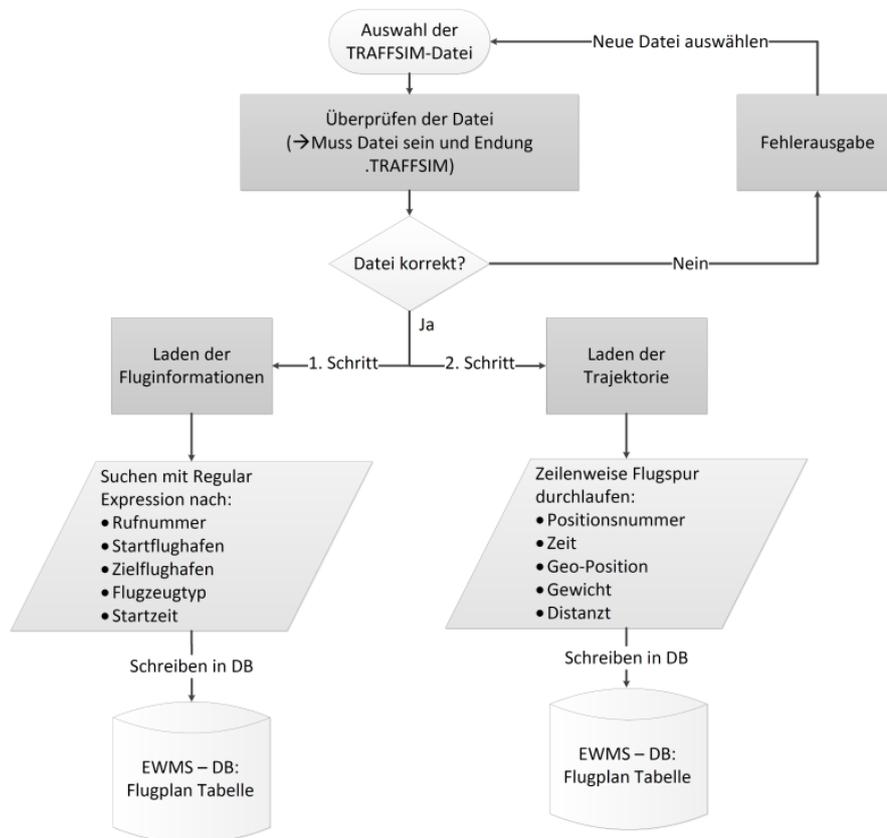


Abbildung 5.2.: Vereinfachtes Klassendiagramm des TrafficSim-Parsers

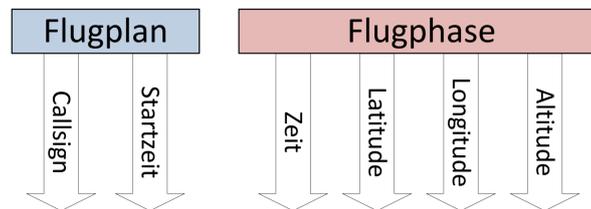
### 5.3. Datenverwaltung

Für die Verwaltung der Daten wird in den Entwicklungen dieser Masterarbeit die programminterne Datenbank von *EWMS* [42] verwendet und ggf. an spezielle Anforderungen angepasst. Das *EWMS* verwendet die relationale Datenbank *HSQldb* mit einem eigens entwickelten Datenbankmanagementsystem. Um die Performance bei Transaktionen zu gewährleisten, werden die Daten vollständig im Arbeitsspeicher gehalten. Nach dem Starten des *TrajectoryUncertaintyReport* wird die Klasse *TrajectoryContainer* aufgerufen. In Interaktionen mit der *Cache*-Klasse und einem *StatementBuilder* werden die SQL-Statements erzeugt. Die benötigten Informationen (siehe Abbildung 5.4) werden in interne Datenstrukturen und *TreeMaps* gespeichert. Eine detaillierte Analyse der Statements wird an dieser Stelle nicht ausgeführt.

Zur Ergebnisverarbeitung sind die berechneten Werte nach dem System von Brodlié et al. [53] in abhängige oder unabhängige Variablen gruppiert. In der Auswertung wird der Zusammenhang zwischen unabhängigen (exogenen) Variablen und abhängigen Variablen



**Abbildung 5.3.:** Algorithmus der Simulationsdatenverarbeitung



**Abbildung 5.4.:** Benötigte Daten

untersucht. Die Werte der abhängigen Variablen (Position und Fehler) sind abhängig von den Werten der variablen Flugnummer und Zeit (siehe Tabelle 5.2). Das bedeutet, man versucht die unabhängige Variable zu ändern, um eine Reaktion bei der abhängigen Variable beobachten zu können.

## 5.4. Analyse von Trajektorienabweichungen

In Abbildung 5.5 sind die Paketstruktur und die Klassen des *EWMS*-Auswertungmoduls zur Trajektorienanalyse aufgezeigt. Das abstrahierte Paket-Diagramm betrachtet keine Erweiterungsmodule oder Komponenten von *EWMS*. Um die Erweiterung modular und

Unabhängige Variablen		Abhängige Variablen		
Flugnummer	Zeit	Position [lat,lon,alt]	minimaler Fehler [NM]	maximaler Fehler [NM]
LH2013	11:08:59	48.3668269 N 11.8954822 E 1190, 34 ft	-1,5 NM	0,3 NM
LH2013	11:09:18	48.3652935 N 11.8779739 E 961, 85	-1,2 NM	0,2 NM
LH2013	11:10:21	48.3602255 N 48.3601470 E 208, 57 ft	-0,4 NM	0,8 NM
...	...	...	...	...

**Tabelle 5.2.:** Abhängige und unabhängige Variablen

damit wartbar und austauschbar zu entwickeln, werden die Funktionalitäten in getrennten Komponenten realisiert. Im Software-Design wurde darauf geachtet, dass die Komponenten möglichst zusammenhängende Aufgaben umsetzen, sodass die Funktionalität des Systems durch einen Austausch geändert werden kann. Auswertungsmodule im *EWMS*-Projekt sind im Paket `de.dlr.ewms.report` implementiert (siehe Abbildung 5.5). Der Ablauf des Reports wird durch die Klasse `TrajectoryUncertaintyReport` gesteuert. Die Klasse erbt von `EWMSReport` und meldet somit den Report im *EWMS*-Core an. Fachkomponenten für die Trajektorienanalyse sind im Unterpaket `uncertainty` implementiert. In diesem Paket sind alle funktionalen Anforderungen zur Durchführung der Trajektorienanalyse implementiert, so z.B. die Berechnungen der Fehlervektoren. In `uncertainty.util` sind Geo-Funktionen, wie bspw. lineare Interpolation oder Abstandsberechnungen. Zusätzlich sind Benutzerinteraktionen in `Dialog` und die Datenverwaltung in `TrajectoryContainer` umgesetzt. Zur Performance Steigerung bei der Datenbankanfrage werden geladene Daten aus der Datenbank in einem `Cache` registriert und als `Object Array` gespeichert. Vor einer Abfrage an die Datenbank wird zuerst geprüft, ob die geforderten Daten schon im `Cache` zwischengespeichert sind. Allgemeine Hilfsklassen sind in `util` und `uncertainty.util` implementiert. Hilfsklassen sind z.B. Datentypen (`Pair`) oder `XLSExport` zum Speichern im Excel Format.

### Vergleich von Trajektorien:

Im Auswertungsprozess A (siehe Kapitel 4.2, Abbildung 4.4) der vorliegenden Masterarbeit müssen tatsächlich geflogene mit den prognostizierten Routen verglichen werden. Zur Berechnung der Metriken (siehe Kapitel 4.4) werden sequentiell die gespeicherten Trajektorienpunkte durchlaufen. Als Ergebnis dieses Schritts wird eine Bibliothek aufgebaut, die angibt, wie stark ein Flug unter bestimmten Umweltbedingungen von der Prognose abweicht.

Zur Veranschaulichung des internen Programmverhaltens ist in Abbildung 5.6 ein Sequenzdiagramm vom Auswertungsprozess mit der Berechnung des *cross-track* Fehlers dargestellt. Benutzer, Objekte und Klassen sind durch senkrechte Lebenslinien dargestellt. Nachdem der User die Trajektorienauswertung in *EWMS* startet, wird die Klasse

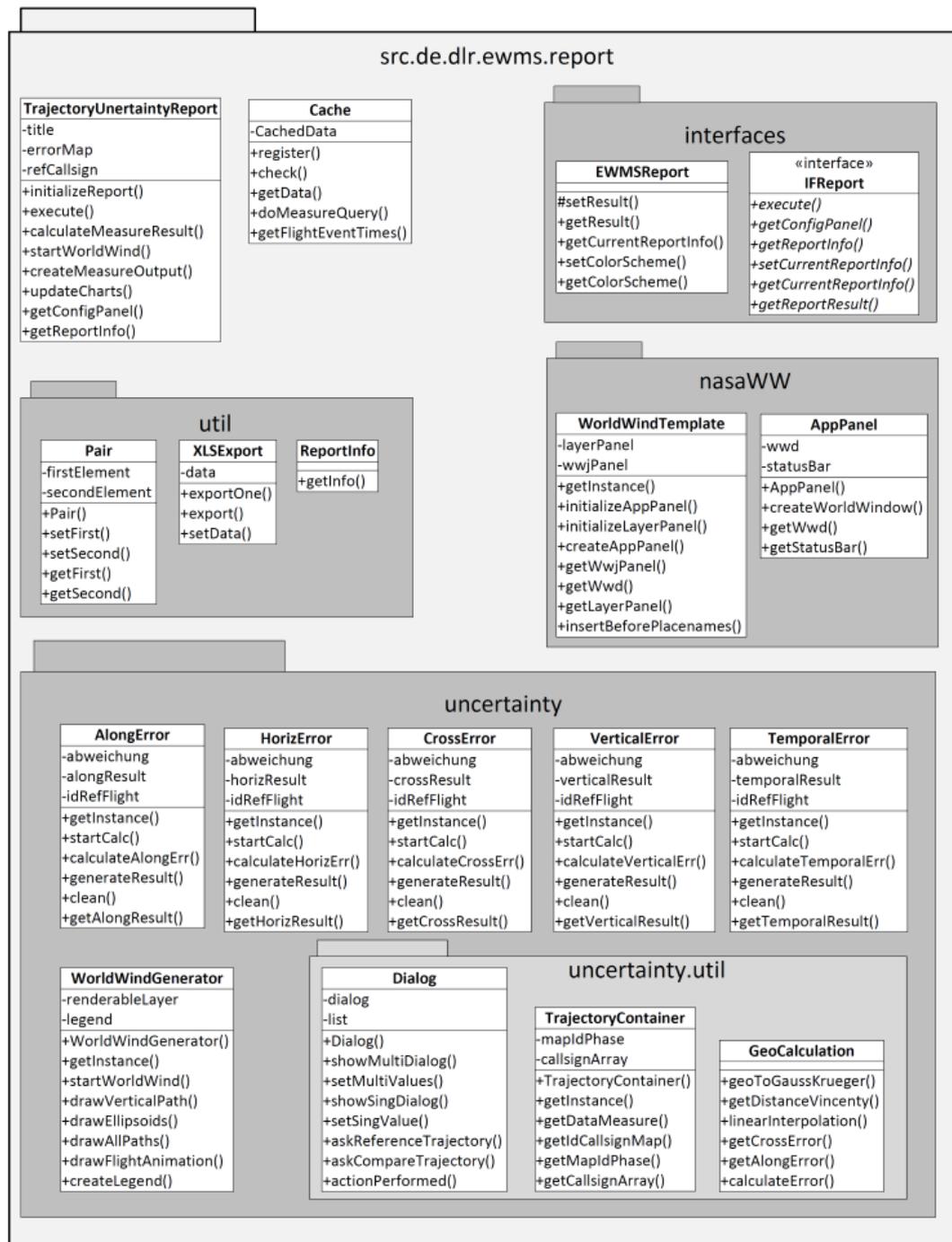
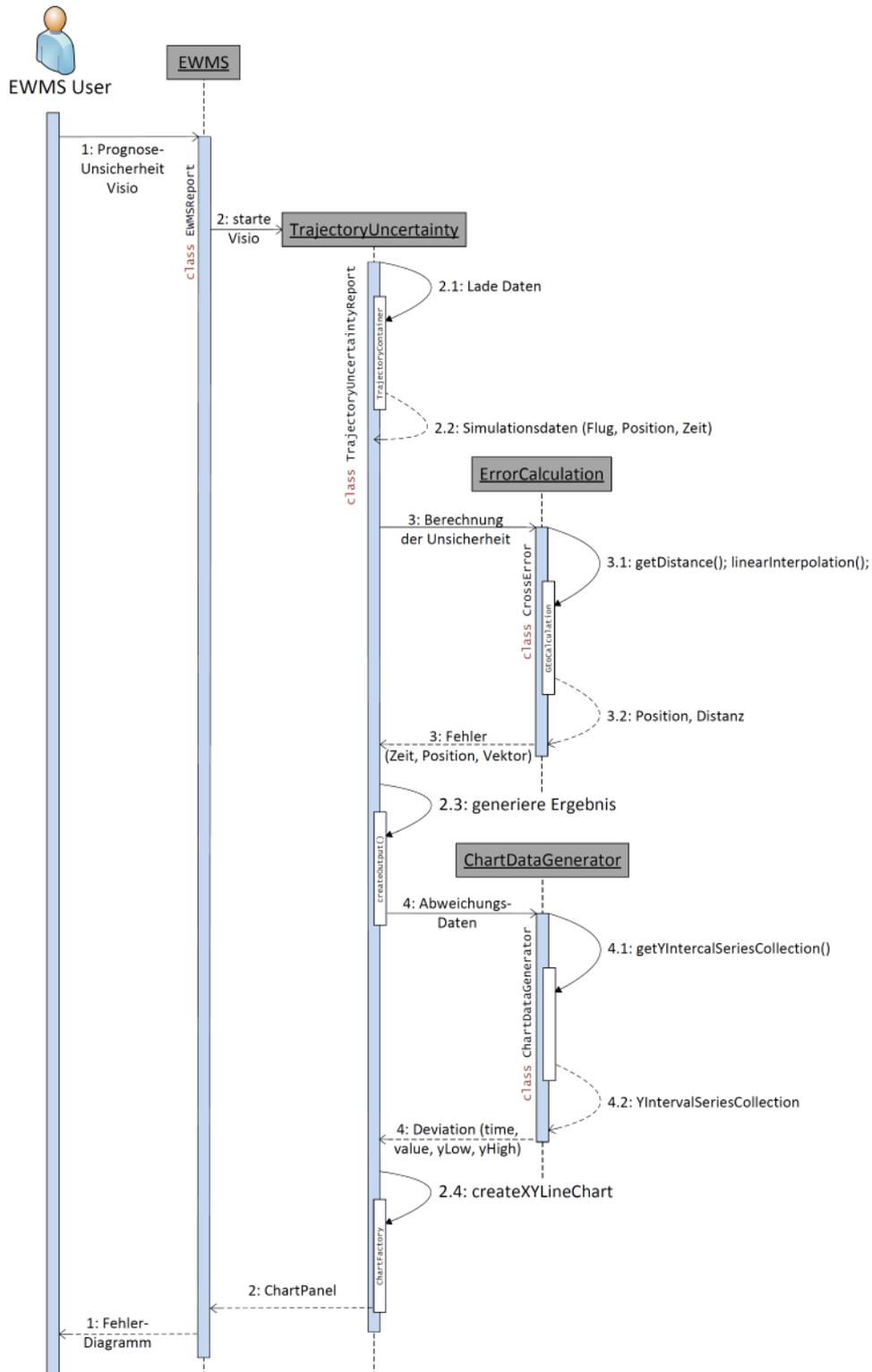


