

Flugroutenmodellierung bei Gewitter

Der Fakultät für Mathematik und Physik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades

Doktorin der Naturwissenschaften

- Dr. rer. nat. -

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Met. Ludmila Sakiew

2016

Referent: Prof. Dr. Thomas Hauf
Korreferent: Prof. Dr. Dieter Etling
Prüfungsvorsitz: Prof. Dr. Uwe Morgner
Tag der Promotion: 31.05.2016

Eidesstattliche Erklärungen

Eidesstattliche Erklärungen zum Promotionsverfahren

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich meine Dissertation selbstständig verfasst habe und die benutzten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben sind. Darüber hinaus erkläre ich an Eides statt, dass die von mir verfasste Dissertation nicht zuvor als Diplomarbeit oder ähnliche Prüfungsarbeit verwendet wurde.

Declaration in Lieu of Oath

I hereby certify that the work presented in this dissertation is my original work and that all passages and ideas that are not mine have been fully and properly acknowledged. In addition I certify that this dissertation has never been used as diploma thesis or a similar work before.

Hannover, January 1st, 2016

Ludmila Sakiew

Kurzfassung

Der rasante Anstieg des Flugverkehrs über Europa in den letzten Jahrzehnten zeigt, wie erfolgreich Flugverkehrsmanagement und Flugsicherung die Mehrbelastung durch steigendes Verkehrsaufkommen absorbieren konnten. Diese Tatsache beruht auf der kontinuierlichen Weiterentwicklung nicht nur des Flugverkehrsmanagements sondern ganz allgemein der gesamten Flugverkehrsgemeinschaft im Bereich der Sicherheit und der Effizienz. Zu den zukunftsorientierten Schlüsselementen zur Steuerung und Optimierung des Flugaufkommens gehören die Modelle zur Flugverkehrssimulation. Solche Modelle sind in der Lage, rechtzeitig Konflikte zwischen Flugzeugen untereinander sowie zwischen Flugzeug und der Topographie zu erkennen und eine sichere und effiziente Alternative vorzuschlagen. Konflikte mit Schlecht-Wetter-Ereignissen wie zum Beispiel einem Gewitter werden jedoch von den meisten Modellen gegenwärtig noch nicht berücksichtigt.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Simulation der Flugtrajektorien bei Gewitter. Ein Algorithmus mit dem Namen DIVMET, der in der Lage ist, eine horizontale Ausweichroute zwischen zwei Positionen A und B durch eine beliebige Anordnung von Gewittern zu berechnen, wird entwickelt. Der Entwicklung gehen sowohl die Aufbereitung meteorologischer Informationen aus Radarbildern zu Risikogebieten, die von Flugzeugen gemieden werden sollen, als auch die Festlegung von geeigneten Simulationsparameter voraus. Die Risikogebiete werden durch Vergrößerung eines Gewitterpolygons um einen gewählten Sicherheitsabstand und das anschließende Platzieren einer konvexen Hülle um das vergrößerte Objekt erzeugt. Die Simulationsparameter Sichtfeld und Sicherheitsabstand dienen einer realitätsnahen Abbildung der Entscheidungsfindung bei Gewitterkonflikten sowohl aus der Sicht eines Flugzeugführers im Cockpit als auch eines Fluglotsen im Kontrollzentrum. Das Potential von DIVMET als ein Unterstützungsprogramm für Fluglotsen wird durch Validierung des Modells anhand der Daten realer Flugtrajektorien bei Gewitter analysiert.

Neben der selbständigen Anwendung von DIVMET zur Berechnung einer effizienten und sicheren Ausweichtrajektorie bei Gewitter erlaubt die Algorithmusstruktur auch eine Kopplung an eine Flugverkehrssimulation wie NAVSIM. Eine solche Kopplung erweitert die Einsatzmöglichkeiten beider Modelle und ermöglicht die Untersuchung komplexer Aufgabenstellungen wie zum Beispiel die Berechnung der Flugzeugdichteveränderung in einem Luftraumsektor bei Gewitter. Ferner eignet sich DIVMET auch für Konflikterkennung und Konfliktlösung bei anderen Schlechtwetterereignissen wie etwa Vereisungsgebiete, Klarluftturbulenzen oder bei weiteren Luftraumobjekten wie Weltraumschrott, Militärgelände und Topographie.

Schlagwörter: Flugverkehr, Gewitter, Ausweichtrajektorie, Sicherheit und Effizienz, Risikogebiete, konvexe Hülle, Sicherheitsabstand, Sichtfeld, Kopplung an NAVSIM

Abstract

Flight trajectories modeling in the presence of thunderstorms

The rapid growth of air traffic over Europe in recent decades showed how successful the Air Traffic Management and the Air Traffic Control could absorb the additional burden of the additional traffic. This fact relies on the continuous development not only of the air traffic management but in general the whole aviation community in the field of safety and efficiency. Forward-looking key elements for controlling the current air traffic and its optimisations include the air traffic simulation models. Such models are capable to identify in time conflicts between aircraft and aircraft and topography, and propose a secure and efficient alternative. Conflicts with bad weather events such as a thunderstorm are currently not resolved by most models.

This thesis deals with the simulation of flight trajectories in presence of thunderstorms. An algorithm named DIVMET is developed to calculate a route between two horizontal positions A and B by any arrangement of thunderstorms. The development precedes as well a processing of meteorological information from radar images in form of risk areas, that should be avoided by aircraft, as the definition of the simulation parameters. The risk areas are generated as a result of enlargement of a thunderstorm polygon to the selected safety distance and placing a convex hull around the enlarged object. The simulation parameters field of view and safety distance to a thunderstorm serve a realistic picture of the decision process during a thunderstorm conflict both from the perspective of a pilot's cockpit, as well as of an air traffic controller in the control center. The potential of DIVMET as a support program for air traffic controllers is analysed by the validation of the model using data of real flight trajectories in the presence of thunderstorms.

In addition to the independent application of DIVMET to calculate an efficient and secure deviation route during a thunderstorm, the structure of the algorithm allows a coupling to an air traffic simulation model as NAVSIM. The coupling extends the individual object spectra of the two models and allows investigation of complex tasks as for example the calculation of the change in density of aircraft in an airspace sector during thunderstorms. Furthermore, DIVMET is also suitable for conflict detection and resolution of other adverse weather events such as ice fields, clear air turbulence or other air space objects like space junk, military sites and topography.

Keywords: Air traffic, thunderstorm, deviation route, safety and efficiency, risk areas, convex hull, safety distance, field of view, coupling to NAVSIM

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Gewitter im Flugverkehr	5
2.1 Gewitter	5
2.1.1 Entstehung von Gewittern	5
2.1.2 Die Gewittertypen und ihre Gefahren für Luftfahrzeuge	7
2.1.3 Generierung von Wetterpolygonen	15
2.1.4 Gewittererkennung im Cockpit	18
2.2 Gewitter und Flugverkehrsmanagement	21
2.2.1 Flugvorbereitung	21
2.2.2 Flugüberwachung durch die Flugsicherung	25
2.2.3 Gewitter auf geplanter Flugroute	28
2.2.4 Gewitterbezogene Trajektorienänderung	28
2.2.5 Ungünstige Wetterbedingungen als Verspätungsursache	30
2.2.6 Zukünftiges Luftverkehrsmanagement	32
2.3 Ausweichalgorithmen und ihre Anwendung	34
3 Modell DIVMET	43
3.1 Aufbau von DIVMET	44
3.1.1 Wetterobjekte	46
3.1.2 Simulationsparameter	47
3.1.3 Fallbezogene Simulationsparameterstudie	53
3.1.4 Berechnung von Risikogebieten	56
3.1.5 Die Gedächtnisfunktion	62
3.1.6 Konflikterkennung	63
3.2 Ausweichtrajektorie in MET2ROUTE	64
3.2.1 Ausweichrichtung	65
3.2.2 Ausweichroute für ein Risikogebiet	68
3.2.3 Ausweichroute für zwei Risikogebiete	71
3.2.4 Gekrümmter Routenverlauf	74
3.2.5 Weiterentwicklung von MET2ROUTE	77
4 Anwendungsbereiche von DIVMET	89
4.1 Validierung von DIVMET	89
4.2 DIVMET-NAVSIM Kommunikation	100
4.3 Sektorbelastungsstudie	101
5 Zusammenfassung und Ausblick	105

6 Anhang	109
6.1 Berechnung von Positionen auf Kreisbögen	109
6.2 Algorithmus <i>Graham's Scan</i>	110
6.3 Standardkurvenflug	111
6.4 DIVMET-NAVSIM Datentransfer	112
6.5 Tunnelflug	114
6.6 Beispiele für Berechnungen einer Ausweichroute mit MET2ROUTE ₂	116
6.7 Programmablaufplan von MET2ROUTE	120
6.8 Programmablaufplan von MET2ROUTE ₂	121
Appendix	109
Abbildungsverzeichnis	123
Tabellenverzeichnis	125
Literaturverzeichnis	127
Lebenslauf	135
Veröffentlichungen	137

1

Einleitung

Gewitter gehören zu den gefährlichsten meteorologischen Erscheinungen für den Flugverkehr. Da sie häufig von Turbulenzen, Starkniederschlag, Sichtreduzierung, Blitzen, Vereisung und Hagel begleitet werden, sollen Gewitter von Flugzeugen gemieden werden [1]. Insbesondere sind Gewittererscheinungen Flughindernisse mit variabler Lebensdauer und Ausdehnung. Ihr Lebenszyklus weist eine Bandbreite von mehreren Minuten für eine kleine konvektive Zelle bis zu mehreren Stunden für Gewitterlinien (engl. *squall lines*) auf. Die Zuordnung, Verfolgung und damit die Bestimmung des Gefahrenpotentials für den Flugverkehr erfolgen mit Hilfe von Fernerkundungsmessgeräten wie Bodenwetterradaren, Satelliten und Blitzmessnetzen. Zusätzlich zur Darstellung aktueller Gewitteraktivitäten dienen die gewonnenen Beobachtungsdaten in Kombination mit numerischen Modellen für die Erstellung taktischer Programme zur Gewitterwarnung im Flugverkehr. In den USA wurde ein solches Programm mit dem Namen *Integrated Terminal Weather System* (ITWS) am Lincoln Laboratory vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelt und erfolgreich an elf Flughäfen umgesetzt [2]. Als Pendant für Deutschland liefern die vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelten Algorithmen *Rad-Tram* und *Cb-Tram* ebenfalls Gewitterinformationen speziell für den Flugverkehr [3]. Der Vorteil solcher Algorithmen liegt in ihrer nutzerorientierten Darstellung: Gewitter werden auf gefährliche Luftraumbereiche reduziert und graphisch als Wetterobjekte, zum Beispiel in Form von Polygonen in 2D oder als Zylindersäulen in 3D, dargestellt [4].

Auch im Cockpit sollen diese Programme in Zukunft verfügbar sein. Bis es soweit ist, stehen dem Piloten ausschließlich On-board-Messgeräte zur Erfassung von Schlechtwettergebieten zur Verfügung. Mit einem Bordwetterradar und einem Blitzmessgerät (*Stormscope*) ausgestattet, können Piloten durch ein Gewitterfeld taktisch manövrieren. Eine strategische

Routenplanung auch während des Fluges könnte durch die Verfügbarkeit aktueller Radarkompositbilder im Cockpit realisiert werden [1]. Aus diesen Radarkompositbildern könnten die Wetterhindernisse als zweidimensionale Polygone auf einem Flugniveau extrahiert werden. Solche Schlechtwetterpolygone sollen mit einem vorgeschriebenen Sicherheitsabstand gemieden werden. Für Gewitter ist dieser Sicherheitsabstand von der Flughöhe abhängig und beträgt mindestens 10 bis 20 NM für das laterale Umfliegen [1]. Untersuchungen von realen Ausweichtrajektorien in den USA zeigen, dass sich der beobachtete Sicherheitsabstand nicht um einen festen Wert konzentriert, sondern eine ausgeprägte Verteilung darstellt. Insbesondere ist diese Verteilung stärker als erwartet durch den Faktor *Mensch* mit seiner Erfahrung und Persönlichkeit geprägt [5]. Auf ein erkanntes Gewitterhindernis folgt im Allgemeinen die Suche nach einer geeigneten Ausweichroute. Dem Piloten könnte dabei ein zuständiger Fluglotse eine Hilfestellung geben, insbesondere wenn dem Fluglotsen mehr Informationen über die aktuelle Wetterlage vorliegen [1]. Eine solche Hilfestellung könnte auch durch einen automatisch berechneten Ausweichroutenvorschlag realisiert werden, welcher eine sichere und effiziente Flugroute durch ein Gewitterfeld liefert.

Motivation

Einen Bedarf für ein Unterstützungsprogramm für Fluglotsen zur Abschätzung, wie ein Flug bei Gewitter ausweicht und wann er an einem bestimmten Punkt ankommt, signalisierte der Wetterdienst in Hongkong (*Hong Kong Observatory*). Die Fluglotsen am *Hong Kong International Airport*, dem zweitgrößten Flughafen Chinas, müssen täglich knapp 1100 Flüge von mehr als 100 Fluggesellschaften koordinieren [6]. Die Kapazität des Flughafens geht signifikant zurück, wenn einer von etwa sechs jährlichen tropischen Wirbelstürmen das Gebiet um Hongkong durchquert [7]. Zusätzlich sorgen Tiefdruckgebiete und der Südwest-Monsun während der Sommermonate für viele Gewitter und tropische *squall lines* [8]. Im Durchschnitt werden in Hongkong an mehr als 33 Tagen im Jahr Gewitteraktivitäten beobachtet. An solchen Tagen, bei Gewitter, geht die Kapazität des Flughafens ebenfalls signifikant zurück, ggf. muss der Flughafenbetrieb am Boden eingestellt werden. Ankommende Flüge können dann meistens noch landen, werden aber nicht gleich abgefertigt [9]. Im Resultat kommt es zu Verspätungen, die sich wiederum auf weitere Flüge ausbreiten. In den USA zum Beispiel stellt Schlechtwetter den Primärgrund für Verspätungen im Flugverkehr dar [10]. In Europa sind 40 % bis 50 % aller Verspätungen auf das Wetter zurückzuführen [11]. Diese Zahlen weisen auf einen Optimierungsbedarf des Flugverkehrsmanagements bei Schlechtwetter hin.

Eine Möglichkeit der Optimierung wäre die Unterstützung der Fluglotsen im Anflugbereich des *Hong Kong International Airport* nicht nur mit aktuellen Gewitterwarnungen, sondern auch durch einen Algorithmus zur Ausweichroutenberechnung bei Gewitter.

Ziele

Der zu entwickelnde Unterstützungsalgorithmus soll im Zweidimensionalen, zum Beispiel in einem Flugniveau, eine laterale Ausweichtrajektorie um eine beliebige Anzahl und Anordnung von Gewittern berechnen. Die Abbildung einer realitätsnahen und für Passagierflugzeuge fliegbareren Ausweichroute steht dabei im Vordergrund. Folgende Kriterien soll der Algorithmus erfüllen:

- Eine Ausweichroute soll auf Grundlage der im Cockpit vorhandenen Wetterinformationen aus Pilotensicht berechnet werden.
- Für die Routenoptimierung sollen alle verfügbaren Gewitterinformationen, zum Beispiel aus Wetterradarkomposit- oder Satellitenbildern, herangezogen werden.
- Die Kalkulation der Ausweichroute soll schnell erfolgen.
- Die Simulationsergebnisse müssen graphisch für Fluglotsen und Piloten verständlich aufgearbeitet sein.
- Der Algorithmus muss eine Struktur aufweisen, die sowohl selbständige Resultate erzielt als auch eine Kopplung an ein globales Flugverkehrssimulationsmodell ermöglicht.
- Schließlich soll der Algorithmus in der Lage sein, auch andere Schlechtwetterereignisse wie etwa Vereisungsgebiete, Klarluftturbulenzen (engl. *clear-air turbulence*, CAT) oder weitere Luftraumobjekte mit bekannter Ausdehnung wie Militärgebiete, Weltraumschrott und Topographie zu behandeln.

Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Algorithmus, der die oben genannten Bedingungen erfüllt. Das Resultat, ein Modell mit dem Namen DIVMET (engl. *divert meteorology*), wird in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

Gliederung

Bekannterweise brauchen komplexe Probleme nicht immer eine komplexe Lösung. In dieser Arbeit wurde eine relativ einfache Lösung für die Berechnung einer sicheren und effizienten Flugroute bei Gewitter gefunden. Der Algorithmus basiert auf dem aktuellen Wissensstand über das Zusammenspiel zweier komplexer Systeme – Flugverkehr und Wetter. Dieses Zusammenspiel wird in Kapitel 2 erläutert. Darauffolgend werden im 3. Kapitel die Bausteine des DIVMET-Modells mit Hilfe von Beispielen präsentiert. Die Qualität dieses Unterstützungsalgorithmus wird durch eine qualitative Validierung untersucht. Dafür werden unter bestimmten Annahmen simulierte und real geflogene Ausweichtrajektorien im Anflugbereich auf den *Hong Kong International Airport* miteinander verglichen und in Kapitel 4 ausgewertet. Neben der Anwendung von DIVMET als ein selbständiger Unterstützungsalgorithmus für Fluglotsen oder Piloten kann eine Kopplung an ein globales Flugverkehrssimulationsmodell wie zum Beispiel NAVSIM (engl. *navigation simulation*) den Anwendungsbereich beider einzelner Modelle vergrößern. Aktuelle Forschungsthemen, wie zum Beispiel die Berechnung der Zusatzbelastung von Luftraumsektoren bei Gewitter, können damit behandelt werden. Die Umsetzung einer solchen Kopplung und die ersten Ergebnisse zur Sektorbelastungsstudie werden in Kapitel 4 vorgestellt. Abschließend erfolgt in Kapitel 5 die Diskussion der Ergebnisse dieser Arbeit.