Abbildung 5.5.: Klassendiagramm der Trajektorienauswertung in EWMS

TrajectoryUncertaintyReport instanziiert und folglich die Berechnung und Visualisierung durchgeführt. Die Methoden sind an Hilfsklassen, in den rechten Lebenslinien, delegiert. So werden in Schritt 2.1 die Daten in TrajectoryContainer aus der Datenbank geladen. Die Funktionen zur Berechnung der Trajektorienfehler sind in der Klasse CrossError, HorizError usw. umgesetzt. In Aktion 3.1 werden Hilfsfunktionen in GeoCalculation aufgerufen, die Abstände berechnen oder Koordinaten transformieren. Nachdem die Ergebnisse berechnet sind, wird der ChartDataGenerator aufgerufen

und ein XYLineChart erstellt. Die Visualisierung wird an EWMS übergeben und über die Benutzerschnittstelle dem User dargestellt.



**Abbildung 5.6.:** Auswertungsprozess im Sequenzdiagramm

Wählt der Benutzer einen Identischen Flug als Referenz und Vergleich, so wird die Darstellung nach dem Auswertungsprozess B, siehe Abbildung 4.5, gestartet. Die Fehlervektoren werden wie in dem Konzept erläutert durch ein einfaches Modell simuliert und durch die gleichen Schritte wie im Prozess A an *EWMS* übergeben.

## 5.5. Visualisierung

Nachdem die Unsicherheiten der Trajektorienplanung berechnet bzw. simuliert sind, müssen die Abweichungen in geeigneter Form dargestellt werden. Als Erstes wird beschrieben, wie Diagramme mit *JFreeChart* erzeugt werden.

### 5.5.1. Diagrammdarstellung mit JFreeChart

Die zu plottenden Daten müssen in Form eines **Dataset**s bereit liegen. In dem Beispiel-Code 5.1 werden einzelne Punkte der Form  $(x, y)$  zu einem **Dataset** hinzugefügt und bilden eine **XYSeriesCollection**. Dabei können die jeweiligen Daten in Serien gruppiert werden (**YIntervalSeries**).

```
Algorithm createXYDataset(independentData x, dependentData y)
```

```
IF Series does not contain seriesLabel THEN
```

```
YIntervalSeries series = NEW YIntervalSeries(seriesLabel)
```

```
ADD series to YIntervalSeriesCollection
```

```
ADD time, value, yLow, yHigh to YIntervalSeriesCollection(series)
```

```
RETURN YIntervalSeriesCollection
```

**Listing 5.1:** Erzeugen von Dataset für Abweichungsdiagramm

Um aus dem **Dataset** eine Grafik zu erstellen, muss zunächst ein **Renderer** konfiguriert werden, mit dem festgelegt wird, in welcher Form die Daten geplottet werden. Für die Darstellung von Abweichungen wird ein **DeviationRenderer**, aus `org.jfree.chart.renderer.xy.DeviationRenderer`, verwendet. Der **XYPlot** wird anschließend aus dem **Renderer** erzeugt und dem **XYLineChart** zugefügt. Als Ausgabe ergeben sich Diagramme mit einer (Abbildung 5.7) oder zwei Serien (Abbildung 5.8). Die Interpretation der Diagramme wird in den Ergebnissen 6.2 ausgeführt.

### 5.5.2. Geo-Visualisierung mit NASA World Wind

Zur geografischen Visualisierung von Trajektorien und Unsicherheiten wird in dieser Masterarbeit das Projekt *NASA World Wind* verwendet. Wie bereits erläutert, wird das Aus-

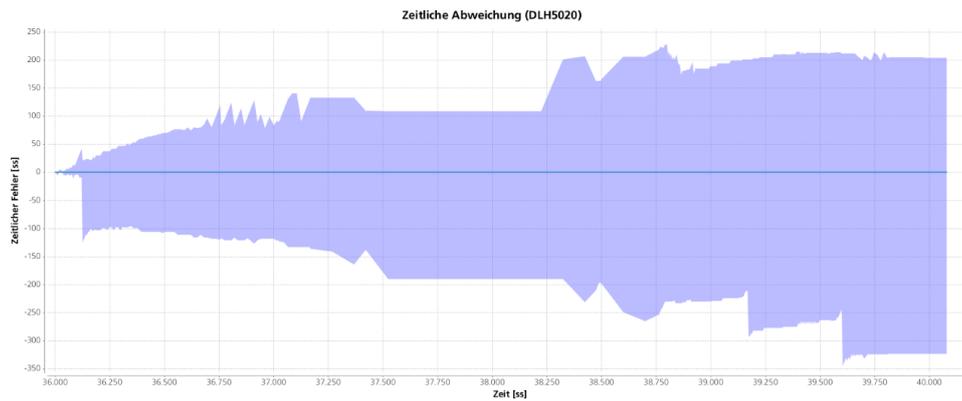


Abbildung 5.7.: Zeitliche Abweichung des Szenarios als skalare Größe

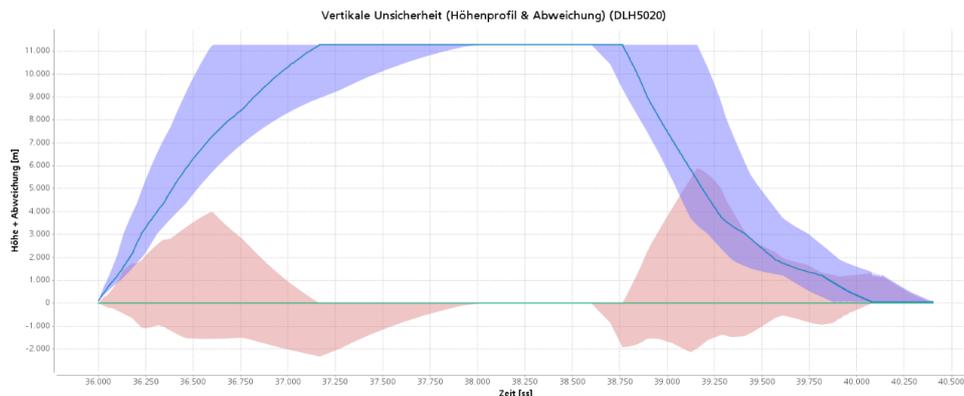


Abbildung 5.8.: Vertikale Abweichung des Szenarios als skalare Größe

wertungsmodul in `TrajectoryUncertaintyReport` verwaltet (siehe 5.5). Die Klasse legt fest, welche Funktionen nach der Auswahl eines Reports ausgeführt werden. Für die Darstellung mit `NWW` wird von der Basisklasse:

```
WorldWindGenerator.getInstance().startWorldWind(reportType);
```

aufgerufen. Das Geo-Panel wird durch die Klasse `WorldWindTemplate` initialisiert. Dabei wird zuerst das Anwendungspanel (`WorldWindWindow`) in der gewünschten Größe erzeugt und mit den einzelnen Schichten (Kompass, Konfiguration, Karte usw.) ergänzt. Anhand des `reportType` erkennt `WorldWindGenerator` welche Zeichnung erstellt und welche Funktion aufgerufen werden soll;

```
drawVerticalPaths(), drawEllipsoids, drawAllPaths oder drawFlightAnimation.
```

In den einzelnen Methoden wird als Erstes die jeweilige Fehlerberechnung gestartet und die Fehlerdaten geladen. Hier wird kurz erklärt, wie ein Pfad und die Ellipsoide erstellt werden. Aus der Referenztrajektorie werden die Koordinaten in eine Liste von Positionen hinzugefügt. Auf Grundlage der vollständigen Liste kann ein `worldwind.render.Path` erzeugt werden. Dem Pfad können dann bestimmte Eigenschaften zugewiesen werden, wie z.B. Farbe, Transparenz oder Beschriftungen. Als Letztes wird der Pfad dem Layer zugefügt, der auf dem Panel dargestellt wird. Für das Erstellen von Ellipsoiden müssen außer der Position in Koordinatenform, zusätzlich der longitudinale Fehler, der vertikale

Fehler, der diagonale Fehler, Kurswinkel, der Nickwinkel und der Rollwinkel angegeben werden:

```
Ellipsoid uncertaintyEllipsoid = new Ellipsoid(
    position, along, vertical, cross, yaw, pitch, roll);
```

Nachdem die Layer dem JPanel hinzugefügt wurden, kann der *EWMS*-Result ergänzt werden.

```
(getResult().setWorldWind(WorldWindTemplate.getInstance().getWwjPanel());)
```

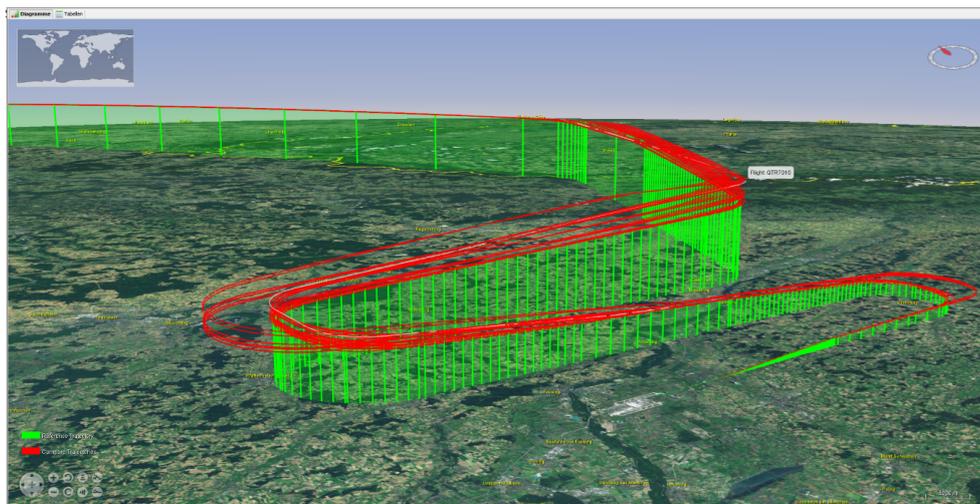


Abbildung 5.9.: Anflugtrajektorien in *NASA World Wind*, (Referenz: grün; Vergleich: rot)

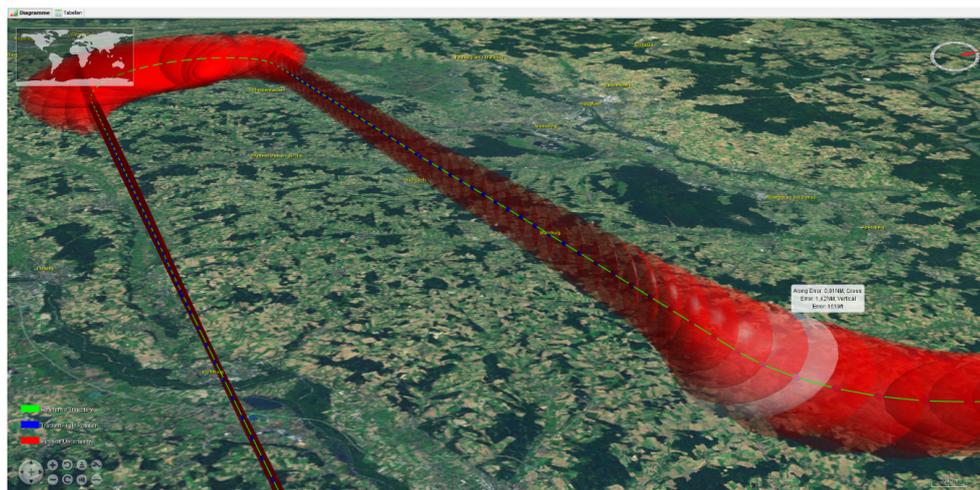


Abbildung 5.10.: Unsicherheiten durch Ellipsoide beim Abflug auf München

## 6. Modulanwendung und Ergebnisse

Die Entwicklung des Auswertungsmoduls erfolgte in mehreren Schritten und wurde nach den Umsetzungen der Funktionalität durch Use Cases mit Hilfe von Experten des DLR evaluiert. Anhand eines Beispiels werden die Softwarefunktionen und die Ergebnisse in diesem Kapitel präsentiert. Die Darstellungen und Ergebnisse basieren für diesen Zweck auf einem fiktiven Flugszenario von Hamburg nach München.

### 6.1. Anwendungsbeispiel

Aufgabe dieses Abschnitts ist es, eine Anwendung der Trajektorienauswertung in der EWMS-Umgebung zu demonstrieren und die einzelnen Schritte zu beschreiben. Die Software liegt als Version für 32bit und 64bit Systeme vor. Für die Ausführung des Programms muss Java mindestens in der Version 7 installiert sein.

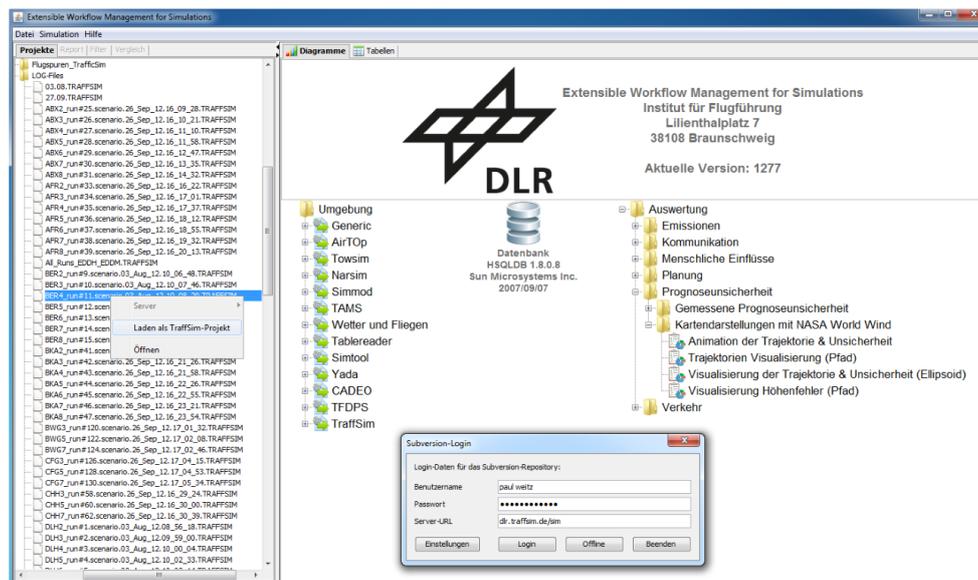


Abbildung 6.1.: EWMS-Startbildschirm

#### Einstellungen:

EWMS bietet im Startbildschirm eine Verbindung zu einem Versionierungs-Server an, um Projekte mit mehreren Partnern synchronisieren zu können. Eine lokale Projektbearbeitung ist ebenfalls möglich und kann durch den offline-Button gestartet werden. Das Hauptfenster von EWMS ist in zwei Bereiche gegliedert. Auf der rechten Seite werden aktuelle Informationen zur Version, implementierten Simulationsumgebungen und den möglichen Auswertungen angezeigt (siehe Abbildung 6.1). Am linken Rand des Hauptfensters befinden sich die Tabs zum Durchlaufen des Arbeitsflusses. Im Tab Projekte sind

die Simulationsstudien des Projektpfads aufgelistet. Das Laden der Simulationsergebnisse in die Datenbank erfolgt mit der rechten Maustaste. Nach dem erfolgreichen Ladevorgang ist der Projektordner mit einem grünen Haken markiert.

### Diagramm-Darstellungen:

Nach dem Laden des Simulationsprojekts folgt im Arbeitsfluss die Auswahl der Reports. Die Reportfunktionen sind wie in Abbildung 6.2 in einem eigenen Tab aufgelistet. Durch eine hierarchische Darstellung sind die verschiedenen Auswertungen in Kategorien unterteilt. Im Auswertungsverzeichnis /Prognoseunsicherheit/Diagramme sind alle wählbaren Darstellungen für die Fehlervektoren aufgelistet. Nach der Auswahl einer Metrik sind vom User der Referenzflug und die zu vergleichenden Flüge in einem Dialog auszuwählen. Durch Bestätigung der Auswahl wird die Berechnung gestartet und das Diagramm generiert.

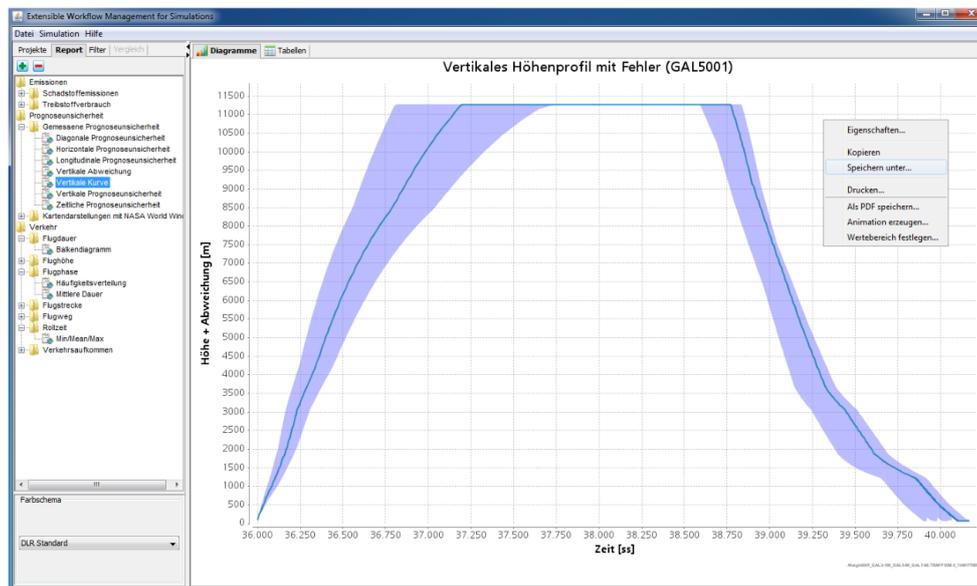
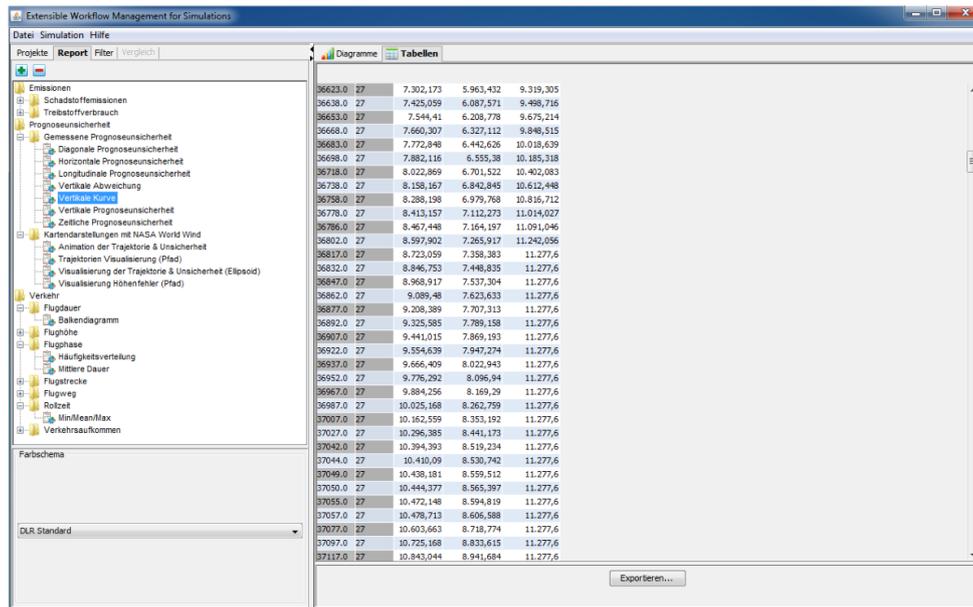


Abbildung 6.2.: Ausführen einer Diagramm-Auswertung

*JFreeChart* stellt Funktionen zur Verfügung, mit denen die Verarbeitung vereinfacht wird. So können Ausschnitte vergrößert oder die Grafik durch die rechte Maustaste Eigenschaften verändert und die Darstellung gespeichert werden. Für die Interpretation der Diagramme ist zu sagen, dass die y-Achse die Abweichung bzw. den Fehler anzeigt und die x-Achse die Flugdauer. Der undurchsichtige, breite Strich kennzeichnet immer den Referenzflug, dessen Bezeichnung in der Diagrammüberschrift in Klammern angezeigt wird. Durch die transparente Fläche wird der Bereich der Abweichung von den tatsächlichen Flügen vom Referenzflug dargestellt. Im Beispieldiagramm 6.2 ist die Flughöhe der prognostizierten Trajektorie die gesättigte Linie und der transparente Bereich die Unsicherheit. Die Zeit ist in Sekunden angegeben. In der Grafik ist erkennbar, dass der Referenzflug um 10:20:00 Uhr (37.200 sec) den TOD (ca. 11.300 m) erreicht. Die Vergleichstrajektorien habe zu diesem Zeitpunkt hingegen erst eine Flughöhe von 9.500 m erreicht. Daraus resultiert eine vertikale Abweichung von 1.800 m. In dem Reportprozess kann der Tab *Tabellen* ausgewählt werden um die Größen als Zahlenwerte zu erhalten (siehe Abbildung 6.3). In den Spalten der Tabelle sind Zeit in [sec], FlugID, Referenzhöhe, minimale Höhe

und maximale Höhe jeweils in [m] dargestellt.



ID	Status	Value 1	Value 2	Value 3	Value 4
36623.0	27	7.302,173	5.963,432	9.319,305	
36638.0	27	7.425,059	6.087,571	9.498,716	
36653.0	27	7.544,41	6.208,778	9.675,214	
36668.0	27	7.660,307	6.327,112	9.848,519	
36683.0	27	7.772,848	6.442,626	10.018,639	
36698.0	27	7.882,116	6.555,38	10.185,318	
36713.0	27	8.022,869	6.701,122	10.402,083	
36728.0	27	8.158,167	6.842,845	10.612,498	
36758.0	27	8.288,198	6.979,768	10.816,712	
36778.0	27	8.413,157	7.112,273	11.014,027	
36786.0	27	8.467,448	7.164,197	11.091,046	
36802.0	27	8.597,902	7.265,917	11.242,056	
36817.0	27	8.723,059	7.358,383	11.277,6	
36832.0	27	8.846,353	7.448,835	11.277,6	
36847.0	27	8.968,917	7.537,304	11.277,6	
36862.0	27	9.089,48	7.623,633	11.277,6	
36877.0	27	9.208,389	7.707,313	11.277,6	
36892.0	27	9.325,585	7.789,158	11.277,6	
36907.0	27	9.441,015	7.869,193	11.277,6	
36922.0	27	9.554,639	7.947,274	11.277,6	
36937.0	27	9.666,409	8.022,943	11.277,6	
36952.0	27	9.776,292	8.096,934	11.277,6	
36967.0	27	9.884,256	8.169,29	11.277,6	
36987.0	27	10.025,168	8.262,759	11.277,6	
37007.0	27	10.162,559	8.353,192	11.277,6	
37027.0	27	10.296,385	8.441,173	11.277,6	
37042.0	27	10.394,393	8.519,234	11.277,6	
37044.0	27	10.440,09	8.530,742	11.277,6	
37049.0	27	10.438,191	8.559,512	11.277,6	
37050.0	27	10.444,377	8.565,387	11.277,6	
37055.0	27	10.472,148	8.594,819	11.277,6	
37057.0	27	10.478,713	8.606,588	11.277,6	
37077.0	27	10.603,663	8.718,774	11.277,6	
37097.0	27	10.725,168	8.833,615	11.277,6	
37117.0	27	10.843,044	8.941,684	11.277,6	

Abbildung 6.3.: Exportieren der Ergebnisse in einer Tabelle

### 3D-Darstellungen:

Die geografischen Visualisierungen lassen sich in /Prognoseunsicherheit /Kartendarstellung mit NASA World Wind starten. Für diese Auswertung müssen vom Benutzer die Referenztrajektorie und die Vergleichsflüge für die drei Fehlerwerte *along-track-error*, *cross-track-error* und *vertical-error* ausgewählt werden. Im Anschluss an die Berechnungen wird das NASA Display in das Report-Fenster von *EWMS* integriert und die Flugbahn mit der Unsicherheit angezeigt (siehe Abbildung 6.4).