Gewitter im Flugverkehr

Die Simulation sicherer Flugrouten bei Gewitter ist komplex und gewinnt mit fortlaufender Zunahme der jährlichen Flugbewegungen stetig an Bedeutung. Daher beginnt diese Arbeit mit einem Einblick in die Thematik “Gewitter im Flugverkehr“. Eingeleitet mit einer meteorologischen Beschreibung unterschiedlicher Gewittersysteme, ihrer Gefahren für Flugzeugbewegungen sowie moderner Methoden der Gewittervorhersage umreißt dieses Kapitel im weiteren Verlauf die Regulierungsmethoden eines Flugverlaufs bei Gewitter aus Sicht verschiedener Teilnehmer der Fluggemeinschaft. Bei der Beschreibung des Zusammenwirkens beider Systeme, Gewitter und Flugverkehr, richtet sich der Fokus auf Möglichkeiten, die Gesamtkomplexität zu reduzieren. Die Vereinfachung stellt einen unerlässlichen Schritt dar, um Flugtrajektorien bei Gewitter mit einer Reihe von unbekanntem Parametern in einer Simulation untersuchen zu können.

2.1 Gewitter

2.1.1 Entstehung von Gewittern

Gewitter sind vertikal mächtige Cumulonimbuswolken (Cb), die über hinreichend große Mengen an Wasserdampf, Flüssigwasser und Eiskristalle verfügen. Die Entstehung dieser bergförmigen Wolkenart wird in der Meteorologie mit der Parcel-Methode beschrieben. Dabei ist ein Parcel ein theoretisches Hilfsmittel zur Beschreibung eines Luftvolumens, das zum einen hinreichend groß ist, um anhand von Zustandsgrößen wie Temperatur, Druck, Dichte und Luftfeuchtigkeit beschrieben werden zu können, und zum anderen mathematisch infinitesimal klein ist.

Für eine Gewitterentwicklung sind zwei Faktoren unerlässlich. Zunächst bedarf es eines starken vertikalen Temperaturgradienten, welcher das Parcel vom Boden aus in die großen Höhen befördern kann. Zum Beispiel kann ein warmer Boden ein Parcel zum Aufsteigen bringen und eine kältere Umgebungsluft in der Höhe einen weiteren Aufstieg begünstigen. In diesem Zustand ist die Atmosphäre bedingt labil. Zweitens muss ein Parcel beim Aufsteigen genug Feuchtigkeit für Kondensation enthalten und damit erst die Wolkenbildung ermöglichen. Da das Mischungsverhältnis im Parcel bis zum Erreichen des Kondensationsniveaus konstant bleibt, muss die Feuchte in der Grenzschicht, dem unteren Atmosphärenniveau, in ausreichender Menge vorhanden sein. Labilität und Feuchte bilden ein Reservoir an potentieller Energie für eine Vertikalbewegung, genannt Konvektion. Diese potentielle Energie (engl. *Convective Available Potential Energy*, CAPE) kann durch einen Auslösemechanismus freigesetzt werden. Dabei kann der Auslösemechanismus freier oder erzwungener Natur sein. Bei der freien Konvektion findet häufig eine differentielle Aufheizungen des Erdbodens statt, zum Beispiel infolge einer Variation der Albedowerte. Die letztere entsteht durch lokale Unterschiede in der Bodenart, der vorhandenen Vegetation oder der Bodenfeuchte und kann komplexe Windsysteme wie die Land-See-Zirkulation auslösen. Auch eine bereits vorhandene Bewölkung kann eine strahlungsbedingte thermische Hebung und damit die freie Konvektion in Gang setzen. Im Gegensatz zur freien Konvektion ist bei erzwungener Konvektion ein äußerer Antrieb erforderlich. Ein orographisches Hindernis zum Beispiel kann ein horizontal angetriebenes Parcel zum Aufsteigen zwingen. Auch bei Querkirkulationen oder im Fall einer bodennahen Konvergenzlinie, bei der Luft zusammenströmt, findet häufig eine erzwungene Konvektion statt.

Steigt ein Parcel infolge erzwungener Hebung auf, kühlt sich die Luft trockenadiabatisch, das heißt ohne Austausch von Feuchte und Wärme, um 1 K pro 100 m ab. Bei der Abkühlung steigt die relative Feuchte an und erreicht die Sättigung beim so genannten Hebungs-kondensationsniveau (engl. *lifting condensation level*, LCL). Dieses Niveau markiert die Wolkenuntergrenze. Ein Analogon für freie Konvektion heißt Cumuluskondensationsniveau (engl. *Convective Condensation Level*, CCL) und die zugehörige Wolkenart wird als Cumulus bezeichnet. Ab dem LCL- oder CCL-Niveau erfolgt der weitere Aufstieg des Parcels feuchtadia-batisch mit einer Abkühlung von 0,6 K pro 100 m. Dieser schwächere Abkühlungsgradient ist auf freigesetzte latente Wärme bei Kondensation zurückzuführen. Bleibt die Umgebungsluft weiterhin kälter als ein Parcel, kann der Aufstieg bis zur Tropopause reichen. Besonders mächtige Gewitterwolken schaffen es sogar, in die Tropopause einzudringen. In diesem Fall bildet sich am Auftriebsort eine kleine und kurzlebige Wolkenkuppel (engl. *overshooting top*), welche in den mittleren Breiten sogar ein Höhenniveau von über 12 km erreichen kann.

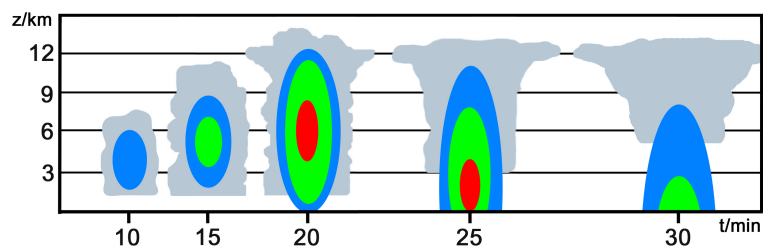
2.1.2 Die Gewittertypen und ihre Gefahren für Luftfahrzeuge

Die Stärke der Konvektion definiert die Stärke des Aufwindstromes. Welcher Gewittertyp, Einzel-, Multi- oder Superzelle, sich schließlich ausbildet, hängt hauptsächlich von der vertikalen Windscherung, der Änderung der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung mit der Höhe ab. Eine Nebenkategorie stellen selbsterhaltende Gewitterkomplexe, sogenannte mesoskalige konvektive Systeme (engl. *mesoscale convective systems*, MCS), dar.

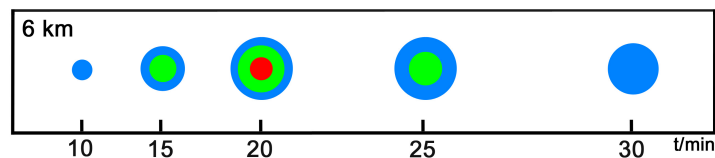
Einzelzelle

Einzelzellen sind allein auftretende Gewitter, die neben Fallböen, kleinkörnigem Hagel und Starkniederschlag auch schwache Tornados erzeugen können. Mit einer horizontalen Ausdehnung von 2 bis 8 km weisen Einzelzellen einen Tages- und Jahresgang auf. Die Tagesgangmaxima für Wärmegewitter während der Sommermonate liegen am Nachmittag und am Abend. Einzelzellen, die hinter einer Kaltfront auftreten, beobachtet man häufig in den frühen Morgenstunden. Obwohl der Lebenszyklus einer Einzelzelle selten die Zeitdauer von 30 bis 60 Minuten überschreitet, durchlaufen diese Gewittererscheinungen drei Entwicklungsphasen: Cumulus- und Reifestadium sowie die Dissipation, wie in Abbildung 2.1 dargestellt [12]. Im Cumulusstadium beschleunigen Auftriebskräfte feuchtwarme Luft mit einer Geschwindigkeit bis zu 30 m s^{-1} in die Höhe. Beim Erreichen des CCLs nimmt dieser konvektive Prozess die Form einer sichtbaren Wolke an. Die Wolke wächst weiter vertikal und überwindet schließlich die Null-Grad-Isotherme. In dieser Höhe bilden sich Eispartikel, es kommt zum Bereifen, zum Prozess des Anfrierens der unterkühlten Wassertropfen an Eispartikeln. Auch Vergraupelung infolge von Zusammenstößen von Eis und unterkühlten Wassertropfen findet statt. Schließlich kann der Aufwind die Gewichtskraft der angewachsenen Partikel der Größe von 0,1 bis 5 mm nicht mehr kompensieren, es kommt zum Niederschlag. Die Einzelzelle erreicht mit dem Einsetzen des Niederschlags ihr Reifestadium. Im Reifestadium induziert der Niederschlagsfall einen Abwind. Am Boden kann es zur Ausbildung einer heftigen Böenfront kommen, wie Abbildung 2.1(c) verdeutlicht. Die Verweildauer in jeder Phase lässt sich aus dem zeitabhängigen Vertikalschnitt einer Gewitterwolke in Abbildung 2.1(a) ablesen und beträgt etwa 10 Minuten. Zusätzlich wird in dieser Abbildung die Form der kleinen Wolkenelemente ergänzt, da die Umrisse einer Gewitterwolke nicht vom Rückstreuungssignal des Wetterradars erfasst werden. Aus diesen Wolkenelementen bildet sich im Reifestadium ein Amboss. Dort strömen die Luftmassen

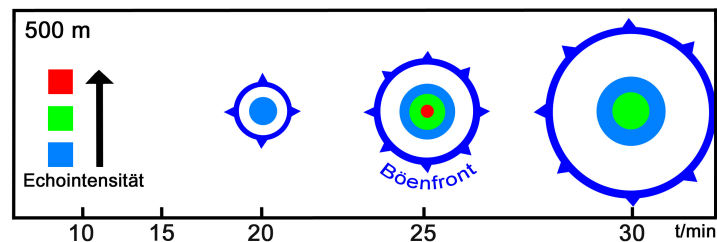
auseinander und markieren damit den Beginn der Tropopause. Die zeitabhängigen horizontalen Schnitte durch die Wolke in einer Höhe von 6 km, dargestellt in Abbildung 2.1(b), und in Bodennähe bei 500 m Höhe in Abbildung 2.1(c), vervollständigen die räumliche Echointensitätsverteilung in den drei Entwicklungsstadien einer Einzelzelle. Eine maximale vom Radar gemessene Reflexion (in Rot) ist bei 20 bis 25 Minuten nach der Wolkenentstehung zu beobachten. In dieser Dissipationsphase wird der Abwind immer dominanter und schneidet langsam die Zufuhr der feuchtwarmen Luft aus der Umgebung ab. Wenn diese Energiequelle erlischt, löst sich die Zelle auf.



(a) Vertikale Schnitte durch eine Einzelzelle in drei Entwicklungsstadien: Cumulus-, Reife- und Dissipationsphase.



(b) Horizontale Verteilung der Echointensität einer Einzelzelle in 6 km Höhe in drei Entwicklungsstadien.



(c) Bodennahe Echointensität einer Einzelzelle mit zugehöriger konzentrischer Propagation der Böenfront dargestellt in Blau.

Abbildung 2.1: Echointensität einer Einzelzelle in drei Entwicklungsstadien. Erstellt in Anlehnung an [13].

Für Luftfahrzeuge stellen Einzelzellen vor allem Gefahrenquellen in Form von Starkniederschlag, Hagel und Windböen dar. Mit Niederschlag in Form von Regen, Schnee und Hagel ist ein gravierender Sichtrückgang verbunden. Bei Schnee und unterkühltem Regen kann Flugzeugvereisung auftreten, also das Gefrieren von unterkühltem Wasser am Flugzeug. Das unterkühlte Wasser entsteht durch den Transport feuchter Luft in Höhen oberhalb der

Null-Grad-Isotherme durch starke Aufwinde einer Cumulonimbuswolke. Ab einer Höhe von über 10000 ft ist die Vereisungsgefahr daher gering. Drei Arten der Eisbildung unterscheidet man bei Flugzeugvereisung. Laufen große unterkühlte Wassertropfen beim Auftreffen auf die Flugzeugoberfläche auseinander, bildet sich das Klareis, welches durchsichtig ist und sich eng an die Flugzeugoberfläche anschmiegt. Gefrieren kleine unterkühlte Wassertropfen, bildet sich das Raueis. Dieses ist bröcklig und kann beim Abreißen das Flugzeug beschädigen. Auch eine Mischform aus beiden Eisarten wird beobachtet. Im Allgemeinen kann Vereisung zu einer Gewichtszunahme des Flugzeuges führen oder eine Änderung des Flügelprofils und einen damit verbundenen Strömungsabriss verursachen. Durch Vereisung können auch Pitotrohre, die zur Geschwindigkeitsmessung in Flugzeugen eingesetzt werden, oder Triebwerke beeinträchtigt werden [14].

Zusätzlich zu wegfliegenden Eispartikeln hat auch Hagel bei Einzelzellen und anderen Gewitterarten eine hohe Antreffwahrscheinlichkeit, die wiederum von der Flughöhe abhängig ist. Ein Luftfahrzeug auf einer Flughöhe bis 100 ft würde mit gleicher Wahrscheinlichkeit auf Hagel innerhalb einer Gewitterwolke sowie in ihrer unmittelbaren Umgebung, bis zu 2 NM, und unter ihr auftreffen. Im darüberliegenden Höhenbereich zwischen 100 und 200 ft befindet sich Hagel zu 60% innerhalb der Wolke und zu 40% unter dem Amboss. Bei noch größeren Flughöhen ist Hagel am ehesten innerhalb der Wolke zu finden [15]. In Mitteleuropa beträgt die mittlere Korngröße von Hagel etwa 1 cm. Unter Umständen kann Hagel auch faustgroß werden und mit einer Fallgeschwindigkeit von bis zu 30 m s^{-1} Luftfahrzeuge stark beschädigen [14].

Außerhalb von Gewitterwolken sind Turbulenzen unterhalb der Wolkenbasis und an den Seiten des Gewitters vorzufinden, wie Abbildung 2.2 andeutet. Oberhalb einer Gewitterwolke markiert die ausgefranzte Form der Amboss die vorhandenen Turbulenzen. Fliegt ein Luftfahrzeug auf eine Einzelzelle zu, erfährt es Turbulenz mit einem Gefahrenpotential, welches von *mäßig* bis *sehr schwer* variiert. Sehr schwerer Turbulenz unterliegt ein Flugzeug beim Durchfliegen eines Gewitters. Dabei ist es starker mechanischer Belastung ausgesetzt resultierend aus nebeneinanderliegenden Auf- und Abwindzonen mit sehr geringen Abständen von etwa 200 Metern zueinander [16]. Sehr schwere Turbulenzen sind sogar in der Lage, kleine Flugzeuge zu zerstören und größere Maschinen stark zu beschädigen. Turbulenzen innerhalb eines Gewitters sorgen für Kollisionen der Eispartikel untereinander und an unterkühlten Wassertropfen [17]. Es kommt zur Ladungstrennung, wobei der obere Wolkenrand überwiegend positiv geladen ist. Die unteren und mittleren Gewitterbereiche weisen eine vorwiegend negative Ladung auf [18]. Erreicht die elektrische Feldstärke Werte im Bereich von 1 MV m^{-1} [19], wird ein Plasmakanal induziert, über den frei bewegliche

Elektronen die Ladungstrennung ausgleichen. Ein Blitz wird sichtbar und auch hörbar, denn die explosionsartige Erhitzung und Ausdehnung der Luft erzeugen eine Druckwelle mit Propagationsgeschwindigkeit von Schallgeschwindigkeit, was als lauter Knall wahrgenommen wird (Donner).

Für Luftfahrzeuge in der Nähe steigt die Gefahr, von Blitzen getroffen zu werden. Blitzeinschläge verursachen aufgrund des Faradayschen Käfigs, den Flugzeuggeometrien aufweisen, in der Regel nur geringe Schäden. Jedoch können elektrische Messgeräte durch starke elektromagnetische Felder fehlerhafte Messdaten liefern. Ebenfalls können Luftfahrzeugführer während des Blitzeinschlags vom grellen Licht geblendet werden und kurzzeitig die Kontrolle über die Maschine verlieren. Das Risiko hierfür wird gesenkt, wenn der Pilot eine Sonnenschutzbrille trägt.