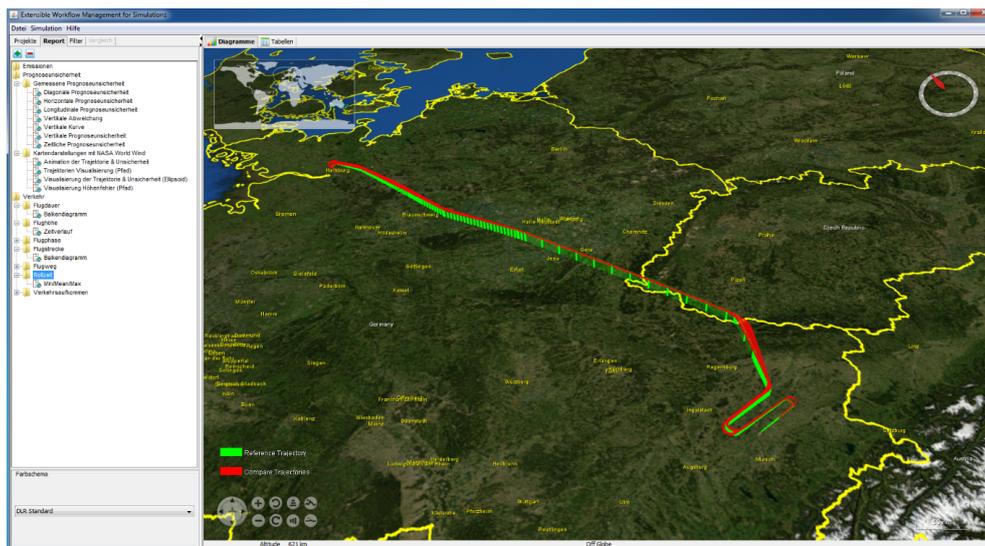


Abbildung 6.4.: Ausführen einer NWW-Auswertung

Es stehen vier verschiedene geografische Displayansichten zur Verfügung. Die Basisvi-

sualisierung ist das *Pfad-Display*, bei der die prognostizierte Flugbahn in grün und die Vergleichstrajektorien in einem transparenten rot gezeichnet sind. Wie im Konzept geplant, kann die räumliche Unsicherheit in der zweiten Variante, die ein Flugzeug zu einem bestimmten Zeitpunkt hat, durch ein rotes transparentes Ellipsoid auf einer Karte verdeutlicht werden. Ergänzend wird die Flugbahn in grün und die gespeicherten Positionen in blau angezeigt. Durch ein Label werden Informationen zu den Ellipsoiden (Werte der Fehlervektoren), dem Pfad (Rufzeichen des geplanten Trajektorie) und den Positionen (Uhrzeit) hinzugefügt. Als zusätzliches Feature wurde eine Animation für das *Ellipsoid-Display* implementiert. Dabei wird der Flug vom Start zum Ziel visuell abgeflogen und die Unsicherheits-Ellipsoide sequentiell generiert. Das *Höhenfehler-Display* zeigt die maximale und minimale Differenz der Höhe mit der Time Matched Metric an. Der blaue Bereich in der Beispieldarstellung 6.4 identifiziert die Trajektorie mit der geringsten Höhe, der grüne Pfad gibt die Referenztrajektorie wider und der rote Pfad kennzeichnet die Trajektorie mit der größten Flughöhe. In dem Display kann intuitiv interagiert werden. Durch bewegen des Musrads kann vergrößert und verkleinert werden, durch drücken der linken Maustaste kann das Bild bewegt werden und durch drücken der rechten Maustaste kann dreidimensional um alle Achsen rotiert werden. Zusätzlich werden, beim Überfahren mit dem Mauszeiger, Informationen zu den Pfaden bzw. Positionen angezeigt.

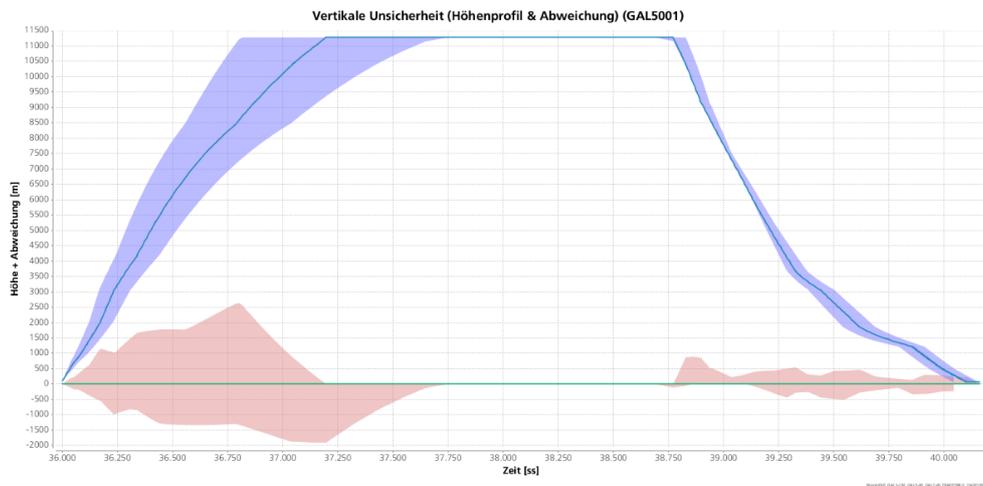
## 6.2. Interpretation der Ergebnisse

Das Verfahren ist experimentell mit empirischen Daten, im Umfang von über 2.000 Flügen, getestet worden. Aus den Versuchen werden für jeden Parameter Schlussfolgerungen gezogen und die Ergebnisse interpretiert. In Anhang A.2.3 sind alle Flüge mit den jeweiligen Parametereinstellungen aufgelistet. Abbildung A.4 enthält Flüge mit Gewichts- und Geschwindigkeitsvariationen. Abbildung A.5 listet Simulationsläufe auf, in denen der Wind und die Temperatur verändert wurde. Die Spalten geben Simulationslauf, Rufzeichen, meteorologische Parameter, Gewicht und Geschwindigkeit an. Jeder Simulationslauf (Zeile) enthält 26 Flüge die sich minimal in der Flugroute unterscheiden, um die RNP abzubilden. Das bedeutet, Simulationslauf 35 enthält Flüge von AFR4001 – AFR4026 mit Wind der Stärke 25 kn in Flughöhe 20.000 ft aus Richtung 270°, einer Temperatur von 0°C am Boden, einem Gewicht von 90% des maximalen Startgewichts und einer Reisefluggeschwindigkeit von 0,82 Mach. Um die Auswertungen der umfangreichen Simulationsergebnisse konstruktiv durchzuführen, wird nachfolgend jeder einzelne Parameter separat untersucht. Diese Masterarbeit soll die Simulationsinhalte nicht detailliert bewerten. Jedoch bieten umfangreiche Tests der Visualisierungen von Unsicherheiten gute Möglichkeiten das Verständnis über die Grafiken zu erhöhen.

### **Ergebnisse bei Gewichtsvariationen:**

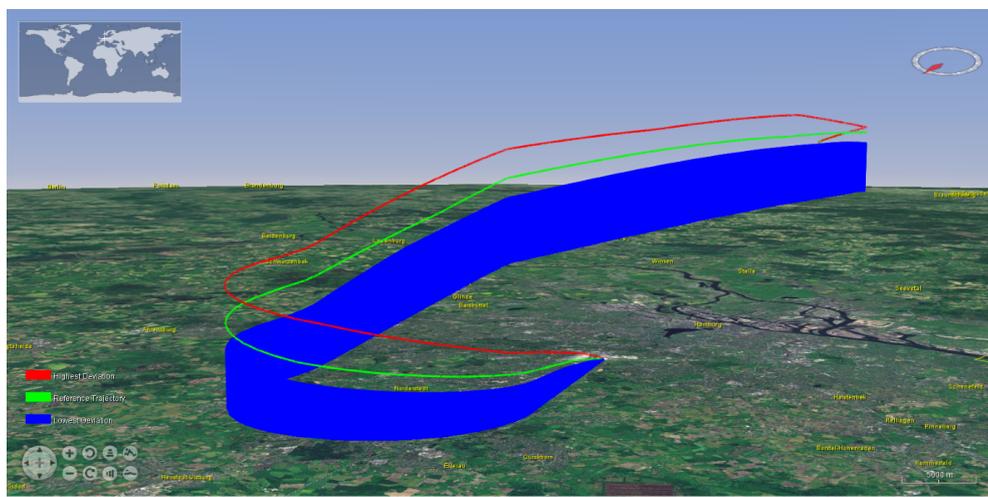
Für das Verhalten der Trajektorie bei Gewichtsänderungen wurden Berechnungen durchgeführt, bei denen der A320 eine Masse von 50 – 100 % des maximalen Startgewichts besitzt. Quantitative Ergebnisse werden für die Masseanalyse erreicht, wenn innerhalb einer Airline vergleichende Berechnungen durchgeführt werden (DLH3xxx mit DLH5xxx und DLH7xxx). Bei Gewichtsabweichungen sind vor allem die Auswertungen des vertikalen

Fehlers aussagekräftig. Im Höhenprofil in Abbildung 6.5 ist eine deutliche Unsicherheit, die durch Fehler in den Gewichtsprognosen auftreten, zu erkennen. Schwerpunktmäßig hat die Masse des Flugzeugs Einfluss auf die Climb Phase. Demgemäß bilden sich im Steigflug die größten Unsicherheiten heraus. Im Diagramm ist die Flughöhe nach Zeit in blau und die absolute Abweichung von der Referenz in rot visualisiert. Bei einer Gewichtsabweichung von  $\pm 20\%$  wurden, im vertikalen Flugprofil, Unsicherheiten von über 2.500 Meter berechnet. Nach dem Erreichen des TOD kann die Abweichung ausgeglichen werden und der Reiseflug findet in gleicher Höhe statt. In Bezug auf den Sinkflug hat der Gewichtsunterschied geringeren Einfluss als auf den Steigflug, zu erkennen ist dies am schmaleren transparenten Bereich.



**Abbildung 6.5.:** Vertikaler Fehler bei einer Gewichtsabweichung von ( $\pm 20\%$ )

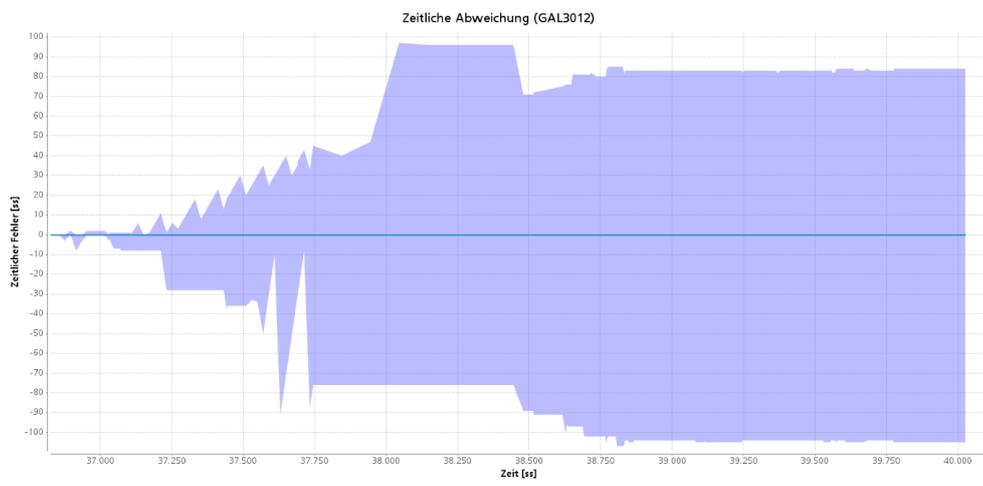
In der NASA-Visualisierung (Abbildung 6.6) ist ebenfalls eine große Abweichung zwischen der Referenzflugbahn (grün) und der maximalen (rot) bzw. minimalen (rot) Flughöhe abgebildet. Zwischen der blauen Fläche und der roten Linie liegt der Bereich in dem sich ein Flugzeug, mit einer solchen Gewichtsunsicherheit, bewegt.



**Abbildung 6.6.:** Vertikaler Fehler in NWW bei einer Gewichtsabweichung von ( $\pm 20\%$ )

### Ergebnisse bei Geschwindigkeitsänderungen:

Die Beurteilung der Geschwindigkeitsparameter kann für 0,74 Mach, 0,78 Mach und 0,82 Mach durchgeführt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass Flüge für die Auswertung gewählt sind, die sich nur in der Geschwindigkeit und in keinen weiteren Parametern unterscheiden (z.B. GAL3012 und CHH3012 und LKN3012). Die Änderung der Geschwindigkeit wirkt sich primär auf die zeitliche Dimension aus. Aus diesem Grund wird im Grafik 6.7 die Darstellung zur Analyse des zeitlichen Fehlers für das Beispiel angezeigt. Es ist festzustellen, dass die zeitliche Abweichung bis zur Hälfte des Fluges linear ansteigt und weiterführend annähernd konstant bleibt. Bei einer Vergrößerung der Geschwindigkeit von 0,04 Mach kann die Strecke von Hamburg nach München über 100 sec schneller zurückgelegt werden. Durch Verringerung der Geschwindigkeit um 0,4 Mach kommt es zu einer Verspätung von ca. 90 sec.



**Abbildung 6.7.:** Zeitliche Unsicherheit bei Geschwindigkeitsabweichungen zwischen 0,74 – 0,82 Mach

### Ergebnisse bei Abweichungen von der Windrichtung:

Flug QTR3005 hat einen durchschnittlichen Wind von 30-50 kn aus Richtung 90° und Flug EWG3005 hat Wind der selben Stärke aus 180°. Alle anderen Parameter und Einschränkungen sind identisch. Der berechnete zeitliche Fehler gibt an, dass QTR3005 die Strecke 271 Sekunden schneller abfliegt als der Flug mit Wind aus Süden. Die zeitliche Differenz zwischen den Flugspuren wird im Verlauf des Fluges kontinuierlich größer (siehe Abbildung 6.10). Der Gegenwind auf der Nord-Süd Strecke bewirkt eine geringere Geschwindigkeit über Grund (GS) und somit eine längere Flugzeit. Die Differenz in der zurückgelegten Strecke spiegelt sich auch in der longitudinalen Abweichung wider. Wie in Abbildung 6.9 zu erkennen, nimmt dieser im Betrag kontinuierlich bis zum Maximum von fast 50 km zu, beinhaltet nur während des Fluges einen Vorzeichenwechsel. Das ist darauf zurückzuführen, dass sich das Flugzeug bei positiven Werten westlich und bei negativen Werten östlich der geplanten Position befindet. Der diagonale und horizontale Fehler ist allerdings relativ gering. Sie enthalten nur an den vorgeschriebenen Wegpunkten und im TMA größere Peaks, was durch den zeitlichen Unterschied begründet ist.

### Ergebnisse bei Veränderung der Windstärke:

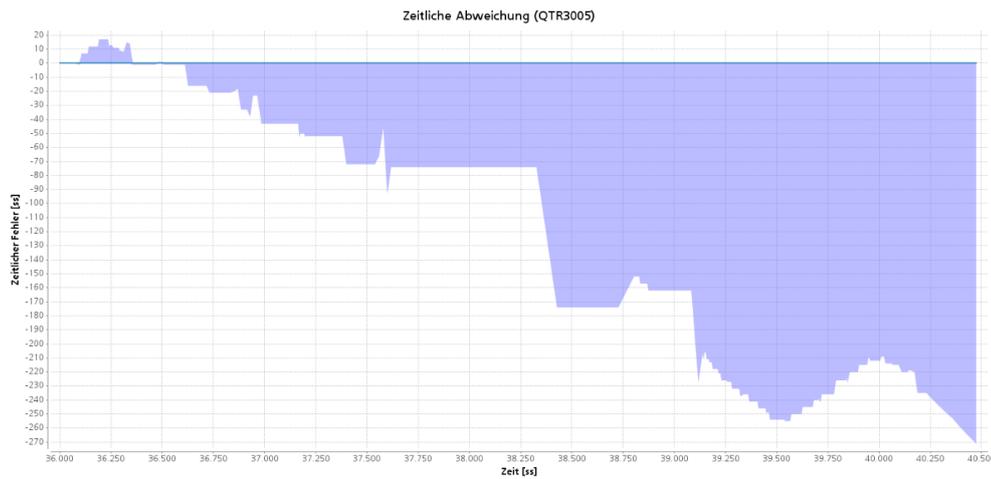


Abbildung 6.8.: Zeitlicher Fehler bei Abweichung der Windrichtung um 90°

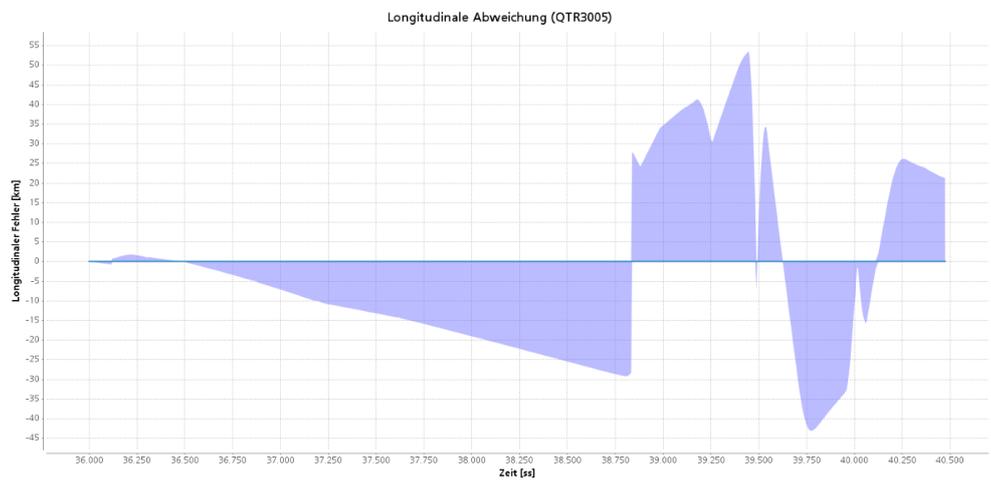


Abbildung 6.9.: Longitudinaler Fehler bei Abweichung der Windrichtung um 90°

Bei einer Windrichtung von 90° hat das Flugzeug auf der Strecke von Hamburg nach München während des Fluges größtenteils Seitenwind. Bei gleichbleibender Richtung wurde die Windstärke mit einem Prognosefehler von  $\pm 10$  kn simuliert. Für die Repräsentation dieses Szenarios eignet sich der Vergleich von Egypt Air Flügen (MSR) mit Condor Flügen (CFG). Auch hier ist ein Anstieg im longitudinalen Fehler mit dem erläuterten Vorzeichenwechsel zu beobachten. Jedoch ist der Abstand zwischen den Trajektorien, mit maximal 6,5 m, fast  $\frac{1}{10}$  kleiner. Für die Auswertung dieses Parameters ist darüber hinaus das Ellipsoid-Display geeignet. In Abbildung 6.11 ist ein typische Effekt bei einer Aneinanderreihung von Ellipsoiden abgebildet. Durch die vielen nachfolgenden Positionen bildet sich, wie in den Grundlagen vermutet, eine Art Schlauch, in dem sich das Flugzeug bewegt. Die Dimension des ausgewählten Ellipsoids beträgt 2,88 NM in longitudinaler, 1,52 NM diagonal und 1372 ft vertikaler Richtung.

### Ergebnisse bei Temperaturabweichungen:

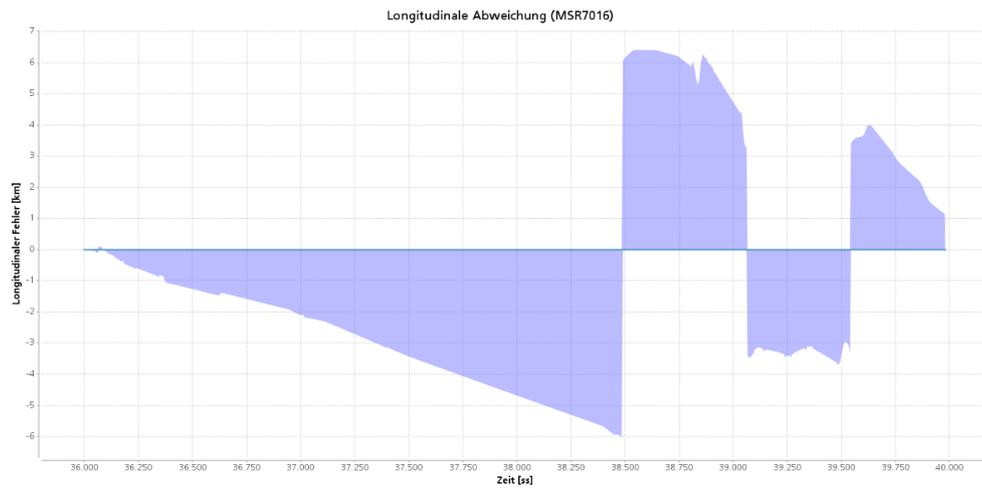


Abbildung 6.10.: Horizontaler Fehler bei Änderung der seitlichen Windstärke um 10 kn

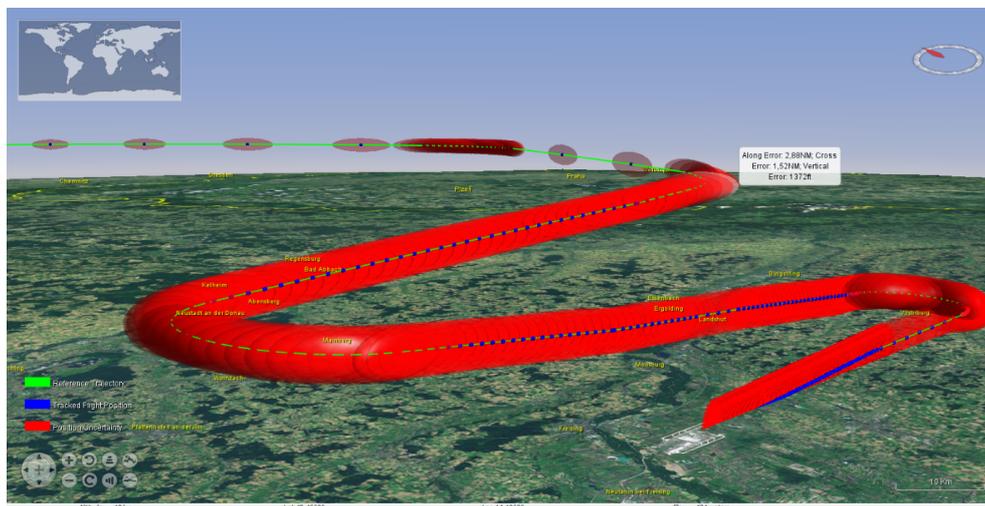
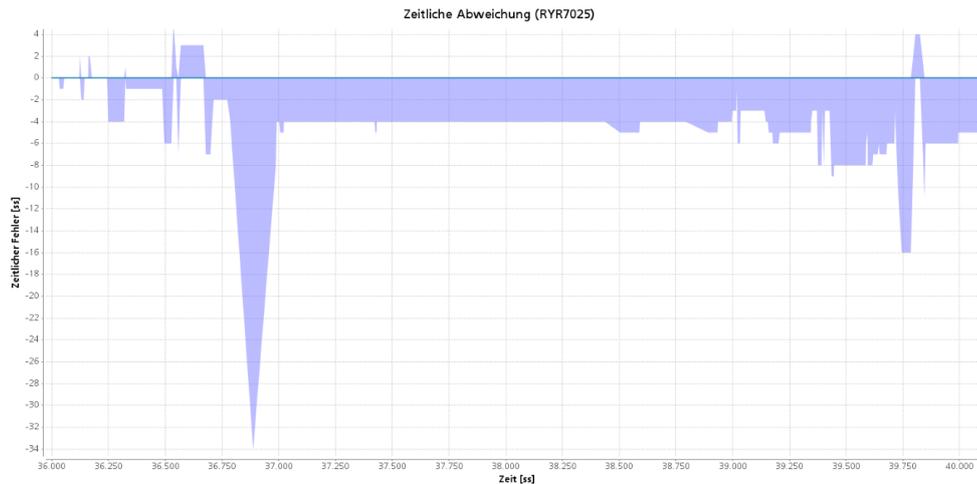


Abbildung 6.11.: Unsicherheiten im Anflug (Ellipsoid), bei Änderung der seitlichen Windstärke um 10 kn

Bei den Tests verursachte ein Fehler der Temperaturprognose um  $\pm 15^\circ \text{C}$  eine sehr geringe zeitliche (temporal-error  $< 15 \text{ sec}$ ), vertikale (vertical-error  $< 300 \text{ m}$ ) und horizontale (cross-track-error  $< 1 \text{ NM}$ ) Unsicherheit. Die Prognosefehler wurden in den Flügen RYR5008 und BWG5008 künstlich erzeugt und wirken sich stark auf das Ende des Steigflugs, zwischen 10:12:30 Uhr (36.750 sec) und 10:16:39 Uhr (37.000 sec), aus (siehe Abbildung 6.12). Nach Erreichen der Reiseflughöhe pendelt sich die Verspätung des Vergleichsflugs bei ca. 4 sec ein.