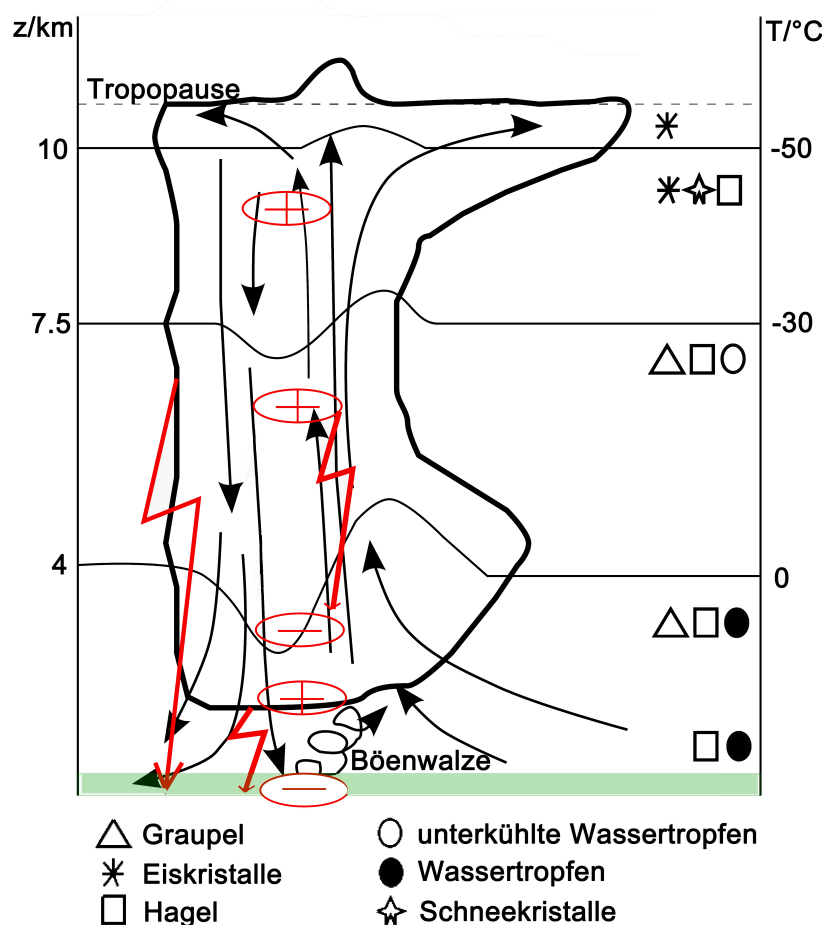


Abbildung 2.2: Durch Auf- und Abwinde innerhalb einer Einzelzelle kommt es zur höhenabhängigen Verteilung der Hydrometeore. Infolge starker Turbulenzen kollidieren Hydrometeore wie Eiskristalle und Wassertropfen miteinander, es kommt zur Ladungstrennung, welche durch Wolke-Boden-Blitze und Blitze innerhalb der Einzelzelle ausgeglichen wird. Erstellt in Anlehnung an [20] und [21].

Multizellen

Einzelzellen können sowohl vereinzelt auftreten als auch mit weiteren Einzelzellen ein komplexes Gewittersystem bilden, das als Multizelle bezeichnet wird. Multizellen besitzen eine Lebensdauer von mehreren Stunden und kommen am häufigsten vor. Während dieser Zeit entstehen innerhalb einer Multizelle in der Regel alle 5 bis 10 Minuten bis zu 30 neue Einzelzellen. Die Entstehung der Einzelzellen erfolgt vor der so genannten Böenfront (engl. *outflow boundary*) in dem Bereich, wo die kalte Gewitterluft auf die wärmere Umgebungsluft trifft. Die Lage der Böenfront zusammen mit verschiedenen Entwicklungsstadien der Einzelzellen innerhalb einer Multizelle sind in Abbildung 2.3 zu sehen.

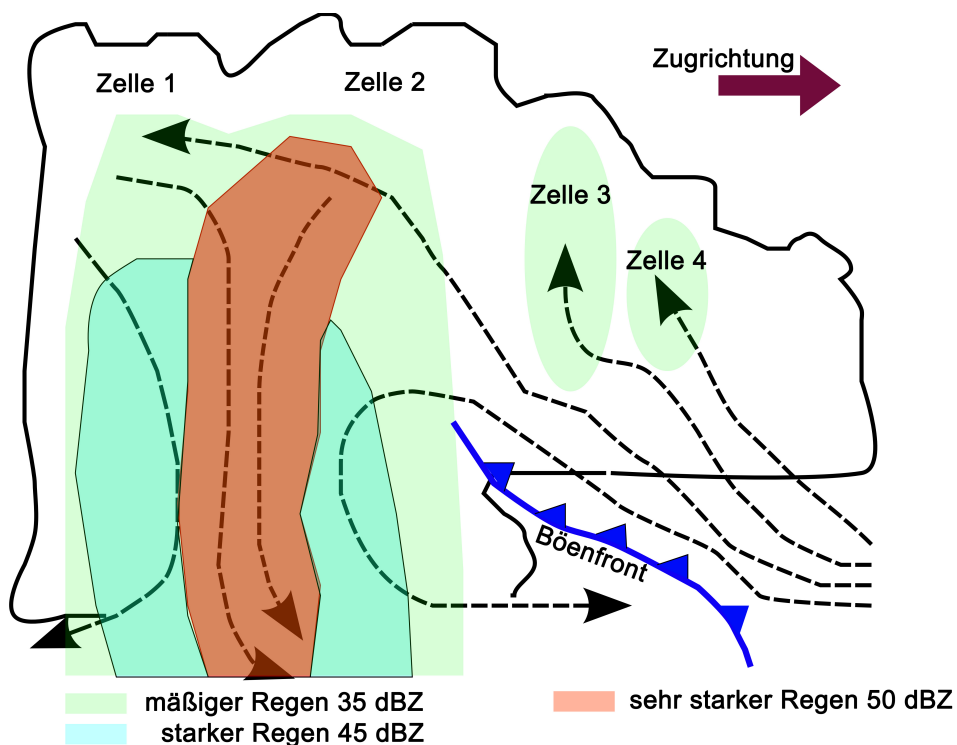


Abbildung 2.3: Im Vertikalschnitt einer Multizelle durchlaufen im Bereich vor der Böenfront entstehende Einzelzellen entgegen der Zugrichtung verschiedene Entwicklungsstadien. Starke Niederschläge und Hagel im Abwindbereich der Multizelle können Radarreflektivitätswerte von 50 dBZ aufweisen. Erstellt in Anlehnung an [22].

Die Entwicklungsrichtung der Einzelzellen verläuft entgegen der Gewitterzugrichtung, womit hier die jüngeren Zellen 4 und 3 an der Vorderseite der Multizelle zu finden sind. Die Zelle 2 hat ihre Entwicklungsphase bereits abgeschlossen und befindet sich in ihrem Reifestadium. Starke Niederschläge und Hagel markieren den Abwindbereich der Multizelle. Im Wetterradar können hier Radarreflektivitätswerte von 50 dBZ erreicht werden. Hinter der

Abwindzone nimmt der Einfluss des Aufwindes vor der Böenfront weiter ab. Die Energie zur Aufrechterhaltung der Einzelzellen ist in diesem Bereich unzureichend, ihr Lebenszyklus endet und die Multizelle erfährt hier ihre Grenze.

Nicht nur wegen ihrer komplexen Struktur, sondern auch wegen ihrer räumlichen Ausdehnung besitzen Multizellen im Vergleich zu Einzelzellen ein größeres Gefahrenpotential für Luftfahrzeuge. Wie auch bei Einzelzellen ist das Gefahrengebiet einer Multizelle nicht auf ihre Wolkenkontur beschränkt. Unterhalb der Multizellen sind Turbulenzen häufig mit Niederschlag und dem Fallwind (engl. *downdraft*, *downburst*) verbunden. Als Fallwind wird ein lokal abwärts gerichteter Luftstrom unterhalb des Gewitters bezeichnet, der in 300 ft Höhe über Grund eine höhere Geschwindigkeit als $3,6 \text{ ms}^{-1}$ aufweist [23]. Diese down-drafts verursachen gefährliche Böenfronten, die in alle Richtungen konzentrisch propagieren, und kehren dabei das vorhandene Windfeld, vor allem in seiner Längskomponente, um. Die longitudinale Umkehrung des Windfelds ist für Flugzeuge im Start- bzw. Landeanflug außerordentlich gefährlich. Bewegt sich ein Luftfahrzeug auf eine solche Abwindzone zu, erfährt es zunächst eine Zunahme des Gegenwindes und steigt auf, wie in Abbildung 2.4 zum Zeitpunkt 2 gezeigt.

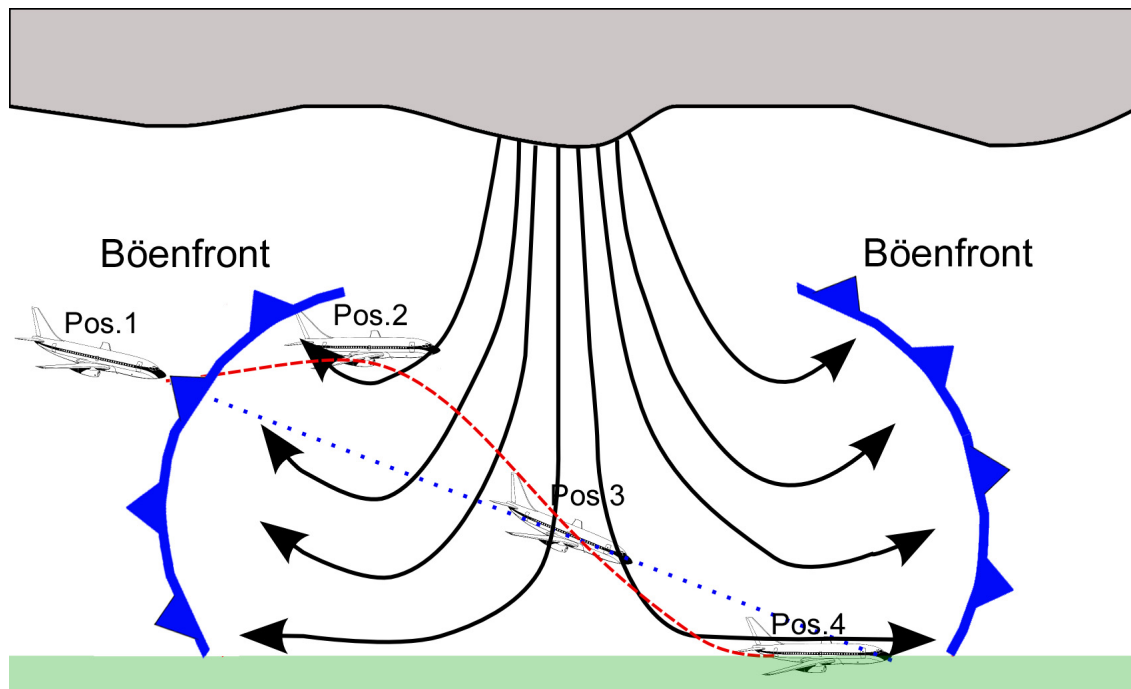


Abbildung 2.4: Nach einer anfänglichen Zunahme des Gegenwindes und dem damit zusammenhängenden Aufsteigen bei Position 1 erfährt ein Luftfahrzeug am Rand einer Abwindzone eines Gewitters bei Position 4 eine schlagartige Zunahme des Rückenwindes, die unter Umständen einen Absturz verursachen kann. Erstellt in Anlehnung an [24].

Am Rand der Abwindzone zum Zeitpunkt 4 nimmt der Rückenwind schlagartig zu [24]. Kommt es dabei zur Unterschreitung der Mindestfluggeschwindigkeit, erhöht sich bei einer Flughöhe von weniger als 100 m das Risiko für einen Absturz [14].

Squall line

Bei einer linienförmigen Anordnung eines Gewittersystems spricht man von Böenlinien (engl. *squall line*). Diese Gewitterlinien werden im Warmsektor hinter einer Warmfront und im Vorfeld einer Kaltfront, etwa in einer Entfernung bis zu 250 km vor ihr, ausgelöst. Mit einer Länge von einigen hundert Kilometern und einer Breite von bis zu 100 km gehören squall lines zu den mesoskaligen konvektiven Systemen (engl. *mesoscale convective systems*, MCS) [25]. Wie alle MCSs entwickeln squall lines eine Eigendynamik, die durch ein System von Auf- und Abwinden für Verstärkung und Erhaltung des Gewitters sorgt. In den mittleren Breiten während der Sommermonate kann eine squall line eine Lebensdauer von mehreren Stunden erreichen. Charakteristisch für eine squall line sind ein in Richtung der Windscherung geneigter Aufwind und daraus folgend ein außerhalb der Aufwindzone angesiedelter Fallwind sowie fallender Niederschlag [25]. Am Boden bildet die ausströmende Kaltluft des Fallwindes einen Kaltluftsee (engl. *cold pool*). Die Temperatur des Kaltluftsees hängt von der Größe und der Art der Hydrometeore sowie von der relativen Feuchte der Umgebungsluft ab. Bei einer relativ trockenen Umgebungsluft wird durch die Verdunstung bzw. auch durch das Schmelzen der Hydrometeore die Verdunstungswärme entzogen. Die Temperaturunterschiede des Kaltluftsees und der wärmeren Luftmassen der Umgebung begünstigen das Entstehen einer thermischen Zirkulation im Vorfeld einer squall line. Der turbulente Vorderrand der Kaltluft, die Böenfront, verlagert sich mit der Zeit immer weiter weg von der zugehörigen Gewitterzelle in Zugrichtung des Gewitters. Die Form der Böenfront ähnelt dabei einem horizontalen Bogen und wird als Böenwalze oder stratiforme Arcus-Wolke bezeichnet. Wie alle Multizellensysteme haben auch squall lines keinen Selbstzerstörungsmechanismus, wie es bei einer Einzelzelle der Fall ist. Erst infolge einer Abnahme der Luftfeuchte und der Temperatur kommt es zur Abschwächung der squall line.

Für Luftfahrzeuge sind squall lines räumlich stark ausgedehnte Gefahrengebiete. Zusätzlich zu den oben beschriebenen Gefahren eines Gewitters für Flugzeuge sind die Böen einer squall line mit einer Windgeschwindigkeit von bis zu 25 m s^{-1} besonders hervorzuheben.

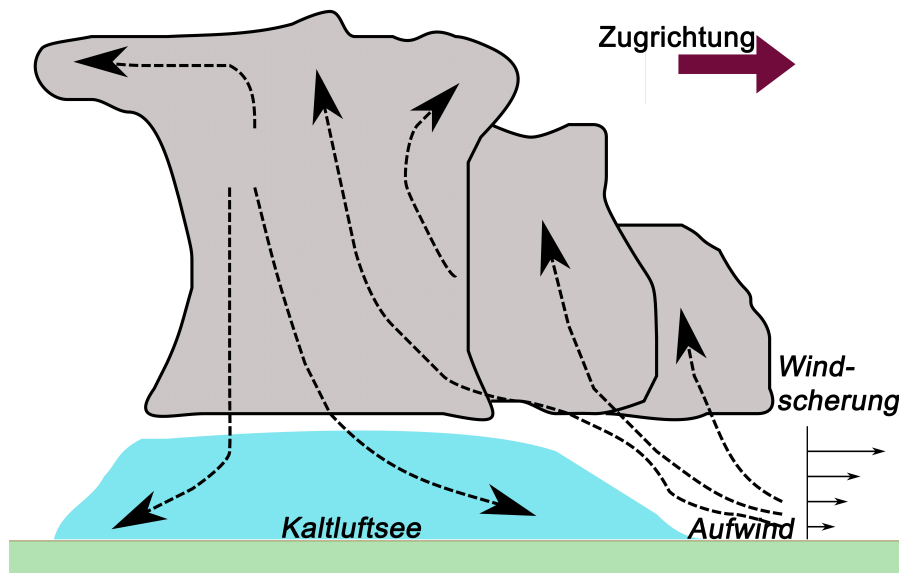


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der Windsysteme bei einer squall line. Durch die Neigung des Aufwindes befindet sich der Fallwind mit dem zugehörigen Niederschlagsgebiet außerhalb der Aufwindzone. Unterhalb der Gewitterzelle bildet sich ein Kaltluftsee aus, der zusammen mit der Windscherung in Bodennähe zur Entstehung einer thermischen Zirkulation an der Vorderseite der squall line beiträgt. Erstellt in Anlehnung an [26].

Superzelle

Superzellen stellen die gefährlichste Art eines Gewitters dar. Am unteren Rand einer Superzelle kann ihr Durchmesser bis zu 50 km betragen und über 200 km im Bereich der Tropopause. Auch mit ihrer Lebensdauer von bis zu 12 Stunden ist eine Superzelle den anderen Gewitterarten weit überlegen. Superzellen bestehen nicht wie Multizellen aus einer Abfolge von sich immer neu bildenden Einzelzellen. In ihrem Inneren rotiert eine Mesozyklone (engl. *updraft*), die für das Einströmen und Aufsteigen mit hoher Geschwindigkeit von warmer und feuchter Luft aus Bodennähe sorgt. Darüber hinaus bewirkt eine Mesozyklone die Ausbildung eines Abwindstromes mit mäßigem Niederschlag auf der Rückseite der Superzelle (engl. *rear-flank downdraft*, RFD). Gleichzeitig findet an der Vorderseite des Gewitters ein dynamisches Absinken der Luft aus dem Ambossniveau statt (engl. *forward-flank downdraft*, FFD). Der vorderseitige Abwind (FFD) ist mit starken Niederschlägen und Hagel verbunden. Erfährt bei einer Superzelle die bodennahe Luft eine starke horizontale Rotation um den Aufwind, kann sich ein Tornado ausbilden. Die gefährlichsten Tornados der Stufe F4 haben mit Windgeschwindigkeiten von mehr als 400 km h^{-1} eine enorme Zerstörungskraft.