In den Tests des implementierten Softwaremoduls konnten die Auswirkungen aller identifizierten Einflussparameter berechnet und in geeigneter Form visualisiert werden. Die Höhendifferenz bei Ungenauigkeiten in der Gewichtsprognose gehen mit den Ergebnissen aus [51] einher. Darin wurde festgestellt, dass Abweichungen von 10% zwischen prognostiziertem und tatsächlichem Gewicht einen vertikalen Fehler im Steigflug von 1200 ft pro



**Abbildung 6.12.:** Zeitliche Unsicherheit bei einer Temperaturänderung um 20°C

5 Minuten ergeben. Im obigen Beispiel beträgt die Unsicherheit nach 5 min zwischen + 1300 ft und - 1000 ft. Eine solche Abweichung ist aufgrund von ungenauen Vorhersagen der Beladung und Passagieranzahl durchaus üblich und hat kann eine Unterschreitung der Separationen zur Folge haben. Neben der Gewichtsprognose hat hauptsächlich die Vorhersage der Windrichtung und Windstärke entscheidenden Einfluss auf die Qualität der geplanten Trajektorie. So verursacht Gegenwind statt Seitenwind eine längere Flugzeit auf der Strecke Hamburg-München von über 4 min.

In Kapitel 3 wurden Anforderungen an die Visualisierung von Unsicherheiten erarbeitet, die in vollem Umfang umgesetzt werden konnten. In den Darstellungen sind der sichere Wert mit der unsicheren Größe gemeinsam abgebildet. Die Unsicherheiten konnten durch veränderte Form bzw. transparente Zeichnung abgegrenzt werden. Die aus Abbildung 3.2 und 3.3 eingeführten Boxplot und Quantile Plot sind durch den Deviation Plot umgesetzt. Die Visualisierungsergebnisse stellen im Vergleich zu den relevanten Arbeiten aus Kapitel 2.5.3 eine Weiterentwicklung dar. Diesbezüglich werden die Unsicherheiten über den kompletten Flugweg dargestellt, im Gegensatz zur Darstellung an den Sektorgrenzen in Wanke [33].

## 7. Zusammenfassung und Fazit

Mit einer durchschnittlichen Wachstumsrate für den europäischen Luftverkehr von etwa 3 % bis 2030 [1] wird die Entwicklung der vergangenen Jahre weiter fortgesetzt. Das hat zur Folge, dass die Flughafen- und Luftraumkapazitäten an ihre Grenzen stoßen und in den Sektoren Überlastsituationen entstehen. Um der steigenden Nachfrage gerecht zu werden, müssen zukunftsweisende trajektorienbasierte Flugführungskonzepte implementiert werden. Allerdings fordert das die Entwicklung neuer Systeme zur Analyse und Kontrolle der Flugtrajektorien. Speziell die Abweichungen der tatsächlichen von der geplanten Flugspur müssen genau untersucht werden.

In dieser Masterarbeit wurde ein Konzept zur Bewertung und Visualisierung von Unsicherheiten in der Trajektorienplanung entwickelt und implementiert. Um die Umsetzung zu realisieren, wurde ein Ansatz zur Messung, Modellierung und Simulation von Trajektorienunsicherheiten erarbeitet. Das Modell wurde mit Hilfe von Stichproben definiert.

Die Umsetzung der vorliegenden Arbeit orientiert sich an drei Arbeitsschritten. In der theoretischen Betrachtung wurde Wissen zu Flugführungskonzepten und der Verwendung von Trajektorien im Luftverkehr vermittelt. Weiterführend wurden Parameter, die Einfluss auf Trajektorienabweichungen haben, untersucht und die Wichtigsten identifiziert. Aus den Kenntnissen der Literaturarbeit wurden Methoden zur Eigenentwicklung bewertet und zielführende Verfahren für die Auswertungsalgorithmen modifiziert. Das Konzept zur Bewertung von Flugtrajektorien wurde in den weiteren Schritten erarbeitet. Dabei wurden Formeln zur Berechnung von Fehlervektoren im kartesischen und geografischen System aus trigonometrischen Gesetzen hergeleitet. Zusätzlich sind die für die Bewertung benötigten Daten identifiziert und erläutert worden. Mit diesem Konzept kann die geplante mit der tatsächlich Flugbahn verglichen bzw. Unsicherheiten für eine Trajektorie simuliert werden. Durch die eingeführten Metriken wurden mögliche Fehler klar definiert und die räumliche Abweichung wurde durch die Vektoren *horizontal error*, *along-track error*, *cross-track error* sowie der *vertical-error* beschrieben. Darüber wurden mit den Fehlervektoren die Ellipsoide generiert, welche die Unsicherheit darstellen.

Zur informationstechnischen Umsetzung des Konzepts wurde für die Auswertungssuite *EWMS* ein Parser zum Einlesen von Simulationsdaten aus dem *TrafficSim* implementiert. Zusätzlich wurde ein Auswertungsmodul mit den entwickelten Formeln zum Bewerten der Fluginformationen implementiert. Die Algorithmen realisieren die Berechnung der Metriken und mit Hilfe der Ergebnisse können Aussagen über die Größe von Unsicherheiten getroffen werden.

Für die Validierung der Prognoseunsicherheiten wurden im ersten Schritt mögliche Fehlerbereiche durch repetitive Simulation von Flugverkehrsszenarien gemessen und den Einflussfaktoren zugeordnet. Aus den Messungen wurde ein einfaches Modell zur Simulation von Unsicherheiten abgeleitet. Das Aggregieren der Unsicherheitsmessungen zu

einer stochastischen Verteilung birgt den Nachteil, dass keine speziellen Verkehrssituationen abgebildet werden, sondern der Durchschnitt als Basis dient. Eine Modellierung aller möglichen Parametervariation und herleiten der Unsicherheiten ist für den Umfang einer Masterarbeit zu komplex. Der geeignetere Weg zur Berechnung von Trajektorien ist die Nutzung von Trajektoriengeneratoren und Schnellzeitsimulationen. Dafür ist denkbar, dass im operationellen Betrieb vor einem Flug die geplante Mission durch eingeschränkte Parameterabweichungen mehrfach berechnet wird um Abweichungen zu erkennen.

Der Anwender ist mit Hilfe des *EWMS*-Systems in der Lage, Simulationsszenarien einzu-lesen und die Trajektorien auf ungenaue Prognosen zu untersuchen. Für die Bewertung werden räumliche Fehler nach der Time Matched Metric (Abbildung 4.8) und zeitliche Fehler nach der Closest Point Metric (Abbildung 4.10) berechnet. Die Darstellungen der Trajektorienabweichungen helfen dem Wissenschaftler, Piloten oder Lotsen die geplante Flugbahn und die dabei zu erwartenden Abweichungen zu erkennen. Im Allgemeinen kann festgehalten werden, dass sich die Unsicherheit bei der Trajektorienplanung mit Zunahme der Datenqualität verkleinert. Das bedeutet, bei genauerem Dateninput für die Trajektoriengenerierung weicht die geplante Route von der tatsächlich geflogenen weniger ab. Obwohl das Modul aktuell nur Trajektorien aus *TrafficSim*-Szenarien lesen kann, ist die Datenbankstruktur und die Importfunktionalität so aufgebaut, dass das Einlesen weiterer Datenformate grundsätzlich möglich ist. In den Ausarbeitungen wurde erkannt, dass eine analytische Lösung von sich überschneidenden Unsicherheits-Ellipsoiden mit den originalen Koordinaten schwer zu realisieren ist. Allerdings ist eine numerische Lösung möglich, birgt aber für eine Konflikterkennung zu wenig Genauigkeit. Zur Entwicklung einer solchen Analyse muss eine Koordinatentransformation mit Projektion auf verschiedene Ebenen gefunden werden. Damit wäre eine analytische Untersuchung von Konflikten umsetzbar.

Im EU-Projekt SESAR [11] gibt es konkrete Planungen zur Umsetzung eines trajektorienbasierten Luftverkehrsmanagements zur Abfertigung einer hohen Verkehrsdichte in der Luft. Um den Anforderungen gerecht zu werden, gilt es, die Planungsunsicherheiten mit dem entwickelten Tool weiter zu untersuchen. Des Weiteren sind die Vorhersagen für Parameter, die als ausschlaggebend identifiziert wurden, zu verbessern. Zur Unterstützung von Lotsenentscheidungen müssen zukünftig die Informationen über mögliche Planungsunsicherheiten kommuniziert werden. Für diesen Zweck müssen Computerprogramme die Flugintentionen, Umweltbedingungen und Flugkontrollinformationen analysieren und für den Lotsen verständlich aufarbeiten. Zukünftige Versuche könnten mit größeren Trajektoriendaten, die Verkehr eines kompletten Betriebstages an einem Flughafen in Deutschland oder von ganz Europa enthalten, durchgeführt werden. Zudem ist zu testen welche Eigenschaft die Qualität von Prognoseunsicherheiten bei anderen Flugzeugtypen aufweisen.

Für die Visualisierung von Flug-Trajektorien stellen Umfang und Komplexität der Daten in gleichen Maßen eine Herausforderung an die Performance dar, wie für alle anderen wissenschaftlichen Visualisierungen. In den Entwicklungen konnten alle sekundlich getakteten Flugpunkte untersucht werden. Eine Einteilung in Phasen und Auslassen einiger Punkte, wie in Kapitel 4.1 entworfen, war bei den bisherigen Datenmengen nicht nötig. Dennoch kann die Performance in nachfolgenden Arbeiten verbessert werden, indem die Granu-

larität der Daten nach dem *multiresolution data model* von Foulks et al. [54] verringert wird. Nach dem Modell entstehen durch das Reduzieren der Komplexität Daten-Lücken, die mit Hilfe von Rendering-Algorithmen ausgeglichen werden. Mit dem Abschluss der Arbeit hat die Software einen einsatzfähigen Status erreicht. Die Entwicklungen liefern den Benutzern aktuell und in Zukunft flexible Einsatzmöglichkeiten in Forschungsprojekten des DLR.

## A. Anhang

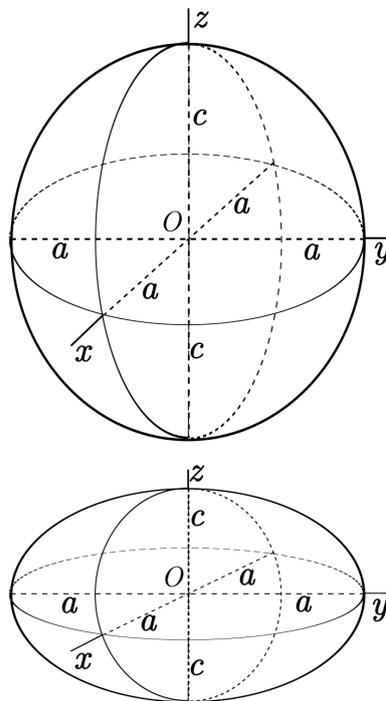
### A.1. Definitionen

#### A.1.1. Sektor Fluglotse

Einfache Sektorcharakterisierung durch Anzahl der Flugzeuge, Flugzeugdichte, Anzahl steigender und sinkender Flüge, Geschwindigkeitsveränderung und die Lage der geplanten Trajektorien zueinander.