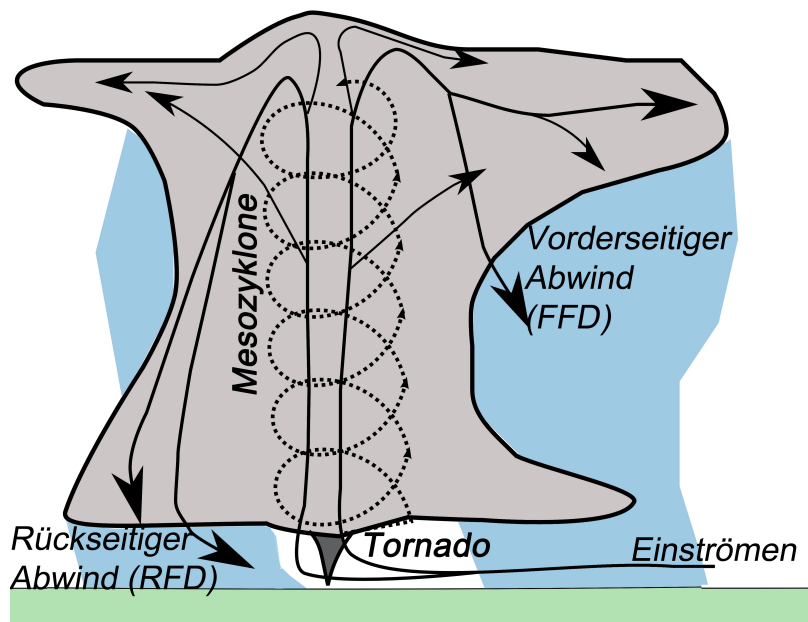


Abbildung 2.6: Der Vertikalschnitt einer Superzelle mit einer rotierenden Mesozyklone im Inneren des Gewitters und zwei Niederschlagsgebieten. Starke Niederschlagsgebiete und Hagel befinden sich im vorderseitigen Abwind (FFD). Mäßiger Niederschlag wird im rückseitigen Abwind (RFD) beobachtet. Erstellt in Anlehnung an [27].

2.1.3 Generierung von Wetterpolygonen

Die Kenntnis der Gewittergefahren für Luftfahrzeuge wirft die Frage auf nach einer akkuraten Vorhersage von Gewitterereignissen. Bereits vor Flugbeginn könnten Flugrouten unter Berücksichtigung der vorliegenden Gewitterinformationen optimiert werden, um damit die Effizienz und die Sicherheit des Flugverlaufs bei Gewitter zu erhöhen. Bei einer mittleren Flugdauer in Europa von circa 2 Stunden ist vonseiten des Flugverkehrsmanagements eine zweistündige Gewittervorhersage wünschenswert. Für die Erstellung solcher Vorhersagen gibt es verschiedene Methoden, die sich auf unterschiedliche Datenquellen zum aktuellen Atmosphärenzustand stützen. Wegen einer eingeschränkten Verfügbarkeit der Atmosphärensondierungen, welche weltweit an 700 Stationen erfolgen [28], ist die Fernerkundungsmethode für die Erstellung der Gewitterprognosen unverzichtbar. Die Fernerkundungsdaten in Form von Satelliten- und Radarkompositbildern erfassen Gewitterzellen in ihrer aktuellen Entwicklungsphase und erlauben durch die Analyse der zeitlichen Abfolge dieser Bilder die Bestimmung der Verlagerungsrichtung und Geschwindigkeit der detektierten Gewitter. Auch eine Extrapolation der Gewitterzellenbewegung in die Zukunft ist möglich und wird zur Erstellung einer Kurzfristvorhersage (engl. *Nowcasting*) für die vorhandenen Zellen verwendet. In den letzten Jahren wurden solche Nowcasting-Produkte speziell für

den Flugverkehr in den USA und in Deutschland entwickelt. In Deutschland erstellte das DLR zwei Algorithmen, die abhängig von der verwendeten Datenquelle Rad-TRAM (für Radarkompositbilder) oder Cb-TRAM (für Satellitenbilder) heißen.

Cb-TRAM und Rad-TRAM

Die Algorithmen Cb-TRAM und Rad-TRAM dienen der Darstellung und der kurzfristigen Vorhersage der aktuellen Gewitterentwicklung über Deutschland. Basierend auf Satelliten- oder Radarkompositdaten durchlaufen beide Modelle jeweils vier Schritte: Extraktion des Bewegungsfeldes, Detektion der Gewitterzellen, ihre Verfolgung und schließlich das Nowcasting. Der Cb-TRAM-Algorithmus verwendet Daten des METEOSAT-Satelliten der zweiten Generation. Dieser spinstabilisierte und geostationäre Satellit befindet sich in etwa 35.800 km Höhe über dem Golf von Guinea und tastet mit einem passiven Radiometer die Erde von Süd nach Nord durch 11 Spektralkanäle ab. Mit einer Abtastdauer von 14 Minuten ergibt sich eine Bildwiederholrate von 15 Minuten. Beim senkrechten Einfallswinkel ist die Bildpunktdichte der Messung am höchsten. Für Mitteleuropa wird die beste Bildauflösung mit einer Pixelweite von 1,5 km x 1,5 km im hoch aufgelösten sichtbaren Kanal (engl. *high resolution visible*, HRV) erreicht. Neben dem HRV-Kanal verwendet Cb-TRAM auch Bilder des Infrarotkanals bei 10,8 μm und des Wasserdampfabsorptionskanals bei 6,2 μm mit einer Pixelweite von 5 km x 5 km [29]. Durch die Bewegung des Satelliten entsteht ein Parallaxenfehler, der eine Korrektur erfordert. Dieser Fehler tritt immer dann auf, wenn sich bewegende Beobachter eine scheinbare Objektverschiebung wahrnehmen. Mit zunehmender geographischer Breite kann der Parallaxenfehler eine nicht zu vernachlässigende Verschiebung von 10-15 km in nördliche Richtung von der tatsächlichen Gewitterposition verursachen [30].

Rad-TRAM verwendet ein Radarkompositprodukt aus Daten der 16 Wetterradare des Deutschen Wetterdienstes. Jedes Radar misst im Umkreis von 256 km die Niederschlagsintensität mit einer Pixelweite von 2 km x 2 km. Der Radarverbund deckt damit eine Fläche von 1800 km x 1800 km ab. Mit einer Messhöhe von 1500 m erfasst ein Wetterradar die untere Atmosphärenschicht. Das Messprinzip basiert auf dem Senden eines Strahls bekannter Frequenz und Intensität mit einem Öffnungswinkel von 1°. Durch Rayleigh-Streuung an Niederschlagspartikeln entsteht ein Echosignal, das mit seiner Signalstärke eine Auskunft über Größe und Beschaffenheit der Niederschlagsteilchen liefert. Die Geschwindigkeit der Teilchen relativ zur Sendeantenne errechnet sich aus der Dopplerverschiebung des Messsignals [31]. Das Echosignal wird in sechs Kategorien, entsprechend dem Signalwert in Dezibel,

aufgeteilt und visualisiert. Das Radarkompositprodukt dient vor allem der aussagekräftigen Erfassung synoptischer Wettersituationen. Die Betrachtung individueller Pixel im Hinblick auf die Untersuchung mikrophysikalischer Prozesse ist dagegen limitiert [30].

Die Algorithmen Cb-TRAM und Rad-TRAM starten mit der Berechnung von Verschiebungsvektoren aus zwei aufeinander folgenden Abbildungen (vom Satelliten bzw. Radar) im Abstand von 15 Minuten. Dieser Vorgang wird als Extraktion des Bewegungsfeldes bezeichnet und liefert ein Verschiebungsvektorfeld. In diesem Feld wird jedem Bildpixel ein Verschiebungsvektor zugeordnet, der so berechnet wird, dass die mittlere quadratische Abweichung zwischen zwei Bildern minimal beziehungsweise die Korrelation maximal ist. Die numerische Umsetzung erfolgt durch Verschiebung des untersuchten Bildes um Vielfache von ± 2 Pixel, jeweils in unterschiedliche Richtungen, bis die beste Übereinstimmung mit dem darauffolgenden Bild gefunden wird. Für die Verfolgung atmosphärischer Bewegungen verschiedener Größenordnungen (Skalen) spielt die Bildauflösung eine wichtige Rolle. Eine niedrige Auflösung wird zum Beispiel für großskalige Bewegungen verwendet [30].

Nach der Extraktion des Bewegungsfeldes erfolgt bei beiden Algorithmen die Detektion von Gewitterzellen. Cb-TRAM bestimmt für jedes Gewitter das aktuelle Entwicklungsstadium. Dafür werden Wolkenbilddaufnahmen aus drei Spektralkanälen analysiert und mit Hilfe bestimmter Regeln klassifiziert. Zur Klassifizierung verwendet man drei Kategorien: Konvektive Phase mit einer starken lokalen Entwicklung, schnelles Abkühlen und das Reifestadium. Für die Phasenzuordnung sind Faustregeln definiert. Bei Zuordnung eines Gewitters zum Beispiel zur konvektiven Phase lautet die Regel: Eine Erhöhung der Wolkenfläche im HRV-Kanal muss durch die Abkühlung im IR-Kanal (hellere Flächen) unterstützt werden.

Im Rad-TRAM betrachtet man nur diejenigen Gewitterzellen, deren Signalstärke einen Grenzwert von 37 Dezibel übersteigt. Bei Überwindung dieses Grenzwertes sollen Gewitterzellen sowohl über eine hinreichende Größe verfügen als auch eine zur Nachverfolgung genügende Lebensdauer besitzen [30].

Die Zuordnung von Gewitterzellen erfolgt bei beiden Algorithmen nach demselben Prinzip. Eine Gewitterzelle zum Zeitpunkt $t - 1$ wird entsprechend dem Bewegungsfeld extrapoliert. Daraufhin wird die Position der erzeugten Zelle mit Positionen der aktuellen Gewitter zum Zeitpunkt t verglichen. Eine maximale Übereinstimmung einer aktuellen Gewitterzelle mit der geschätzten extrapolierten Gewitterposition bildet die zeitliche Zuordnung. Auf diese Weise entstehen Historien einzelner Gewitterzellen, die auch ein Zusammenwachsen mit anderen Gewitterzellen oder ihren Zerfall in kleinere konvektive Formen beinhalten können. Für das Nowcasting erfolgt die Extrapolation der Gewitterzellenbewegung für bis zu vier weitere Zeitschritte nach demselben Prinzip.

Zur Erstellung von Gewitterwarnungen werden die berechneten Gewitterpositionen als zweidimensionale Polygone dargestellt und als Cloud-Top (für Cb-TRAM) bzw. als Cloud-Bottom (für Rad-TRAM) bezeichnet. Für die räumliche Darstellung werden Gewitter als Säulen bestimmter vertikaler und horizontaler Ausdehnung wie in Abbildung 2.7 visualisiert [32]. Dafür muss die Höhe des Cloud-Tops aus der aktuellen Tropopausenhöhe abgeleitet werden.

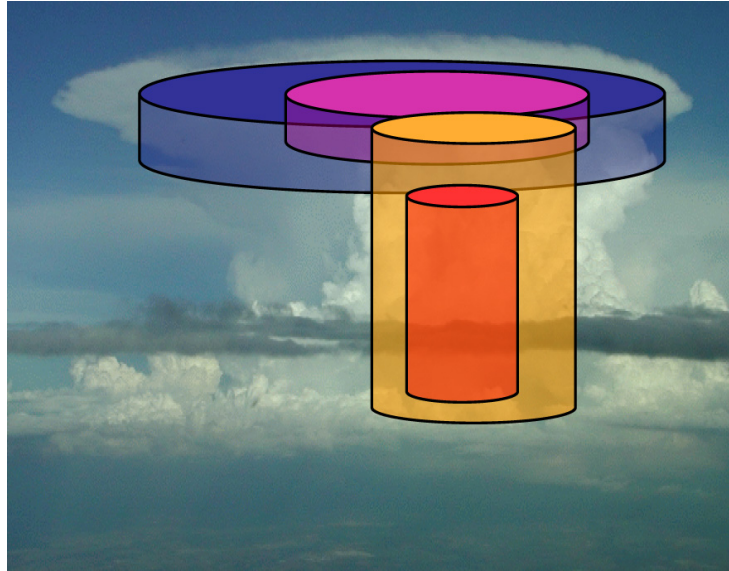


Abbildung 2.7: Gefahrenbereiche einer Gewitterzelle berechnet mit den Algorithmen Cb-TRAM (*top volume*) und Rad-TRAM (*bottom volume*) und räumlich dargestellt in Form von Säulen. Quelle: [32].

In Zukunft sollen solche Cloud-Top-/-Bottom-Produkte für Fluglotsen in Kontrollzentren und für Piloten vor dem Flug sowie während des Fluges im Cockpit verfügbar sein.

2.1.4 Gewittererkennung im Cockpit

Im Cockpit eines modernen Passagierflugzeuges befinden sich aktive und passive Messsysteme zur Gewittererkennung. Zu passiven Messsystemen gehören Stormscope und Strike Finder. Beide Systeme nutzen dieselbe Technologie zur Erkennung und Analyse der elektrischen Aktivität eines Gewitters. Ein Strike Finder erfasst das von einem Blitz emittierte elektromagnetische Signal im Umkreis von 200 NM. Dafür wird zunächst der Richtungswinkel zum Blitz mit einer Antenne erfasst. Anschließend folgen die Aufnahme und Analyse des Blitzspektrums, wobei das aufgezeichnete Signal mit einem charakteristischen Blitztypmuster verglichen wird. Im Gerät sind Referenzdaten für Entladungen in Form von Wolke-Wolke-

Blitzen, Wolke-Boden-Blitzen und Blitzen innerhalb der Gewitterwolken gespeichert. Das verwendete Verfahren nutzt die Tiefpassfilter-Eigenschaft der Atmosphäre, welche darin besteht, tiefere Frequenzen weniger stark zu dämpfen als höhere. Mit zunehmendem Abstand wirkt sich die frequenzabhängige Dämpfung der Atmosphäre stärker auf das Blitzspektrum aus. Der Vergleich des gemessenen Signals mit dem gespeicherten Referenzspektrum liefert schließlich die Distanz zum Blitz. Die Positionen der Blitze erscheinen auf dem Monitor des Strike Finders in Form von orangen Punkten, wie in Abbildung 2.8 zu sehen ist [33].

Eine weitere Methode, Gewitter vom Cockpit aus zu erfassen, stellt das Bordwetterradar dar, wie in Abbildung 2.9 auf dem zweiten Monitor von links zu sehen ist. Mit einer typischen Reichweite von 80 NM bei einem Öffnungswinkel von 120 Grad liefert das Bordwetterradar ein zur Tropfengröße und damit zur Niederschlagsintensität proportionales Echosignal. Das Echosignal ist bei schweren Tropfen am stärksten. Eiskristalle reflektieren etwa ein Fünftel weniger als Wassertropfen. Abhängig von der Signalintensität wird erfasster Niederschlag farbig gekennzeichnet und auf dem Monitor visualisiert. Bei der Betrachtung der Visualisierung muss ein Pilot beachten, dass die dargestellten Echosignale, anders als beim Strike Finder, hauptsächlich aus dem frontalen Teil einer Gewitterwolke resultieren. Entsprechend werden bei mehreren Gewittern hintereinander die verdeckten Gewitter nur im Falle einer geringeren Niederschlagsintensität der vorderen Wolken erfasst. Anderenfalls wird dieser

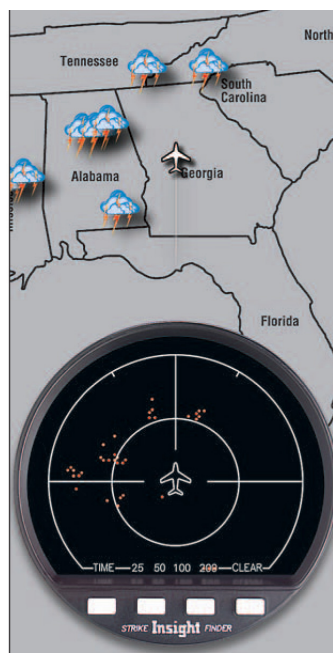


Abbildung 2.8: Blitze in Flugzeugumgebung erscheinen auf dem Monitor des Strike Finders als orange Punkte. Quelle: [33].



Abbildung 2.9: Cockpit einer Boeing 737-8Z9. Das Bordwetterradar ist auf dem zweiten Monitor von links zu sehen. Quelle: [34].

Bereich nicht erkannt und erscheint schwarz auf dem Radarbildschirm.