#### A.1.2. Ellipsoid

Ellipsoide können im zweidimensionalen und dreidimensionalen Raum betrachtet werden. Das Ellipsoid kann als Kugeloberfläche (Sphäre) beschrieben werden, welches an den Achsen gestaucht oder gestreckt ist. [55]



**Abbildung A.1.:** Gestauchtes und gestrecktes Ellipsoid, nach [55]

## A.2. Simulations-Daten

### A.2.1. Flugzeugeigenschaften A320

```

Performance Parameters

AC Code           = A320__
No Engines       = 2
Engine Kind      = Jet
Wake Category    = M
Wing Span        = 34.1 m
Length           = 37.6 m

Max. Mach operating = 0.820
Max Cruise FL      = 410

                Min      Nom      Max
Take Off CAS      135      140      350   kts
Restricted Climb CAS 153      250      350   kts
Economic Climb CAS 153      310      350   kts
Cruise CAS       183      310/250  350   kts
Economic Descent CAS 183      300/300  350   kts
Restricted Descent CAS 183      250      350   kts
Intercept CAS    160      220      220   kts
Approach CAS     135      135      135   kts
Landing CAS      127      127      127   kts

Mach             Climb    Cruise  Descent
                0.78     0.78   0.79

AC zero fuel weight fuel_weight  max_take_off_weight  reference_weight
- 121530            19566         169756                141096  --lb
- 55125             8875          77000                 64000  kg
Max. Payload = 21500 kg

Take Off Length = 2190.000000 m
Landing Length  = 1440.000000 m

Energy Sharing Index
esi_accel_climb = 0.700000
esi_decel_climb = 1.300000
esi_accel_descent = 1.150000
esi_decel_descent = 0.600000

Aerodynamic Coefficients
Wing_Area = 122.60000
CD0_Gear = 0.03800
Phase Name      Vstall  CD0      CD2
CR CLEAN        140.5   0.02666  0.03873
IC 1            118.0   0.02300  0.04400
TO 1+F         112.1   0.03300  0.04100
AP 2            105.1   0.03800  0.04190
LD FULL        101.3   0.09600  0.03710

Engine Thrust Coefficients
Ctc1 = 1.423100e+05
Ctc2 = 5.168000e+04

```

**Abbildung A.2.:** Aufbau eines PERF\_PARMS-Files (Flugzeugeigenschaften des Airbus A320)

## A.2.2. Constraint-File

```

Company Route      : DLH2006_EDDH_EDDM
Source            : whatif
Take off Time     : 10:00:00
Cruise Flight Level : 370

SID No_Waypoints  : DEP4      4
STAR No_Waypoints : DUDEG     3

Departure Airport
Name:             EDDH
Runway Name      : 0L
Speed Restr Alt  : 10000
Transition Alt   : 8000
TMA NA Lmt Alt   : 2000
Runway Threshold : 364
Runway Latitude  : 53.630279
Runway Longitude : 9.988056

Arrival Airport
Name             : EDDM
Runway Name      : 02
Speed Restr Alt  : 10000
Transition Alt   : 5000
TMA NA Lmt Alt   : 2000
Runway Threshold : 183
Runway Latitude  : 48.35361
Runway Longitude : 11.78583

Descent Specification
Descent Kind:    Continuous_Descent
Start Of Steep Descent : 3500
Intercept Alt   : 4000
Glideslope Angle : 3.0
Level_at_Gate   : 5.0

Path Stretching : (1=Fan, 2=Tromb), Inner Range, Outer Range
                2                    5.94      20.00

No_Waypoints : 21

Waypoints
Nr, Name , Lat , Long , Turn,Radius,
1 AP      53.630278 9.988056 mot 0.00
2 RWY_DEP 53.630278 9.988056 mot 0.00
3 DEP2    53.7 9.945555556 sot 11.00
4 DEP4    53.70805556 10.08305556 sot 11.00
5 AMLUH   53.425 10.32333333 sot 13.00
6 POVEL   52.12833333 10.82833333 sot 13.00
7 GALMA   51.39833333 11.45166667 sot 13.00
8 LULAR   49.36666667 12.75833333 sot 13.00
9 LANDU   48.59666667 12.27333333 mot 13.00
10 DM411  48.53777778 11.50138889 sot 0.00
11 DM422  48.42888889 11.52111111 sot 0.00
12 DM425  48.45277778 11.82638889 mot 0.00
13 DM429  48.49333333 12.37833333 sot 0.00
14 DM439  48.40916667 12.39194444 sot 0.00
15 DM438  48.39833333 12.24305556 mot 0.00
16 DUDEG  48.3875 12.09388889 sot 13.00
17 DM437  48.37805556 11.97 mot 0.00
18 RWY_ARR 48.36 11.81777778 mot 0.00

```

**Abbildung A.3.:** Aufbau eines Constraint-Files für den TrafficSimulator

### A.2.3. Simulationsszenario

Simulations-Lauf		FORECAST		PERFORMANCE			
Lufthansa		METEO		WEIGHT [lb]	WEIGHT [kg]		SPEED M[-]
1	DLH2xxx		0	121530	55125	80,90%	0,78
2	DLH3xxx		0	145190	65857	100%	0,78
3	DLH4xxx		0	135171	61312	90%	0,78
4	DLH5xxx		0	120152	54500	80%	0,78
5	DLH6xxx		0	105133	47687	70%	0,78
6	DLH7xxx		0	90114	40875	60%	0,78
7	DLH8xxx		0	75095	34062	50%	0,78
AirBerlin		METEO		WEIGHT [lb]	WEIGHT [kg]		SPEED M[-]
9	BER2xxx		0	121530	55125	80,90%	0,82
10	BER3xxx		0	145190	65857	100%	0,82
11	BER4xxx		0	135171	61312	90%	0,82
12	BER5xxx		0	120152	54500	80%	0,82
13	BER6xxx		0	105133	47687	70%	0,82
14	BER7xxx		0	90114	40875	60%	0,82
15	BER8xxx		0	75095	34062	50%	0,82
TUIFly Ger		METEO		WEIGHT [lb]	WEIGHT [kg]		SPEED M[-]
17	HLX2xxx		0	121530	55125	80,90%	0,74
18	HLX3xxx		0	145190	65857	100%	0,74
19	HLX4xxx		0	135171	61312	90%	0,74
20	HLX5xxx		0	120152	54500	80%	0,74
21	HLX6xxx		0	105133	47687	70%	0,74
22	HLX7xxx		0	90114	40875	60%	0,74
23	HLX8xxx		0	75095	34062	50%	0,74
ABX Air USA		METEO ACTUAL		WEIGHT [lb]	WEIGHT [kg]		SPEED M[-]
25	ABX2xxx	meteo_weitz_270.00_0_25_0C		121530	55125	80,90%	0,78
26	ABX3xxx	meteo_weitz_270.00_0_25_0C		145190	65857	100%	0,78
27	ABX4xxx	meteo_weitz_270.00_0_25_0C		135171	61312	90%	0,78
28	ABX5xxx	meteo_weitz_270.00_0_25_0C		120152	54500	80%	0,78
29	ABX6xxx	meteo_weitz_270.00_0_25_0C		105133	47687	70%	0,78
30	ABX7xxx	meteo_weitz_270.00_0_25_0C		90114	40875	60%	0,78
31	ABX8xxx	meteo_weitz_270.00_0_25_0C		75095	34062	50%	0,78
AirFrance		METEO ACTUAL		WEIGHT [lb]	WEIGHT [kg]		SPEED M[-]
33	AFR2xxx	meteo_weitz_270.00_0_25_0C		121530	55125	80,90%	0,82
34	AFR3xxx	meteo_weitz_270.00_0_25_0C		145190	65857	100%	0,82
35	AFR4xxx	meteo_weitz_270.00_0_25_0C		135171	61312	90%	0,82
36	AFR5xxx	meteo_weitz_270.00_0_25_0C		120152	54500	80%	0,82
37	AFR6xxx	meteo_weitz_270.00_0_25_0C		105133	47687	70%	0,82
38	AFR7xxx	meteo_weitz_270.00_0_25_0C		90114	40875	60%	0,82
39	AFR8xxx	meteo_weitz_270.00_0_25_0C		75095	34062	50%	0,82
Bankair USA		METEO ACTUAL		WEIGHT [lb]	WEIGHT [kg]		SPEED M[-]
41	BAK2xxx	meteo_weitz_270.00_0_25_0C		121530	55125	80,90%	0,74
42	BAK3xxx	meteo_weitz_270.00_0_25_0C		145190	65857	100%	0,74
43	BAK4xxx	meteo_weitz_270.00_0_25_0C		135171	61312	90%	0,74
44	BAK5xxx	meteo_weitz_270.00_0_25_0C		120152	54500	80%	0,74
45	BAK6xxx	meteo_weitz_270.00_0_25_0C		105133	47687	70%	0,74
46	BAK7xxx	meteo_weitz_270.00_0_25_0C		90114	40875	60%	0,74
47	BAK8xxx	meteo_weitz_270.00_0_25_0C		75095	34062	50%	0,74
48		METEO ACTUAL		WEIGHT [lb]	WEIGHT [kg]		SPEED M[-]
Galaxy Kirgisistan							
50	GAL3xxx	meteo_weitz_45.00_10_45_25C		145190	65857	100%	0,78
52	GAL5xxx	meteo_weitz_45.00_10_45_25C		120152	54500	80%	0,78
54	GAL7xxx	meteo_weitz_45.00_10_45_25C		90114	40875	60%	0,78
56		METEO ACTUAL		WEIGHT [lb]	WEIGHT [kg]		SPEED M[-]
China Hainan							
58	CHH3xxx	meteo_weitz_45.00_10_45_25C		145190	65857	100%	0,82
60	CHH5xxx	meteo_weitz_45.00_10_45_25C		120152	54500	80%	0,82
62	CHH7xxx	meteo_weitz_45.00_10_45_25C		90114	40875	60%	0,82
64		METEO ACTUAL		WEIGHT [lb]	WEIGHT [kg]		SPEED M[-]
Sri LankAir							
66	LKN3xxx	meteo_weitz_45.00_10_45_25C		145190	65857	100%	0,74
68	LKN5xxx	meteo_weitz_45.00_10_45_25C		120152	54500	80%	0,74
70	LKN7xxx	meteo_weitz_45.00_10_45_25C		90114	40875	60%	0,74

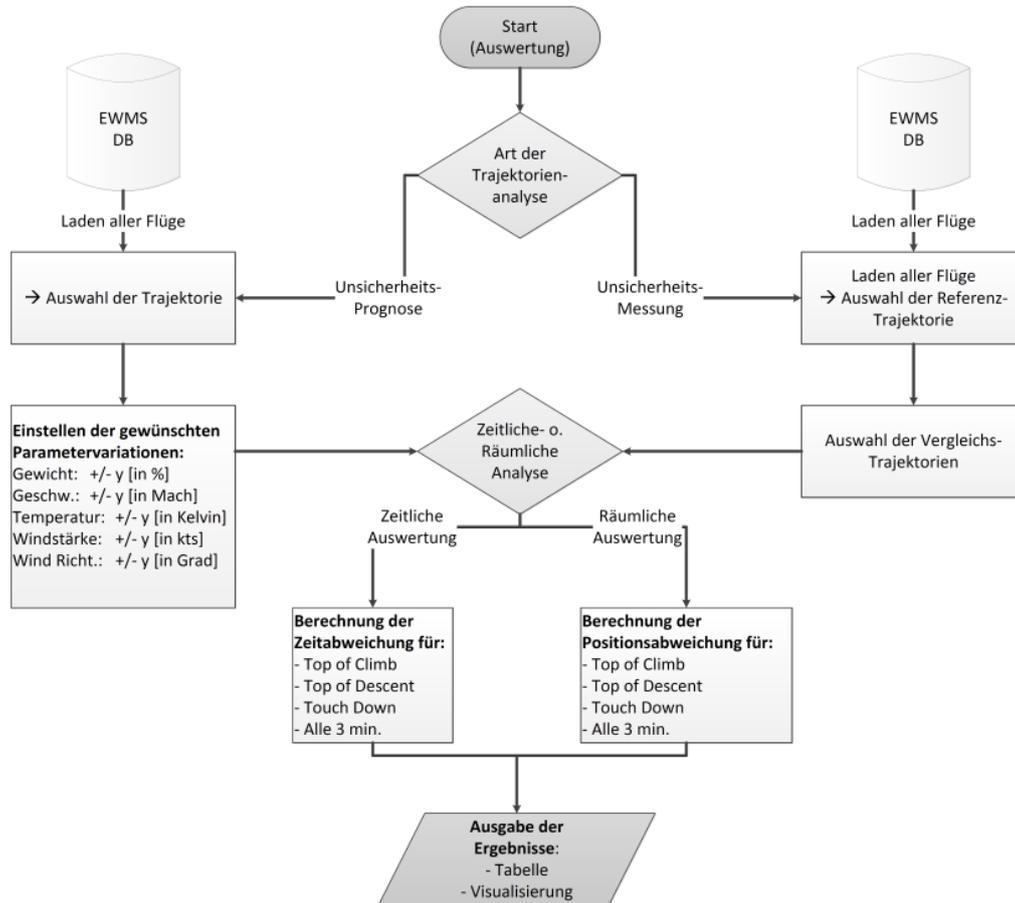
**Abbildung A.4.:** Die Parametervariationen Geschwindigkeit und Gewicht