Es wird vonseiten der Flugsicherung und der Gerätehersteller ausdrücklich empfohlen, beide Messsysteme nicht zum Durchfliegen von Gewittern zu verwenden. Erfahrene Piloten nutzen die gewonnenen Informationen jedoch als Entscheidungsgrundlage für ihr Verhalten bei Gewitter und nutzen folgende Verhaltensregeln [35]:

- Betrachte beim Flug die aktualisierte Wettervisualisierung als das große Ganze und fliege die kürzeste gewitterfreie Route zu deinem Ziel.
- Nutze Gewitterverlagerungen zu deinem Vorteil: Wenn dein Kurs die Mitte des Gewitterbereiches trifft, welches sich in die nordöstliche Richtung verlagert, umfliege es vom Südwesten.
- Fliege nicht unter dem Amboss, denn dort kann es hageln.
- Versuche nicht durch eine Öffnung in einer Gewitterlinie mit einer Größe von weniger als 25 NM zu fliegen.
- Nutze regelmäßig die Bilderneuerungsfunktion des Stormscopes: Häufig auftretende Blitze sind ein Indiz für starke Gewitteraktivität.
- Vertraue nicht allein auf die Blitzdetektierung zum Um- oder Durchfliegen eines Gewitters.
- Zum Schluss eignet sich besonders bei Gewitter die alte Flugregel, die besagt: „Wenn du zweifelst, warte ab.“

2.2 Gewitter und Flugverkehrsmanagement

2.2.1 Flugvorbereitung

Die Sicherheitsfrage hat im Flugverkehrsmanagement eine zentrale Bedeutung. Die langjährige Bereitschaft des Flugverkehrsmanagements, die Fehler zu analysieren und zu beheben, eine *positive Fehlerkultur*, reduzierte das Risiko eines Flugzeugabsturzes auf eins zu zehn Millionen [36]. Die Entwicklung von Sicherheitsregeln trug entscheidend zu dieser Risikoreduzierung bei. Beispielsweise ist die Berechnung der Treibstoffmenge, die bei jedem Flug mitgeführt werden muss, genau festgelegt und setzt sich aus folgenden Anteilen zusammen [37]:

- Streckentreibstoff, um den Zielflugplatz vom Startflugplatz aus zu erreichen (*trip fuel*).
- Zusätzlich fünf Prozent von der Streckentreibstoffmenge für unvorhergesehene Berechnungsfehler wie zum Beispiel durch falsch prognostizierten Wind (*contingency fuel*).
- Treibstoff für den Flug zu einem Ausweichflugplatz (*alternate fuel*).
- Kraftstoffmenge, um am Zielort 30 Minuten in der Warteschleife (*Holding*) kreisen zu können (*final reserve*).
- Nach Einschätzung des Piloten zusätzlich benötigter Kraftstoff (*extra fuel*).

Die zusätzlich notwendige Kraftstoffmenge für das Ausweichen bei Gewitter ist durch die Komponente *extra fuel* berücksichtigt. Hier dürfen Piloten entsprechend ihrer individuellen Erfahrung mitentscheiden, wie viel Treibstoff zusätzlich benötigt wird.

Die Berechnung der Kraftstoffmenge gehört zum Aufgabenbereich eines Dispatchers. Dieser errechnet etwa drei Stunden vor dem Abflug für jeden Linienflug einen genauen Flugplan. Mit Hilfe eines Computerprogramms, wie *Lido/Flight* von Lufthansa, werden bis zu acht verschiedene Flugpläne anhand folgender Informationen erstellt: Flugzeugtyp, Gewicht, Wind, Wetterverhältnisse, Überfluggebühren, Einschränkungen im Luftverkehr, Zustand der Landebahn und Parkposition am Zielflughafen [38]. Aus den errechneten möglichen Flugplänen wird vom Dispatcher das Optimum, eine sichere und wirtschaftliche Flugtrajektorie, ausgewählt. Die Wirtschaftlichkeit einer Flugroute wird durch den Vergleich der Gebühren für die Benutzung unterschiedlicher Lufträume optimiert. Besonders beim Flug in Europa kann der Umweg kostengünstiger ausfallen als eine direkte Verbindung. Die optimale Route

für die Fluggesellschaft muss folglich nicht zwingend die kürzeste sein [38]. Mit Einführung einer Vereinbarung zur Vereinheitlichung der Luftraumstruktur in Europa, genannt Single European Sky, sollen in Zukunft die Unterschiede in den Luftraumgebühren aufgehoben werden.

Für die gewählte Flugtrajektorie erstellt der Dispatcher einen Flugdurchführungsplan (engl. *Operational Flight Plan*, OFP) mit folgenden Fluginformationen: Start- und Landeflughafen, Wegpunkte (engl. *waypoints*), Flugzeiten und Kurse über Grund, Flughöhen (engl. *flight levels*), mögliche Ausweichflughäfen und Kerosinverbrauch, einschlägige Wetterinformationen und andere [38]. Für Piloten stellt ein Flugdurchführungsplan eine detaillierte navigatorische Planung der Streckenführung zwischen Start- und Landeflugplatz dar, die streckenbezogene meteorologische Parameter berücksichtigt. Der Flugdurchführungsplan wird anschließend vom Network Manager Operations Centre (früher CFMU genannt) von EUROCONTROL bezüglich der Durchführbarkeit und der Einhaltung der Luftraumkapazitäten überprüft.

Zur weiteren Aufgabe eines Dispatchers gehört die Benachrichtigung aller zuständigen Flugsicherungsstellen über den Flugverlauf durch einen so genannten ATC-Flugplan (engl. *air traffic control flight plan*). Flugpläne beinhalten ein Mindestmaß an Informationen, um die Flugbewegung auch beim Ausfall der Funkverbindung fortsetzen zu können.

Damit ein Flugzeug vom Boden zu einer Luftstraße gelangen kann, werden festgelegte Strecken, so genannte *Standardisierte Abflugstrecken für Instrumentenflüge* (engl. *Standard Instrument Departure*, SID), abgeflogen. SIDs verbinden das Ende einer Start- und Landebahn mit einem Wegpunkt auf der Luftstraße, der als *Transition* bezeichnet wird. Entsprechend wird im OFP mit einem *Transition* der Wegpunkt markiert, wo die *Standardisierte Anflugstrecke für Instrumentenflüge* (engl. *Standard Terminal Arrival Routes*, STAR) beginnt, die ein Flugzeug zum Erreichen des Zielflugplatzes abfliegen muss.

Neben der Prüfung des Flugdurchführungsplans werden von Piloten vor dem Flug viele Unterlagen, darunter auch die NOTAM-Meldungen, in einem Briefing studiert. NOTAMs (engl. *Notice(s) to Airmen*) sind dringliche Anordnungen und Informationen, die für den aktuellen Flug von besonderer Wichtigkeit sind. Dazu gehören zum Beispiel Meldungen zum aktuellen Zustand der Flugplätze, Flughindernisse wie Fessel- oder Wetterballons oder nicht funktionierende Warnbeleuchtung. Eine Sonderform von NOTAM mit der Bezeichnung ASHTAM informiert Piloten über vorhandene Aschewolken und vulkanische Aktivitäten.

Auch eine meteorologische Flugvorbereitung gehört zur Standardprozedur vor jedem Flug. Nach Paragraph 3a des Luftrechts muss sich ein Pilot vor jedem Flug ausreichend über verfügbare Flugwettermeldungen und Vorhersagen informieren [39]. Für die Bereitstellung

dieser Informationen ist der Deutsche Wetterdienst (DWD) vom Gesetzgeber beauftragt und zertifiziert.

Nach Sichtflugregeln (engl. *visual flight rules*, VFR) fliegende Piloten benötigen für ihre Flugvorbereitung eine systematische meteorologische Flugvorbereitung, ein Selfbriefing. Zum Selfbriefing gehören neben der Aneignung der allgemeinen Wetterlage eine meteorologische Grobplanung am Vortag des Fluges, eine Feinplanung maximal zwei Stunden vor dem Start und die abschließende Verifikation [40]. Die für die Vorbereitung notwendigen Wetterinformationen stehen zum Beispiel in Form eines vom DWD bereitgestellten Internetportals *pc_met* zur Verfügung. *pc_met* bietet den Zugriff auf Produkte, welche mit folgenden drei Vorhersage-Modellen erzeugt werden: Ein globales Wettermodell GME mit bis zu 7 Tagen Vorhersage, ein lokales Modell für Europa COSMO-EU mit bis zu 78 Stunden und ein lokales Modell für Deutschland COSMO-DE mit bis zu 21 Stunden Vorhersage. Auch aktuelle Wetterinformationen in Form von Blitzdaten, Radar- und Satellitenbildern, Flugwettermeldungen und Wetterwarnungen stehen dort zur Verfügung.

Für Flüge nach Instrumentenflugregeln (engl. *instrument flight rules*, IFR) verwenden Piloten folgende Unterlagen zur meteorologischen Flugplanung [41]:

- Karten zur Gesamtwetterlage oder zum Streckenwetter (engl. *significant weather chart*), welche mit symbolischer Darstellung die signifikanten und sicherheitsrelevanten Wettererscheinungen auf der geplanten Flugstrecke aufzeigen (engl. *significant meteorological phenomena*, SIGMET).
- Flugwetterdaten der relevanten Flughäfen (engl. *meteorological aerodrome report*, METAR) mit standardisierten Beobachtungsdaten.
- Vorhersagen an relevanten Flugplätzen (engl. *terminal aerodrome forecast*, TAF) mit der standardisierten Flugwetterprognose für einen Zeitraum von 9 oder 18 Stunden (maximale Vorhersageperiode beträgt 30 Stunden).
- Wetterkarten (Luftdruck- und Windkarten).

Nachdem sich Flugzeugführer über das Wetter, den technischen Flugzeugzustand und die Beladung informiert haben, treffen sie die Entscheidung über die Durchführbarkeit des Fluges und legen die erforderliche Treibstoffmenge fest. Im positiven Fall wird im nächsten Schritt der Bordcomputer (engl. *Flight Management System*, FMS) konfiguriert. Über eine Benutzeroberfläche (engl. *Control Display Unit*, CDU) geben die Flugzeugführer Routenparameter in den Bordcomputer ein. Dazu gehören Wegpunkte der Route, ICAO-Code des Zielflughafens, geplante Fluggeschwindigkeit, Startgewicht, Treibstoffmenge und andere Informationen.

Im Cockpit befinden sich in der Regel zwei CDUs (jeweils ein Gerät für den Piloten und den Co-Piloten), die zu einem Bordcomputer gehören. Damit können beide Flugzeugführer die vom FMS errechneten Daten abrufen und während des Fluges auch Routenänderungen eingeben. Beim Flug errechnet das FMS kontinuierlich die Richtung und Entfernung von der aktuellen Position zum nächsten Wegpunkt der Flugroute. Der Bordcomputer erkennt auch, wenn ein Wegpunkt aufgrund der ungünstigen Wetterbedingungen ausgelassen wird, und steuert den nächsten gespeicherten Wegpunkt automatisch an.

Zwischen einer geplanten Wegpunktfolge und einer real geflogenen Trajektorie (engl. *track log*), aufgezeichnet durch einen GPS-Empfänger, ist eine natürliche Variation vorhanden. In der Navigation werden deshalb verschiedene Kursangaben verwendet, wie in Abbildung 2.10 verdeutlicht.

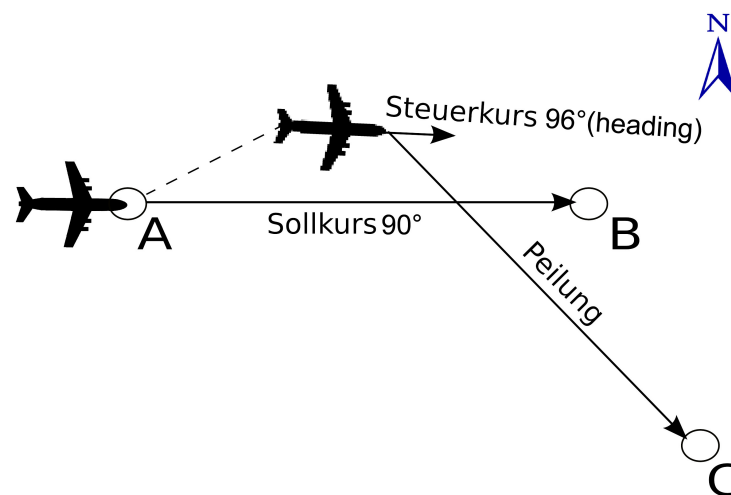


Abbildung 2.10: Alle Kurs- bzw. Richtungsangaben in der Flugnavigation erfolgen bezugnehmend auf den geographischen Nordpol. Der zurückgelegte Pfad, dargestellt mit gestrichelter Linie, kann sich abhängig vom aktuellen Wind stark von der Verbindungslinie zwischen zwei Wegpunkten A und B unterscheiden. Aus der Umgebung des Wegpunktes B kann der nächste Wegpunkt C direkt mit der Kursangabe Peilung angesteuert werden.

Mit einem Sollkurs (engl. *course* oder *desired track*) bezeichnet man die vorgesehene Richtung, um vom Wegpunkt A den Wegpunkt B zu erreichen. Während der Flugbewegung müssen Flugzeugführer den vorherrschenden Wind berücksichtigen und das Flugzeug entsprechend ausrichten. Der Steuerkurs (engl. *heading*) stellt dabei die Kursangabe zum Kompensieren des Windes dar. Anschaulich betrachtet, entspricht das aktuelle *heading* der Richtung, in die die Nase des Flugzeuges zeigt. Im dargestellten Beispiel muss der Pilot unter Berücksichtigung des Windes seinen Sollkurs von 90° mit einem *heading* von 96° fliegen. Der zurückgelegte Weg, welcher dem Pfad über Grund entspricht, unterscheidet sich entsprechend von der Verbindungslinie zwischen den Wegpunkten A und B. In der Luftfahrt

werden die Wegpunkte selten direkt erreicht. Befindet sich das Flugzeug in der Umgebung des Wegpunktes B, kann der nächste Wegpunkt C direkt angesteuert werden. Die Kursangabe, um von der aktuellen Position aus den nächsten Wegpunkt zu erreichen, wird Peilung (engl. *bearing*) genannt. Sowohl im Flugdurchführungsplan als auch im ATC-Flugplan zur Flugüberwachung durch die Flugsicherung wird die Kursangabe *heading* verwendet.

2.2.2 Flugüberwachung durch die Flugsicherung

Die Überwachung des Luftraumes und der Flugbetriebsflächen von Flugplätzen in der Bundesrepublik Deutschland erfolgt primär durch die Deutsche Flugsicherung GmbH (DFS). Folgende Kernaufgaben sind nach den Paragraphen 27c und 27d des Luftverkehrsgesetzes durch die Flugsicherung zu erfüllen [41]:

- Überwachung und Lenkung der Bewegungen im Luftraum und auf Flugplatzrollflächen
- Verkehrsflussregelung und Steuerung der Luftraumnutzung
- Flugberatung, ausgenommen die Flugwetterberatung
- Übermittlung von Flugsicherungsinformationen.

Flugsicherungsinformationen werden in der Regel über Fluggrundfunksendungen verbreitet und beinhalten aktuell auftretende Gefährdungen und Beschränkungen für den Flugverkehr. SIGMET sowie Start- und Landeinformationen gehören ebenfalls dazu.

Der Luftraum über der Bundesrepublik entspricht in der Horizontalen nahezu den geographischen Landesgrenzen, mit Ausnahme der Nord- und Ostseegebiete, und wird in horizontale Sektoren unterteilt. In der Vertikalen unterscheidet man zwischen dem unteren Luftraum vom Boden bis zum Flugniveau FL245¹ und dem oberen Luftraum ab Flugniveau 245 ohne Einschränkung nach oben [41]. Luftraumübergreifend befindet sich der kontrollierte Luftraum im Allgemeinen zwischen 2.500 ft und 66.000 ft über Grund und weist verschiedene Luftraumstrukturen auf, wie in Abbildung 2.11 zu sehen ist. Die Verantwortung für die Flugsicherheit tragen in Deutschland die Lotsen der DFS in den Tower der 17 internationalen Flughäfen und an 5 weiteren Kontrollzentren. In Bremen, Langen und München wird der untere Luftraum und in München, Karlsruhe und Maastricht der obere Luftraum kontrolliert.

Jeder Sektor wird im Kontrollzentrum von zwei Lotsen betreut: einem Radar- und einem

¹ Flight Level 245 bezeichnet eine Höhe von 24.500 ft und entspricht etwa 7500 m.

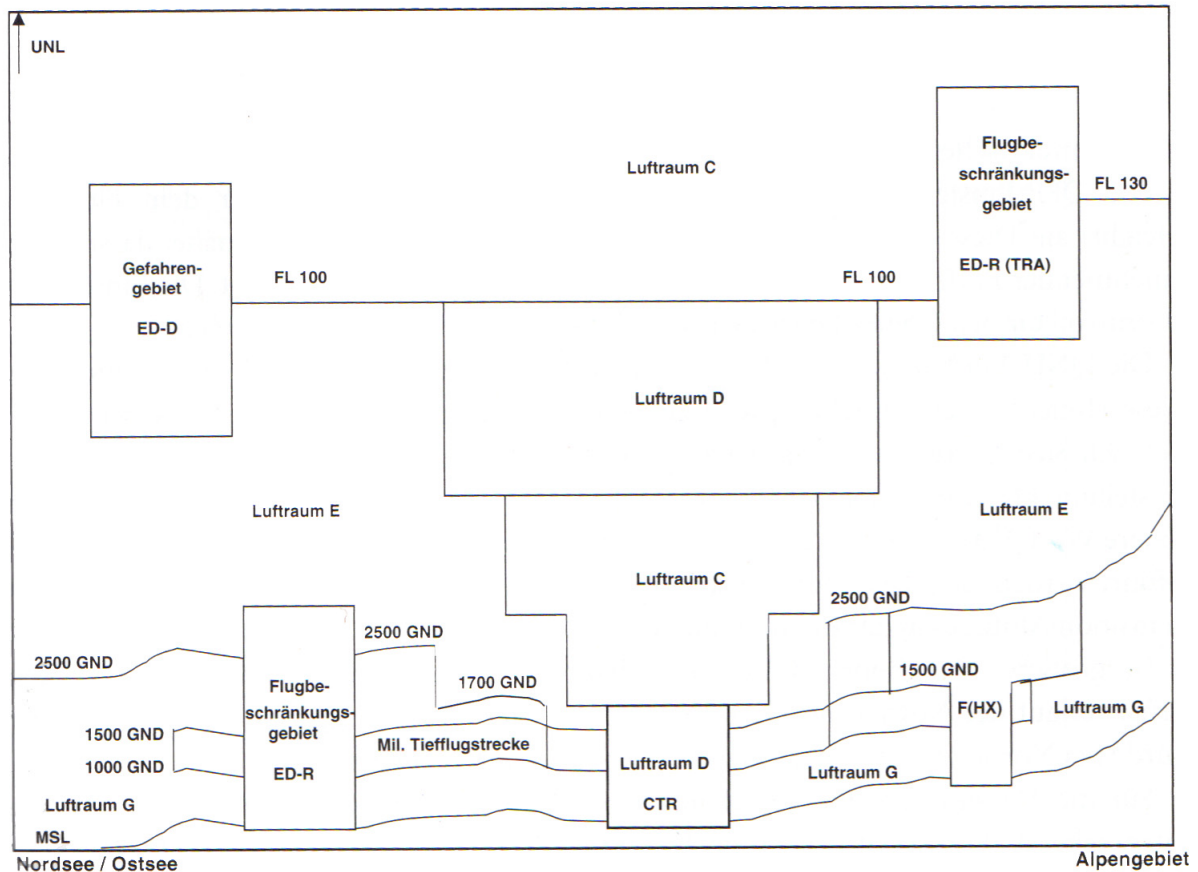


Abbildung 2.11: Vertikale Darstellung der Luftraumstruktur über der Bundesrepublik Deutschland. Quelle: [41].