		METEO_ACTUAL	WEIGHT [lb]	WEIGHT [kg]		SPEED M[-]
Oman						
	74	OMA3xxx meteo_weitz_270.00_0_35_15C	145190	65857	100%	0,78
	76	OMA5xxx meteo_weitz_270.00_0_35_15C	120152	54500	80%	0,78
	78	OMA7xxx meteo_weitz_270.00_0_35_15C	90114	40875	60%	0,78
	80					
PMTAir Kambod						
	82	PMT3xxx meteo_weitz_270.00_10_45_15C	145190	65857	100%	0,82
	84	PMT5xxx meteo_weitz_270.00_10_45_15C	120152	54500	80%	0,82
	86	PMT7xxx meteo_weitz_270.00_10_45_15C	90114	40875	60%	0,82
	88					
united airlines						
	90	UAL3xxx meteo_weitz_270.00_30_65_15C	145190	65857	100%	0,74
	92	UAL5xxx meteo_weitz_270.00_30_65_15C	120152	54500	80%	0,74
	94	UAL7xxx meteo_weitz_270.00_30_65_15C	90114	40875	60%	0,74
Ryanair						
	98	RYR3xxx meteo_weitz_90.00_15_50_15C	145190	65857	100%	0,78
	100	RYR5xxx meteo_weitz_90.00_15_50_15C	120152	54500	80%	0,78
	102	RYR7xxx meteo_weitz_90.00_15_50_15C	90114	40875	60%	0,78
Egypt Air						
	106	MSR3xxx meteo_weitz_90.00_15_50_15C	145190	65857	100%	0,82
	108	MSR5xxx meteo_weitz_90.00_15_50_15C	120152	54500	80%	0,82
	110	MSR7xxx meteo_weitz_90.00_15_50_15C	90114	40875	60%	0,82
Qatar Air						
	114	QTR3xxx meteo_weitz_90.00_15_50_15C	145190	65857	100%	0,74
	116	QTR5xxx meteo_weitz_90.00_15_50_15C	120152	54500	80%	0,74
	118	QTR7xxx meteo_weitz_90.00_15_50_15C	90114	40875	60%	0,74
Blue Wings						
	120	BWG3xxx meteo_weitz_90.00_15_50_0C	145190	65857	100%	0,78
	122	BWG5xxx meteo_weitz_90.00_15_50_0C	120152	54500	80%	0,78
	124	BWG7xxx meteo_weitz_90.00_15_50_0C	90114	40875	60%	0,78
Condor						
	126	CFG3xxx meteo_weitz_90.00_25_60_15C	145190	65857	100%	0,82
	128	CFG5xxx meteo_weitz_90.00_25_60_15C	120152	54500	80%	0,82
	130	CFG7xxx meteo_weitz_90.00_25_60_15C	90114	40875	60%	0,82
Eurowings						
	132	EWG3xxx meteo_weitz_180.00_15_50_15C	145190	65857	100%	0,74
	134	EWG5xxx meteo_weitz_180.00_15_50_15C	120152	54500	80%	0,74
	136	EWG7xxx meteo_weitz_180.00_15_50_15C	90114	40875	60%	0,74

**Abbildung A.5.:** Die Parametervariationen Wind und Temperatur

## A.3. Auswertungsergebnisse

### A.3.1. Ablauf von Auswertungsläufen



**Abbildung A.6.:** Arbeitsschritte bei der Analyse von Trajektorienabweichungen



## Literatur

- [1] EUROCONTROL Long-Term Forecast: IFR Flight Movements 2010-2030. Techn. Ber. Eurocontrol, 2010.
- [2] Aimee Turner. *Environment Special Report: Precision Approach*. Techn. Ber. Flight International Magazine, London, 2009.
- [3] Alexander Scharnweber und Sebastian Schier. *A unified flight phase and event model for the analysis of heterogeneous ATM simulations*. Techn. Ber. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Braunschweig, 2011.
- [4] *Luftfahrthandbuch (AIP)*. Techn. Ber. Deutsche Flugsicherung, 2012.
- [5] Performance Review Commission. *Report on Complexity Metrics for ANSP Benchmarking Analysis*. Techn. Ber. Eurocontrol, 2006.
- [6] Wolfgang Bretl. *Kapazitätsplanung in der DFS Kontrollzentrale Karlsruhe*. Techn. Ber. Deutsche Flugsicherung, 2012.
- [7] Jesper Bronsvort, Greg McDonald, Robert Porteous u. a. *Study of Aircraft Derived Temporal Prediction Accuracy using FANS*. Techn. Ber. Airservices Australia, 2009.
- [8] David Knorr und Leif Walter. *Trajectory Uncertainty and the Impact on Sector Complexity and Workload*. Techn. Ber. Federal Aviation Administration (FAA) und Deutsche Flugsicherung GmbH, 2011.
- [9] U. Büchner, B. Czerlitzki, H. Hansen u. a. *Entwicklungsstatus von boden- und bordseitigen Systemen und von operationellen ATM-Verfahren und Konzepten für ein kooperatives ATM*. Techn. Ber. Airbus Deutschland GmbH, TU Darmstadt, DLR, 2010.
- [10] C. Fichter, S. Marquart, R. Sausen u. a. *The impact of cruise altitude on contrails and related radiative forcing*. Techn. Ber. Meteorologische Zeitschrift, 2005.
- [11] *Long-Term and Innovative Research, WP-E Thematic Programme*. Techn. Ber. SESAR (Single European Sky ATM Research), Joint Undertaking, 2012.
- [12] Stephane Mondoloni, Sipke Swierstra und Mike Paglione. *Assessing trajectory prediction performance - metrics definition*. Techn. Ber. CSSI Inc., Eurocontrol HQ und FAA WJHTC, 2005.
- [13] *Aeronautical Information Services, Annex 15*. Techn. Ber. International Civil Aviation Organization, 2010.
- [14] Heinrich Mensen. *Moderne Flugsicherung - Organisation, Verfahren, Technik*. Springer-Verlag, 2004. ISBN: 3-540-20581-0.
- [15] Maria Consiglio, Sherwood Hoadley und Danette Allen. *Estimation of Separation Buffers for Wind-Prediction Error in an Airborne Separation Assistance System*. Techn. Ber. NASA Langley Research Center, Hampton, 2009.
- [16] Bill Gill und Bob Maddock. *Prediction of Optimal 4D Trajectories in the Presence of Time and Altitude Constraints*. Techn. Ber. Eurocontrol/Phare, 1997.

- [17] *Initial 4D - Flying a new dimension*. Techn. Ber. SESAR Joint Undertaking (Eurocontrol), 2012.
- [18] Constantine Tamvaclis. *Use of Aircraft Derived Data for More Efficient ATM Operations*. Techn. Ber. Eurocontrol Experimental Centre, 2004.
- [19] *Innovatives Anflugverfahren - Point Merge*. Techn. Ber. Deutsche Flugsicherung GmbH, Langen, 2011.
- [20] Bernd Korn und Alexander Kuenz. *Advanced Flight Management System erlaubt Flugführung in 4D - Wegweiser durch Raum und Zeit*. Techn. Ber. DLR - Institut für Flugführung, 2011.
- [21] Peter Ahlers. *SESAR Enterprise Architecture and Target Concept*. Techn. Ber. Deutsche Flugsicherung, TU Darmstadt, 2009.
- [22] Bernd Korn, Hartmut Helmke und Andreas Kuenz. *4D-Trajectory Management in the Extended TMA: Coupling AMAN and 4D-FMS for Optimized Approach Trajectories*. Techn. Ber. DLR, Germany/CAS 2006, 2006.
- [23] Marco Temme und Dietmar Böhme. *ATM-Technik in Gegenwart und Zukunft*. Techn. Ber. DLR, Institut für Flugführung, 2008.
- [24] Christiane Edinger. *Traffic Simulator*. Techn. Ber. Institut für Flugführung, DLR Braunschweig, 2009.
- [25] D. Poles. *Base of Aircraft Data (BADA) Aircraft Performance Modelling Report*. Techn. Ber. Eurocontrol Experimental Centre, 2009.
- [26] Alex Pang. *Visualizing Uncertainty in Geo-spatial Data*. Techn. Ber. University of California, Santa Cruz, 2001.
- [27] Jinwhan Kim, Karthik Palaniappan und Jane Thipphavong. *Trajectory Uncertainty Modeling for Queueing Analysis of the National Airspace System*. Techn. Ber. NASA Ames Research Center, Moffett Field, 2004.
- [28] *Meteorological Service for International Air Navigation, Annex 3*. Techn. Ber. International Civil Aviation Organization, 2007.
- [29] *Instrument Procedures Handbook*. Techn. Ber. Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation, 2007.
- [30] Walter Shawlee. *RNP: The World of Required Navigation Performance*. Techn. Ber. Avionics News, Aircraft Electronics Association, 2008.
- [31] K. Tysen Mueller, John A. Sorensen und George J. Couluris. *Strategic Aircraft Trajectory Prediction Uncertainty and Statistical Sector Traffic Load Modeling*. Techn. Ber. AIAA Guidance, Navigation, Control Conference und Exhibit, Monterey, USA, 2002.
- [32] Craig Wanke, Michael Callaham, Daniel Greenbaum u. a. *Measuring Uncertainty in Airspace Demand Predictions for Traffic Flow Management Applications*. Techn. Ber. The MITRE Corporation Center for Advanced Aviation System Development, McLean, USA, 2003.

- [33] Craig Wanke, Sandeep Mulgrund, Daniel Greenbaum u. a. *Modeling Traffic Prediction Uncertainty for Traffic Management Decision Support*. Techn. Ber. The MITRE Corporation Center for Advanced Aviation System Development, McLean, USA, 2004.
- [34] William Wong, Stephen Gaukrodger, Fan Han u. a. *3D-in-2D Displays: Disruptive Technologies for Future Design*. Techn. Ber. EUROCONTROL Experimental Centre, France, 2009.
- [35] Will Schroeder, Ken Martin und Bill Lorensen. *The Visualization Toolkit: An Object-Oriented Approach to 3D Graphics*. Techn. Ber. 2006.
- [36] Henning Griethe und Heidrun Schumann. *Visualizing Uncertainty for Improved Decision Making*. Techn. Ber. University of Rostock, Chair of Computer Graphics, 2006.
- [37] Judi Thomson, Beth Hetzler, Alan MacEachren u. a. *A Typology for Visualizing Uncertainty*. Techn. Ber. Battelle Memorial Institute, Penn State University, 2005.
- [38] Barbara P. Buttenfield und John H. Ganter. *Visualization and GIS: What should we see? what might we see?* Techn. Ber. 4th International Symposium on Spatial Data Handling, 1990.
- [39] Space Weather Prediction Center. *Conditional Quantile*. CTAN: [http : / / www . swpc . noaa . gov / forecast \\_ verification / Assets / F10 / F10QuantilePlot.html](http://www.swpc.noaa.gov/forecast_verification/Assets/F10/F10QuantilePlot.html). 2011.
- [40] Melanie Kunz, Christophe Lienert und Lorenz Hurni. *Uncertainty Visualization in Hazard Maps for Consistent Decision Making*. Techn. Ber. Institute of Cartography, Zürich, 2009.
- [41] Alan MacEachen, Anthony Robinson, Susan Hopper u. a. *Visualizing Geospatial Information Uncertainty: What We Know and What We Need to Know*. Techn. Ber. GeoVISTA Center und Department of Geography, Penn State University, 2005.
- [42] Alexander Scharnweber und Sebastian Schier. *Extensible Workflow Management for Simulations (EWMS)*. Techn. Ber. Institut für Flugführung, DLR Braunschweig, 2010.
- [43] Mike Paglione und Robert Oaks. *Implementation and Metrics for a Trajectory Prediction Validation Methodology*. Techn. Ber. William J. Hughes Technical Center, Atlantic City International Airport, 2007.
- [44] Jose Garcia-Chico, Robert Vivona und Karen Cate. *Direct and Inverse Solutions of Geodesics on the Ellipsoid with application of nested equations*. Techn. Ber. American Institute of Aeronautics und Astronautics,
- [45] *ERASMUS – Air Trajectory Prediction*. Techn. Ber. Eurocontrol, 2004.
- [46] Rhonda Slattery und Yiyuan Zhao. *Trajectory Synthesis for Air Traffic Automation*. Techn. Ber. NASA Ames Research Center, University of Minnesota, 1997.
- [47] Arno Gerretsen und Sip Swiestra. *Sensitivity of aircraft performance to variability of input data*. Techn. Ber. Eurocontrol, 2003.
- [48] Hans Günther Bigalke. *Kugelgeometrie*. Otto Salle Verlag, Frankfurt am Main, 1984. ISBN: 3-7935-5530-5.

- [49] Gerhard Hüttig. *Flugplanung*. Techn. Ber. Technische Universität Berlin, Vorlesung, 2005.
- [50] Thaddeus Vincenty. *Direct and Inverse Solutions of Geodesics on the Ellipsoid with application of nested equations*. Techn. Ber. Ministry of Overseas Development, 1975.
- [51] David Thipphavong. *Analysis of Climb Trajectory Modeling for Separation Assurance Automation*. Techn. Ber. NASA Ames Research Center, 2009.
- [52] *Aircraft Performance Monitoring*. Techn. Ber. Flight Operations Support & Line Assistance, Airbus, 2002.
- [53] Ken Brodlie, Lesley Carpenter, Rae Earnshaw u. a. *Scientific Visualization: Techniques and Applications*. Springer Verlag, Berlin, 1992. ISBN: 3-5405-4565-4.
- [54] Andrew Foulks und Daniel Bergeron. *Uncertainty Visualization in the Vislt Visualization Environment*. Techn. Ber. Computer Science Dept., University of New Hampshire, 2006.
- [55] Frank Bowman. *Introduction to Elliptic Functions, with Applications*. Techn. Ber. 1961.