Koordinationslotsen. Die wichtigsten Fluginformationen wie Flugzeugkennung, Flughöhe und Geschwindigkeit zu jedem Flugzeug, das in ihren Sektor einfliegt, finden die Lotsen auf einem vorliegenden Kontrollstreifen zusammengefasst. Die Flugüberwachung erfolgt durch 27 Radaranlagen, die über die Bundesrepublik verteilt sind und jeweils aus einem Primär- und Sekundärradar bestehen. Mit einem Primärradar wird die Flugzeugposition bestimmt, die sich aus der Signallaufzeit einer von der Parabolantenne gesendeten und vom Flugzeug reflektierten elektromagnetische Welle ergibt. Das Sekundärradar sendet ein Signal zur Aktivierung des Transponders an Bord eines Flugzeuges, welcher wiederum mit Flugzeugkennung und aktueller Flughöhe antwortet. Neben den Informationen auf den Kontrollstreifen finden die Lotsen alle verfügbaren Fluginformationen zusammengefasst und visualisiert auf einem Radarschirm vor. Der Radarschirm erlaubt es Lotsen, Konflikte auf einen Blick zu erkennen und schnell zu reagieren, wenn sich Flugzeuge zu nahe kommen. Beim Unterschreiten des Mindestabstandes zwischen Flugzeugen, der in der Horizontalen 5 NM (ca. 9 km) und in der Vertikalen 1000 ft (ca. 300 m) beträgt, schaltet sich auch ein

Kollisionswarnsystem (engl. *short-term conflict alert*, STCA) ein. Spätestens dann reagieren die Lotsen und der Radarlotse fordert die Piloten auf, die Flugposition zu ändern. Ein Koordinationslotse notiert daraufhin die Änderungen auf dem Kontrollstreifen und informiert, wenn nötig, per Telefon den Koordinationslotsen im darauffolgenden Sektor über die vorgenommenen Anpassungen im Flugverlauf.

Mit bis zu 50 Flugzeugen pro Stunde sind Fluglotsen starker Arbeitsbelastung ausgesetzt [42]. Jedoch kann die Belastung weiter zunehmen, wenn infolge eines Gewitters die geplanten Flugrouten nicht wahrgenommen werden können. Abhängig vom Ausmaß eines Gewitters kann sogar ein ganzer Sektor vorübergehend geschlossen und die Flüge können auf benachbarte Sektoren umgeleitet werden. Heutzutage beginnt eine Umleitung mit dem Wunsch des Flugzeugführers, das aktuelle *heading* oder Flugniveau aufgrund des Wetterhindernisses zu ändern. Ein Radarlotse überprüft den Vorschlag auf potentielle Konflikte mit anderen Flugzeugen und bestätigt diesen im konfliktfreien Fall. Erst seit 2012 haben die Lotsen der DFS einen Zugriff auf die aktuellen Wetterinformationen, die auf einem zusätzlichen Bildschirm, dem sogenannten MetFROG, visualisiert werden. Auf dem MetFROG-Monitor, wie in Abbildung 2.12 rechts, können Lotsen folgende meteorologischen Informationen abrufen: Blitze, Niederschlag, METAR-Meldungen, Wind, Vulkanasche und Rad-TRAM-Daten [43]. Die Letzteren werden von der WxFUSION GmbH zur Verfügung gestellt und beinhalten eine 60-minütige Vorhersage im Viertelstundentakt. Zukünftig sollen auch die Cb-TRAM-Daten zum Informationsstand der Lotsen beitragen. Damit wäre auch die Voraussetzung für die zukünftige Beratung von Piloten über die Art des Umfliegens bei Gewitter geschaffen.



Abbildung 2.12: Darstellung meteorologischer Informationen auf einem MetFROG-Monitor der DFS (rechts im Bild). Quelle: [43].

Zusätzlich zur Bereitstellung von Wetterinformationen wäre die Entwicklung von Hilfsprogrammen, die einen Routenvorschlag zum Umfliegen eines Gewitters liefern, eine Möglichkeit, die Arbeitsbelastung der Lotsen zu senken und gleichzeitig die Sicherheit und Effizienz der Ausweichrouten zu steigern.

2.2.3 Gewitter auf geplanter Flugroute

Von Seiten des Flugverkehrsmanagements gibt es in Bezug auf das Verhalten bei Gewitter klare Empfehlungen, jedoch keine verbindlichen Regeln. Einige Empfehlungen für Flugzeugführer von der Federal Aviation Administration (FAA) in den Vereinigten Staaten lauten dazu [44]:

- Umfliege alle Gewitter mit einem Bedeckungsgrad von mehr als 6/10.
- Halte einen Mindestabstand von 20 NM zu heftigen Gewittern.
- Fliege nicht unter dem Amboss.
- Fliege nicht unter Gewitterwolken, auch wenn die gegenüberliegende Gewittergrenze in Sichtweite ist.
- Warte am Boden, wenn das Umfliegen eines Gewitters unmöglich ist.

Weiterhin empfiehlt die FAA den Flugzeugführern, den zuständigen Fluglotsen um Hilfe beim Manövrieren durch Gewitter zu bitten [44]. Diese Empfehlung ist jedoch nur sinnvoll, wenn die entsprechende Flugsicherung über die aktuellen Gewitterinformationen verfügt.

2.2.4 Gewitterbezogene Trajektorienänderung

Um die Komplexität des Zusammenspiels von Gewitter und ATM zu verstehen, bedarf es zunächst entsprechender Beobachtungsdaten. In den Vereinigten Staaten wurden um die Jahrtausendwende unterschiedliche Studien über die Auswirkung des konvektiven Wetters auf Streckenflüge (*Enroute*) und auf Trajektorien im Nahverkehrsbereich eines Flughafens (*Terminal Area*) durchgeführt. Als Datenbasis dienten in diesen Studien [5, 45] geplante und tatsächlich geflogene Trajektorien von Flugzeugen an Sommertagen mit und ohne konvektive Gewitteraktivitäten. Durch Vergleich der Trajektorien ohne signifikantes Wetter konnte ein Umweggrenzwert als Referenzwert für diese Studien bestimmt werden. Dieser bildet eine natürliche Variabilität zwischen einer geplanten und einer realen Flugroute ab. Ein

Ausweichmanöver findet demnach erst dann statt, wenn der Umweggrenzwert überschritten wird. Das signifikante Wetter wurde über eine Kombination mehrerer Faktoren definiert: Die maximale Höhe (Echotop) für die erfasste Radarreflektivität mit einem bestimmten Schwellwert muss mehr als 25.000 ft betragen. Weiterhin soll der integrale Wert für den Niederschlag in einer Luftsäule (engl. *vertically integrated liquid*, VIL) die Bedingung $VIL \geq 2$ erfüllen, was einem leichten bis mäßigen Regen (30-38 dBZ) entspricht. Das Vorhandensein von Boden-Wolke-Blitzen ist ebenfalls in der Definition berücksichtigt.

Bei einer Untersuchung der Enroute-Flugtrajektorien bei Gewitter wurde folgendes Pilotenverhalten festgestellt [45]:

- Echotops im Abstand von mehr als 6.000 ft unterhalb der aktuellen Flughöhe werden von mehr als 70% der Piloten überflogen. Ein laterales Ausweichen findet nicht statt.
- Der gewählte Abstand für das laterale Ausweichen einer Gewitterzelle hängt in 75% der analysierten Fällen von der Gewitterintensität ab. Gewitter mit $VIL=2$ werden im Abstand von 20 km zur Gewitterkontur umflogen. Bei mäßigem bis starkem Regen mit Echosignalen von 38-44 dBZ ($VIL=3$) vergrößern Piloten ihren Sicherheitsabstand auf etwa 25 km. Zu Gewittern mit starkem Regen und Echosignalen von 44-50 dBZ ($VIL=4$) halten Piloten eine mittlere Distanz von 33 km ein.

In einer späteren Studie, ebenfalls durchgeführt in den Vereinigten Staaten, wurden 2000 Enroute-Flugtrajektorien mit Gewitterereignissen ausgewertet. Es zeigte sich, dass für eine aussagekräftige Prognose der Pilotenreaktion auf ein Gewitter allein die Kenntnis des Echotop-Parameters genügt [5]. Dieser Zusammenhang ist aus zwei Gründen gut nachvollziehbar: Zum einen markiert der Echotop-Parameter den Aufwindbereich eines Gewitters im Reifestadium und zum anderen sind die Piloten darauf trainiert, die Gewittergefahren anhand des reflektierten Signals des Bordwetterradars abzuschätzen [46].

Diese Ergebnisse gelten jedoch nur für Gewittererscheinungen auf Enroute-Trajektorien mit mehr als 20-30 km Entfernung vom Zielflughafen. Bei Gewitter im Nahverkehrsbereich konnte keine vergleichbare Korrelation nachgewiesen werden, da die Anzahl der Trajektorien mit einer festgestellten gewitterbezogenen Kursänderung dafür nicht ausreichte [47]. In den meisten Fällen wurden Gewitter aller Intensitätsstufen durchflogen. Insbesondere erhöhte sich die Wahrscheinlichkeit für das Durchfliegen eines Gewitter im Nahverkehrsbereich, wenn einer der folgenden Faktoren zutraf:

- Das betrachtete Flugzeug folgt einem anderen Flugzeug.
- Die Verspätung beträgt bereits mehr als 15 Minuten.

- Der Flug erfolgt nach Sonnenuntergang.

Dieses Verhalten lässt sich mit einer Limitierung der erlaubten Ausweichrouten beim lateralen Ausweichen im Nahverkehrsbereich des Zielflughafens erklären. Insbesondere erweitern sich die Anflugschneisen von Flugplätzen mit zunehmendem Abstand zur Landebahn trichterförmig. Zusätzlich versuchen Piloten häufig die Maschine noch schnell zur Landung zu bringen, bevor der Flughafenbetrieb am Boden aufgrund eines Gewitters angehalten wird. In der Regel dürfen ankommende Flugzeuge bei Gewitter am Zielflughafen noch landen, die Maschinen werden jedoch nicht direkt abgefertigt [9].

Die dargestellte Untersuchung des Pilotenverhaltens bei Gewitter deutet auf eine Verteilungsfunktion nichtdiskreter Natur hin. Eine realitätsnähere Simulation der gewitterbezogenen Kursänderungen bedarf einer Berücksichtigung der persönlichen Eigenschaften eines Piloten, seiner Erfahrung und Risikobereitschaft. Darüber hinaus wird das Flugverhalten bei Gewitter auch durch die transportierte Fracht bzw. den Luftfahrzeugtyp beeinflusst [48]. Bei Geschäftsreiseflugzeugen zum Beispiel wird ein eher vorsichtiges Verhalten bei Gewitter beobachtet. Das Umfliegen findet im Vergleich zu kommerziellen Verkehrsflugzeugen großräumiger statt. Bei Frachtflugzeugen wird eine gewitterbezogene Trajektorienänderung seltener beobachtet.

2.2.5 Ungünstige Wetterbedingungen als Verspätungsursache

Der Einfluss von ungünstigen Wetterbedingungen auf den täglichen Flugverkehr kann mit Hilfe von Analysen der Flugverspätungen, welche sich bereits zum Zeitpunkt des Startes und dann auch am Zielort ereignen, bestimmt werden. Der Wettereinfluss auf die Pünktlichkeit im Flugverkehr wurde anhand des Flughafens Frankfurt am Main in [49] exemplarisch untersucht. Insbesondere wurde dafür ein Pünktlichkeitsmodell entwickelt mit dem mehr als 45% der Variabilität der Tagespünktlichkeit mit lokalem Wetter erklärt werden konnte. Eine Statistik der FAA zu Verspätungen im Flugverkehr in den Vereinigten Staaten mit dem Namen *Aviation Capacity Enhancement Plan* erklärt die ungünstigen Wetterbedingungen mit einem Anteil zwischen 65% bis 75% zum führenden Faktor für Flugverspätungen von mehr als 15 Minuten [50]. Die Hälfte dieser Ereignisse mit ungünstigen Wetterbedingungen stellen Gewittererscheinungen dar. Schlechte Sicht und starker Nebel bilden die restlichen 50% [2]. Flugverspätungen führen zu hohen Kosten für die Fluggesellschaften und letztendlich für die Passagiere. Allein im Jahr 2007 zum Beispiel betragen die Gesamtkosten für Flugverspätungen in den Vereinigten Staaten 41 Mrd. US-Dollar [51].

In Europa werden ebenfalls Daten über aktuelle Flugverspätungen und andere Fluginformationen von mehr als Hundert Fluggesellschaften von EUROCONTROL in Brüssel gesammelt und monatlich ausgewertet. Damit werden über 68% aller kommerziellen Flüge erfasst. Die Anzahl der durchschnittlichen täglichen Flugbewegungen weist einen Jahrgang auf und erreicht während der Sommermonate von Juni bis September ihr Maximum, wie in Abbildung 2.13 dargestellt. Der Vergleich der letzten fünf Jahrgänge zeigt, ebenfalls in Abbildung 2.13, eine Zunahme des sommerlichen Flugverkehrs im Jahr 2014. Weiterhin hat die durchschnittliche Flugzahl im April 2010 ein lokales Minimum, das auf den in weiten Teilen Nord- und Mitteleuropas eingestellten Flugverkehr aufgrund der ausgetretenen Vulkanasche des Vulkans Eyjafjallajökull zurückzuführen ist.

EUROCONTROL veröffentlicht die Analysen in Form von vierteljährlichen CODA - Quartalsberichten (engl. *Central Office for Delay Analysis*) und monatlichen Berichten über den Netzbetrieb (engl. *Network Operations Report*) [52]. In diesen Berichten werden alle Flugverspätungen gemäß ihrer Ursache klassifiziert. Einen Teil der Flugverspätungen stellen Verzögerungen im Ablauf des Flughafenbetriebes dar, zum Beispiel Gepäck- und Passagierverspätungen. Auch Fluggesellschaften selbst erzeugen Verspätungen wie etwa infolge technischer Defekte oder von Streiks der Mitarbeiter. Eine weitere Kategorie bilden ATFM-Verspätungen (engl. *Air Traffic Flow Management Delay*), die auf die Handlungsweise des Flugverkehrsflussmanagements zurückzuführen sind. EUROCONTROL unterscheidet zwei Arten von ATFM-Verspätungen: an Flughäfen (engl. *airport delay*) und in den Flugsek-

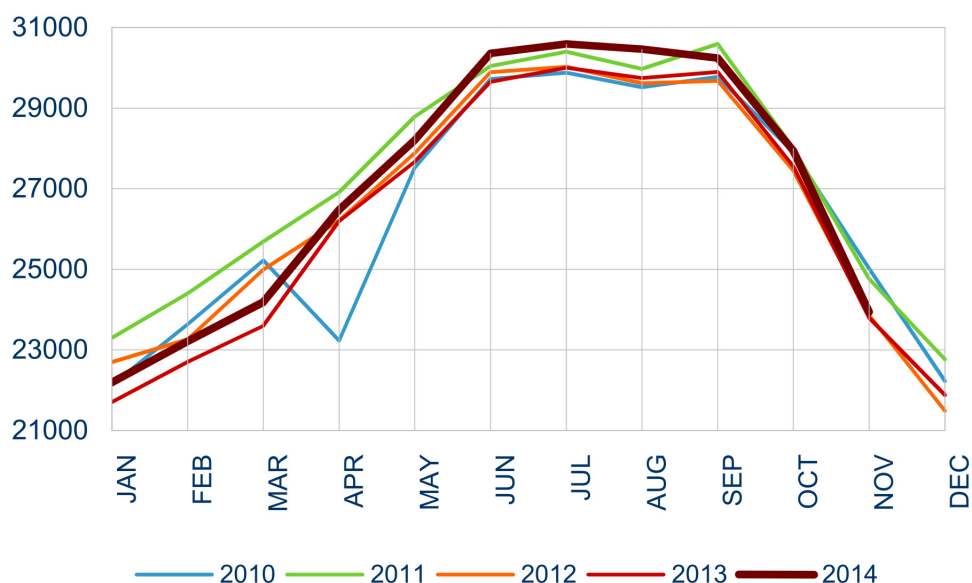


Abbildung 2.13: Durchschnittliche tägliche Fluganzahl in Europa für die Jahre 2010 bis 2014 (Stand November 2014). Quelle: [52].

toren (engl. *enroute delay*) [53]. Die Analysen von ATFM-Verspätungsereignissen dienen als Monitoring für das aktuelle Verkehrsflussmanagement und offenbaren die Hauptursachen für Verspätungen. Beispielsweise dominierten im Juli 2014 im europäischen Luftraum die Flugstreckenkapazität und ungünstige Wetterbedingungen als Verspätungsursachen, wie Abbildung 2.14 zeigt. Unter ungünstigen Wetterbedingungen im untersuchten Zeitraum werden von EUROCONTROL explizit die Gewitteraktivitäten auf Flugstrecken bezeichnet, wie auch im Zitat unter Abbildung 2.15 zu sehen ist. Beispielsweise entstanden im Juli 2014 im Vergleich zu anderen europäischen Lufträumen die meisten gewitterinduzierten Flugstreckenverspätungen im oberen Luftraum Karlsruhe (Karlsruhe UAC) [54].

An einem Tag mit Gewitteraktivitäten verstärkt sich zum Abend hin der Einfluss der reaktionären Ursache, die eine verspätete Ankunft des Flugzeuges oder der Besatzung aus vergangenen Reisen darstellt. Informationen über die ungünstigen Wetterbedingungen als ursprüngliche Verspätungsursache gehen jedoch bereits nach der ersten Landung verloren, was zu einer Unterschätzung des Faktors *Wetter* in den statistischen Auswertungen führt.

2.2.6 Zukünftiges Luftverkehrsmanagement

Obwohl die Wachstumsrate der jährlich beförderten Passagiere in den letzten Jahren einen negativen Trend aufweist, ist für das Jahr 2025 eine Verdoppelung der Gesamtanzahl der Passagiere im Vergleich zum Jahr 2008 zu erwarten. Die entsprechende Prognose ist in Abbildung 2.16 zu sehen [55]. Diese Zunahme des Flugverkehrs in den nächsten Jahren bzw. die daraus resultierende Zusatzbelastung für die Koordination muss vom Luftverkehrsmanagement aufgefangen werden. Um die aktuelle und die zukünftige Flugverkehrssicherheit und

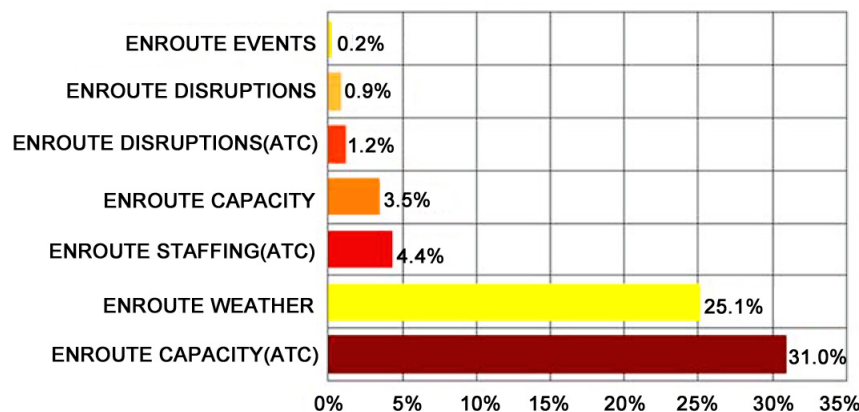


Abbildung 2.14: Ursachen für Verspätungen im Enroute-Flugabschnitt im europäischen Luftraum im Juli 2014. Quelle: [54].

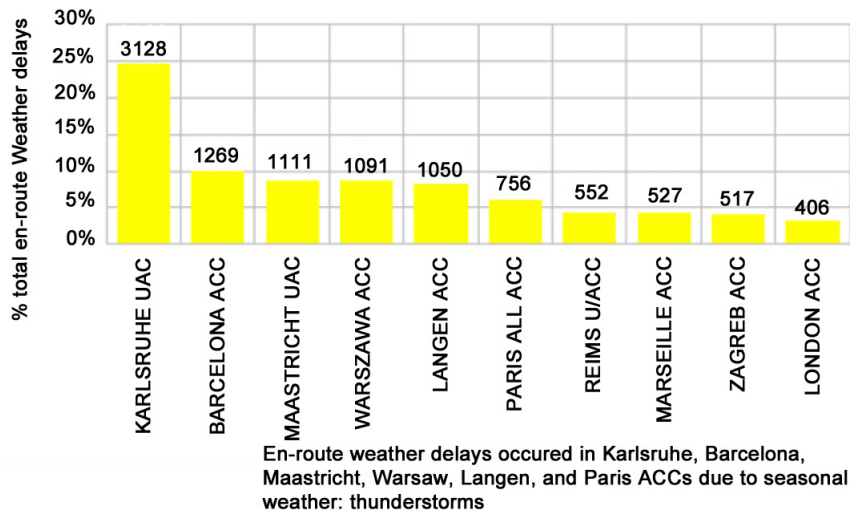


Abbildung 2.15: Zehn europäische Kontrollzentren mit den meisten Verspätungen im Enroute-Flugabschnitt im Juli 2014 mit Gewitteraktivitäten als Hauptursache. Quelle [54].

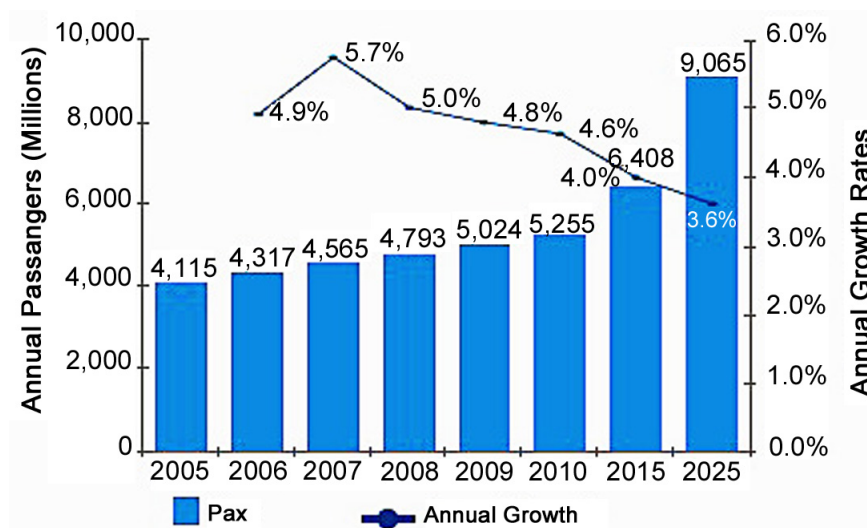


Abbildung 2.16: Anzahl der weltweit jährlich beförderten Passagiere (Pax) und die jährliche Wachstumsrate (Growth) zwischen 2005 und 2025. Quelle: [55].

-effizienz nicht nur zu gewährleisten, sondern auch möglichst weiter zu erhöhen, wurde von der Europäischen Kommission und von EUROCONTROL ein Forschungsprogramm mit dem Namen *Single European Sky ATM Research (SESAR)* initiiert. Durch SESAR soll das aktuelle europäische Flugverkehrsmanagement in Bezug auf Vereinheitlichung, Harmonisierung und Synchronisierung der Dienste optimiert werden. Die Optimierungsziele sind:

- Verdreifachung der Luftraumkapazität
- Erhöhung der Sicherheit um Faktor zehn

- Verbesserte Umweltverträglichkeit um 10% pro Flug
- Halbierung der Kosten für das Luftverkehrsmanagement [41].

Für die Umsetzung der definierten Ziele ist folgende Herangehensweise geplant:

1. Bereitstellung eines Netzbetriebsplans (engl. *Network Operation Plan*, NOP), der einen kontinuierlichen Überblick des aktuellen Flugbetriebs in Europa wiedergibt (veröffentlicht auf der Internetseite [56]).
2. Flughafenbetrieb soll stärker am Flugplanungsprozess und am Flugverkehrsmanagement beteiligt werden.
3. Beschränkungen bei der Luftraumorganisation sollen durch effizienteres Flugverkehrsmanagement reduziert werden.
4. Die Sicherstellung der Abstandseinhaltung zwischen Luftfahrzeugen wird mit Hilfe moderner Methoden realisiert.
5. Über ein Informationsmanagementsystem (engl. *System Wide Information Management*, SWIM) sollen aeronautische, meteorologische und andere Informationen im gesamten Netzwerk für alle Mitglieder durchgehend verfügbar werden.
6. Die Arbeit der Fluglotsen und Flugzeugführer soll bei komplexen Entscheidungsabläufen durch automatische Funktionen unterstützt werden.

SESAR vereinigt die optimierte Vorausplanung mit modernen Messverfahren zur Luftraumoptimierung mit Trajektorienoptimierung durch die Einführung des Konzepts *4D-Trajektorie*. In diesem Konzept wird vor jedem Flugbeginn eine optimale Referenztrajektorie (engl. *reference business trajectory*, RBT) erstellt, welche die Pfadminimierung, Flugzeit, den Treibstoffverbrauch, Umgebungshindernisse und die Flugdynamik berücksichtigt.

2.3 Ausweichalgorithmen und ihre Anwendung

Für die Unterstützung der Fluglotsen und Flugzeugführer bei komplexen Entscheidungsabläufen (SESAR Herangehensweise Nr. 6) wurden in den vergangenen Jahrzehnten einige Algorithmen und automatische Funktionen entwickelt. Erst in den letzten Jahren jedoch richtete sich die Aufmerksamkeit der ATM-Gemeinschaft auch auf die ungünstigen Wetterbedingungen als Ursache für die Komplexitätszunahme im Flugverkehrsmanagement. Darauf folgend wurden entsprechende Modelle entwickelt, zum Beispiel zur Simulation

des Ausweichverhaltens bei Gewitter, welche in den meisten Fällen nicht an operationellen Betrieben getestet wurden. Zu den wenigen erfolgreich getesteten Algorithmen, die nachweislich die Arbeit der Fluglotsen unterstützen, gehört das Automatisierungssystem mit dem Namen *Dynamic Weather Routes* (DWR), welches im Folgenden beschrieben wird. Darüber hinaus werden die Algorithmen Dijkstra, die Sichtbarkeitsgraph-Technik und der Lichtausbreitungsalgorithmus kurz vorgestellt.

Automatisierungssystem DWR

Bei vorhandenen oder vorhergesagten Gewitterereignissen entlang einer Flugroute wird in den Vereinigten Staaten, wie in der Bundesrepublik, eine wetterbedingte Trajektorienänderung bereits bei der Flugplanung, bis zu zwei Stunden vor Flugbeginn, durchgeführt [57]. Damit die Flugrouten auch bei geänderten Wetterbedingungen sicher und effizient verlaufen, überwachen zuständige Lotsen - in den Vereinigten Staaten - neben dem aktuellen Flugverkehr auch die aktuelle Wetterlage. Auf den entsprechenden Wetter-Bildschirmen werden sowohl die aktuellen Gewitterpositionen als auch die Vorhersage der Gewitterentwicklung abgebildet. Die entsprechenden Informationen stellt der nationale Wetterdienst zur Verfügung. Mit der Kenntnis der Gewitterpositionen versuchen die zuständigen Fluglotsen aktuelle Flugrouten zu optimieren. Eine Routenänderung kann dabei sowohl aus Sicherheitsgründen als auch zur Effizienzsteigerung sinnvoll sein. Jedoch kann diese Aufgabe bei großer Flugzeugdichte zu einer erheblichen Steigerung der Arbeitsbelastung der Fluglotsen führen [59]. Um diese Arbeitsbelastung zu senken und dabei gleichzeitig die Flugrouteneffizienz bei Gewitter zu steigern, wurde in den Vereinigten Staaten ein Automatisierungssystem mit dem Namen *Dynamic Weather Routes* (DWR) vom NASA Ames Research Center entwickelt. DWR integriert aktuelle und vorhergesagte Gewitterinformationen in ein Flugverkehrsmodell (*Center/TRACON Automation System*, CTAS) und schlägt bei Bedarf Routenoptimierungen vor. CTAS wurde von der University of California Santa Cruz und der NASA zur Unterstützung der Enroute-Lotsen entwickelt. Das Flugverkehrsmodell generiert Vorhersagen für aktuelle 4-D-Flugtrajektorien und bietet eine Assistenz bei Erhöhung der Flugkapazität und zur Verringerung von Flugverspätungen [60]. Die Gewitterinformationen für DWR liefern zwei vom MIT/Lincoln Laboratory entwickelte Programme: *Corridor Integrated Weather System* (CIWS) und *Convective Weather Avoidance Model* (CWAM). CIWS greift auf Wetterprodukte von NEXRAD-Wetterradaren zurück: Vertikal integrierter Flüssigkeitsgehalt der Luftsäule (VIL) und Echotops, welche die maximalen Höhen für erfasste Radarreflektivitäten mit einem bestimmten Schwellwert bezeichnen. VIL und Echotop dienen als Grundlage zur Erfassung

der Gewitterzellen und zur Erstellung einer Vorhersage für die detektierten Zellen. Die Vorhersage gilt für einen Zeitraum von zwei Stunden und wird alle fünf Minuten aktualisiert. Die vertikale Auflösung erstreckt sich vom Flugniveau FL250 bis FL450 in 1,000 ft-Schritten. Mit der Kenntnis der Gewitterumrisse stellt sich die Frage, wie nah Flugzeuge an diese heran fliegen würden. Eine Antwort darauf liefert der Algorithmus CWAM, welcher das Ergebnis einer statistischen Untersuchung des Flugverhaltens der Piloten bei Gewitter berücksichtigt (wie bereits im Kapitel 2.2.4 beschrieben). Weiterhin verwendet CWAM die Ausgaben des CIWS-Modells, um die Wahrscheinlichkeiten für ein Ausweichmanöver bei einem Gewitterkonflikt auf einer Flugroute zu berechnen. Diese Wahrscheinlichkeitsangaben beziehen sich auf zusammenhängende Gefahrengebiete um ein Gewitter, so genannte *Weather Avoidance Fields (WAF)* [46]. CWAM erstellt drei unterschiedliche WAFs mit Wahrscheinlichkeiten von 60, 70 und 80 % zu jedem CIWS-Objekt, wie beispielhaft in Abbildung 2.17 dargestellt. Im Automatisierungssystem DWR werden 70 %-WAF-Gebiete implementiert, also Gebiete, die laut Statistik von 70 % der Piloten umflogen werden würden. Die Verwendung von

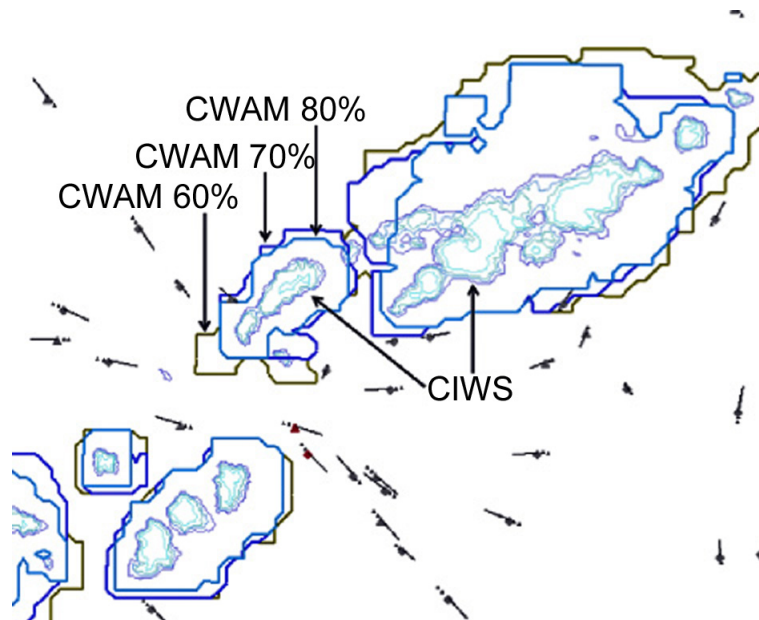


Abbildung 2.17: Drei Gefahrengebiete (*Weather Avoidance Fields, WAF*) um Gewitterzellen mit entsprechenden Wahrscheinlichkeiten für ein von Piloten initiiertes Ausweichmanöver gemäß dem Convective Weather Avoidance Model (CWAM) von 60, 70 und 80 %. Quelle: [57].

WAF führt zur Betrachtung der Gewitter als undurchdringliche Gebiete im Luftraum. Die Berechnung einer Ausweichtrajektorie gleicht somit einer Routenberechnung um ein beliebiges Flugverkehrshindernis, wie es zum Beispiel auch topografische Hindernisse oder ein militärisches Sperrgebiet sind. Für die Erkennung eines Gewitterkonfliktes wurde im Automatisierungssystem DWR ein zeitlicher Horizont von 4 bis 30 Minuten gewählt [61].

In diesem Zeitfenster werden um WAF-Objekte auf geplanten Flugtrajektorien laterale Ausweichrouten berechnet. Jede Ausweichroute beginnt und endet in einem der Wegpunkte der Flugplanroute und besteht aus einem oder maximal zwei zusätzlich berechneten Hilfswegpunkten [59]. Die Abbildung 2.18 verdeutlicht dies skizzenhaft. Für die Berechnung der Hilfswegpunkte werden zunächst Start- und Endpunkt der Ausweichroute festgelegt. Von diesen Wegpunkten werden an ein WAF-Objekt zwei Tangenten angelehnt. Der Schnittpunkt dieser Tangenten ergibt die Position des Hilfswegpunktes, wie in Abbildung 2.19 links zu sehen ist. Das Automatisierungssystem berechnet zwei Ausweichrouten, eine links und eine rechts, um ein WAF-Objekt und wählt die kürzere als Grundlage zur Erstellung einer alternativen Flugtrajektorie. Bei komplexeren Objekten, die eine Änderung des *headings* von mehr als 90 Grad erfordern, werden zwei Hilfswegpunkte bestimmt, dargestellt in Abbildung 2.19 rechts.

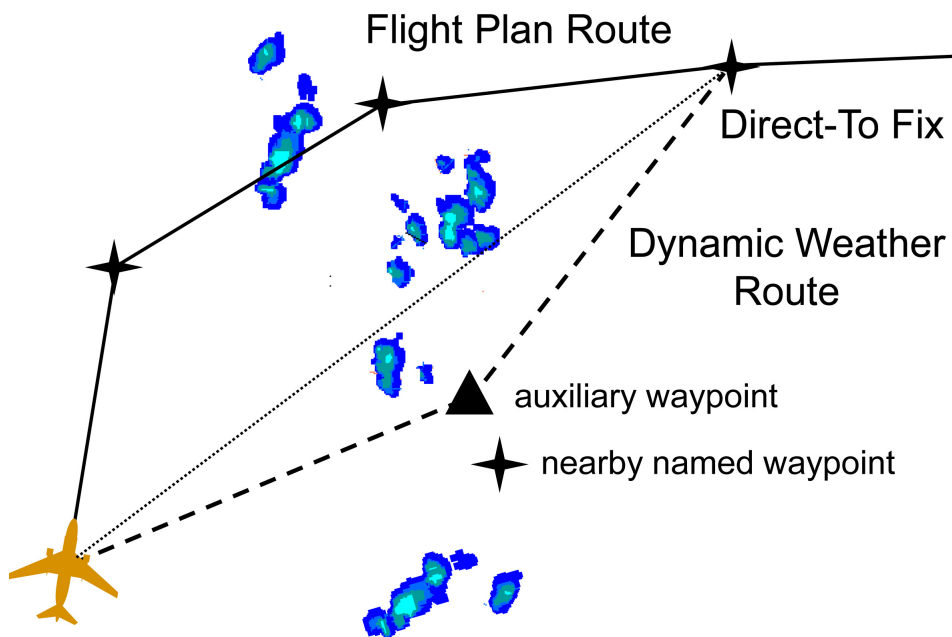


Abbildung 2.18: Berechnung einer Ausweichroute um WAF-Gebiete mit Hilfe eines Hilfswegpunktes (auxiliary waypoint) im Automatisierungssystem DWR. Quelle: [58].

Das Automatisierungssystem DWR löst die Wetterkonflikte sukzessiv. Aus der Fixierung von zwei Wegpunkten der geplanten Flugtrajektorie zur Berechnung der Ausweichroute resultiert eine möglichst kurzzeitigen Abweichung von der vorgegebenen Route. DWR hat bereits die Testphase im operationellen Betrieb im Flugsicherungszentrum *Fort Worth Center* absolviert. Dort unterstützte das Automatisierungssystem die Arbeit der Lotsen über einen Zeitraum von 14 Stunden an einem Tag mit Gewitteraktivitäten. Bei insgesamt 171 Flügen

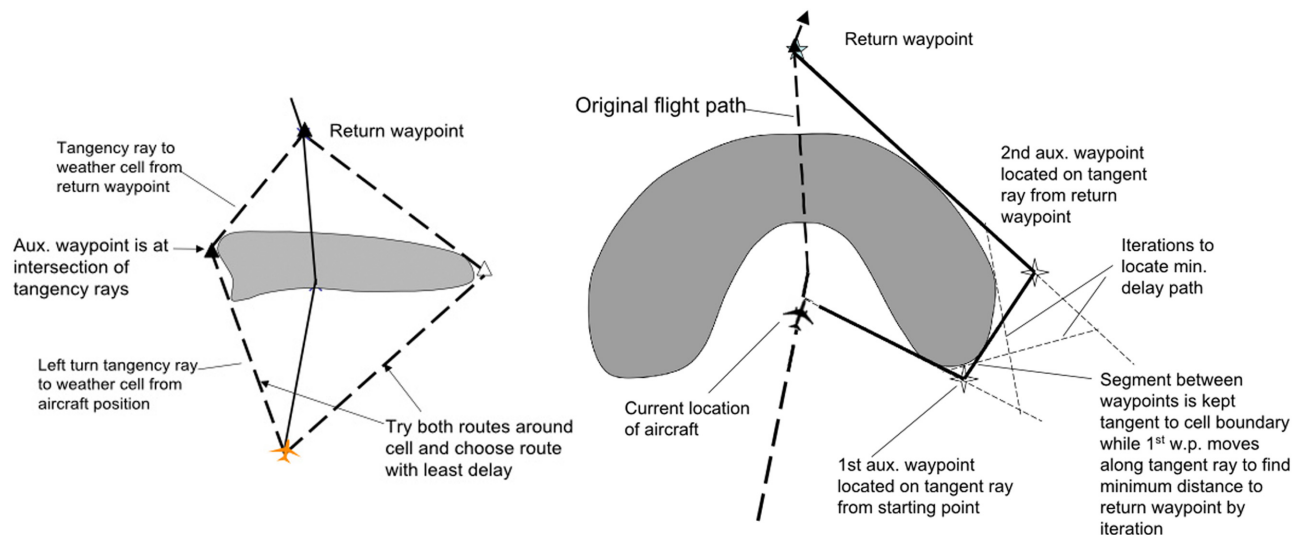


Abbildung 2.19: Berechnung von Tangentschnittpunkten zur Konstruktion einer Ausweichroute um ein einfaches WAF-Objekt mit einem Hilfspunkt (links) und um ein komplexeres WAF-Objekt mit zwei Hilfspunkten (rechts). Quelle: [59].

wurden von DWR vorgeschlagene Routenoptimierungen von Lotsen übernommen, was zu einer durchschnittlichen Zeitersparnis von 10 Minuten pro Flug führte. Über 70% der Tester haben das Automatisierungssystem als hilfreich eingestuft [62].

Es stellt sich die Frage, ob das Automatisierungssystem DWR auf Europa übertragen werden kann. Folgende Gründe könnten die Übertragung erschweren:

- WAF-Objekte sind in der vorgestellten Form im europäischen Raum nicht operativ verfügbar.
- Die Lotsen in Deutschland und anderen europäischen Ländern sind nicht für die Flugsicherheit in Bezug auf Wettergefahrengebiete verantwortlich. Der Vorschlag zum Ausweichen bei Gewitter kommt meistens vonseiten der Flugzeugführer, welche die Gewitter mit dem Bordwetterradar oder visuell erfassen.

Darüber hinaus ist unklar, wie sich DWR bei mehreren Gewitter innerhalb eines festgelegten Zeitfensters verhält. Es könnte zum Beispiel sein, dass beide Ausweichrouten (rechts und links) um ein WAF-Objekt ebenfalls Gewitterkonflikte aufweisen. Folglich müssten bei komplexen großräumigen Gewittersystemen andere Lösungen gefunden werden.

Wenn mehrere Ausweichrouten zur Auswahl stehen, kann mit Hilfe des Dijkstra-Algorithmus, der nach seinem Erfinder Edsger W. Dijkstra benannt wurde, die kürzeste Verbindung berechnet werden [63]. Die Anwendbarkeit des Algorithmus für die Luftfahrt wurde bereits

durch die Implementierung in einen Ausweichalgorithmus für Geländehindernisse getestet. Die Entwicklung führte das Technion, Israel Institute of Technology, durch [64].

Dijkstra-Algorithmus

Der Dijkstra-Algorithmus beschäftigt sich mit der Suche nach einem optimalen Weg in einem Graphen (engl. *graph traversals*) zwischen dem Startpunkt und dem Zielpunkt unter Berücksichtigung einer Kostenfunktion (engl. *cost function*). Die Kostenfunktion kann dabei beliebig definiert werden, zum Beispiel über den Abstand (kürzeste Strecke) oder die Zeit (schnellster Weg). Die Punkte eines Graphen, welche als Knoten bezeichnet werden (engl. *vertices*), sind durch Kanten (engl. *edges*) verbunden. Die Kanten sind mit Gewichtungsfaktoren (Abstand, Zeit) versehen, welche nicht negativ sein dürfen. Für die Luftfahrt kann die Suche nach benachbarten Knoten durch Bedingungen wie die Einhaltung eines Kurvenradius zusätzlich eingeschränkt werden [64]. In Abbildung 2.20 sind im kartesischen Koordinatensystem unter Einhaltung dieser Zusatzbedingung alle erreichbaren benachbarten Knotenpunkte von der Position P_2 dargestellt. Die Richtung, in die sich ein Flugzeug von der aktuellen Position P_1 bewegt, ist durch seinen Richtungsvektor $P_2 - P_1$ eindeutig bestimmt.

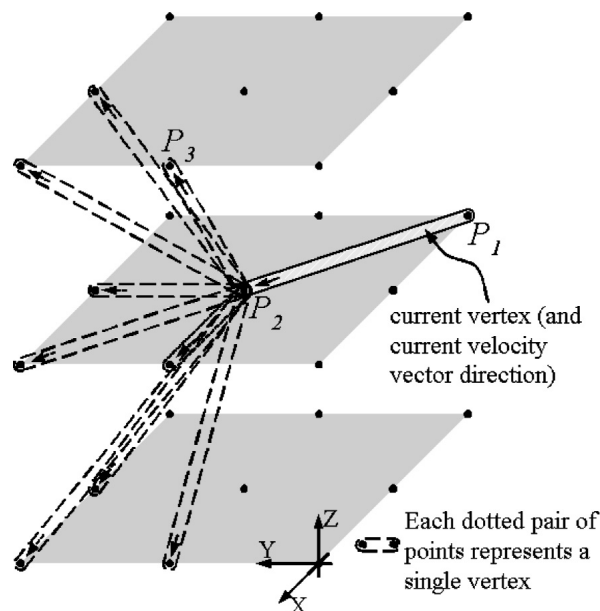


Abbildung 2.20: Von der aktuellen Flugzeugposition P_1 bewegt sich ein Flugzeug mit einem Richtungsvektor $P_2 - P_1$ zum Knoten P_2 . Ausgehend von der Position P_2 können nur diejenigen benachbarten Knoten erreicht werden, zu denen der Kurvenradius nicht überschritten wird. Quelle: [64].

Der kürzeste Weg ist dabei so definiert, dass die bekannten Kosten zwischen den benach-

barten Knoten, die zum Beispiel durch Abstände in nautischen Meilen angegeben werden, minimal sind. Der Dijkstra-Algorithmus untersucht alle benachbarten Knoten von jedem aktuellen Knoten (Basisknoten) aus und berechnet die Kosten in Bezug zum Startpunkt. Bei m -Kanten und n -Knoten wird die Operation zur Bestimmung des nächsten minimalen Knotens n -mal durchgeführt. Schließlich wird die kostengünstigste Abfolge von Knotenpunkten gewählt, welche den Start- und Endpunkt miteinander verbindet.

Wie von Rippel et al. [64] gezeigt wurde, eignet sich der Dijkstra-Algorithmus aufgrund seiner Schnelligkeit auch für die Berechnung kürzester Wege während des Fluges vom Cockpit aus. Für Wetterhindernisse wurde der Algorithmus bisher nicht getestet. Unter Vernachlässigung der teilweise chaotischen Natur der Gewitterphänomene können Algorithmen aus dem Bereich der Robotik zur Planung von Ausweichtrajektorien herangezogen werden.

Sichtbarkeitsgraph-Technik

Die sichere Bewegung eines Roboters in einer Umgebung mit Hindernissen wird im Bereich der Robotik als *the find-path problem* bezeichnet. Als eine der erfolgreichsten Methoden zur Lösung dieses Problems gehört die Sichtbarkeitsgraph-Technik (*VGRAPH*). Diese Technik reduziert zunächst einen beweglichen Roboter auf einen Punkt und erweitert gleichzeitig die Hindernisse in seiner Umgebung um die Dimension des Roboters, wie in Abbildung 2.21 zu sehen ist [65]. Die Hindernisse in der Umgebung des punktförmigen Roboters sind als

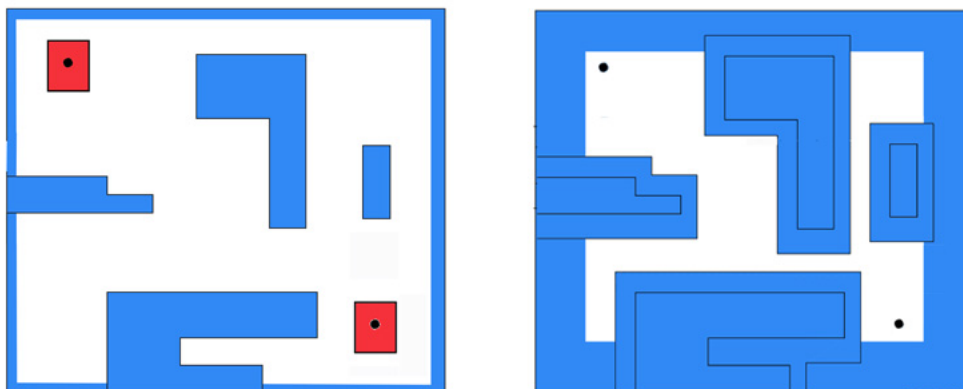


Abbildung 2.21: Die Reduzierung eines Roboters auf einen Punkt bei gleichzeitiger Vergrößerung der Umgebungshindernisse ändert nicht die Konstellation der Aufgabenstellung. Erstellt in Anlehnung an [66].

polygonal und disjunkt angenommen. Für die Erstellung des Sichtbarkeitsgraphen wird untersucht, welche Knoten für den Punktroboter sichtbar sind. Dabei sind zwei Punkte gegenseitig sichtbar, falls ihre Verbindungslinie nicht das Innere eines Hindernisses schneidet

[66]. Die Menge aller für den Punkt-Roboter sichtbaren Punkte wird zu einem Sichtbarkeitspolygon zusammengefasst. Die Suche nach einem kollisionsfreien Weg vom Start- zum Zielpunkt beginnt mit der sogenannten Trapez-Zerlegung. Dafür werden von den Eckpunkten zweidimensionaler Hindernisse vertikale Liniensegmente gezeichnet. Diese Liniensegmente enden entweder in der Begrenzungsebene oder beim Auftreffen auf ein weiteres Hindernis, wie in einem weiteren Beispiel in Abbildung 2.22 zu sehen ist. Zusammen mit zwei benachbarten vertikalen Liniensegmenten werden Trapeze gebildet. Für jedes Trapez wird der Schwerpunkt berechnet, welcher zusammen mit den Mittelpunkten der angrenzenden vertikalen Liniensegmente den hindernisfreien Weg vom Start- zum Zielpunkt erzeugt. Für einen Punktroboter wird schließlich eine Straßenkarte (engl. *road map*) mit zwei möglichen kollisionsfreien Wegen erstellt [66]. Für die Wahl des kürzesten Weges kann der Algorithmus

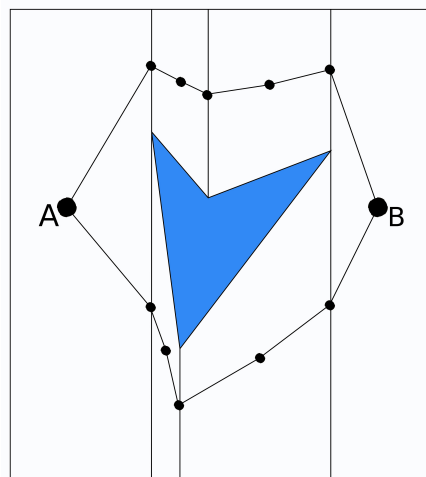


Abbildung 2.22: Zwei kollisionsfreie Wege auf einer Straßenkarte zwischen den Punkten A und B erstellt durch die Trapez-Zerlegung. Erstellt in Anlehnung an [66].

A-Stern (A^*) verwendet werden [67]. Der A^* -Algorithmus und der Dijkstra-Algorithmus sind sich ähnlich. Der Unterschied beim A^* -Algorithmus besteht in der Verwendung einer Heuristik (Schätzfunktion), die ein zielgerichtetes Suchen erlaubt und damit die Laufzeit besonders in Anwesenheit von Hindernissen verringert [68]. Am Institut für Flugführung an der Technischen Universität Braunschweig wird derzeit ein modifizierter A^* -Algorithmus zur Routenfindung durch ein Feld von Gewitterhindernissen eingesetzt [69]. Das dort verwendete Gewitterfeld beinhaltet aktuelle Gewitterpositionen aus aktuellen Radarkompositbildern des DWD in Form von Polygonen mit Radarreflektivitäten oberhalb von 37 dBZ. Die Wahl dieses Schwellwertes wurde bereits im Kapitel 2.1.3 erläutert. Anhand der aktuellen Gewitterpositionen und Windinformationen werden für den nächsten Zeitschritt die Positionen der Gewitterpolygone mit Hilfe eines Algorithmus zur Kurzfristvorhersage bestimmt. Dabei

werden die Gewitterpolygone räumlich verlagert, ohne eine Formveränderung zu erfahren. Die Routenfindung erfolgt dabei bezüglich der aktuell gültigen Gewitterpolygone und beginnt erneut, sobald sich die Positionen der Gewitterpolygone verändern. Eine detaillierte Beschreibung und die Ergebnisse der Studie stehen noch aus.

Lichtausbreitungsalgorithmus

Eine weitere Methode zur Nachbildung des Ausweichverhaltens von Flugzeugen bei Luftraumhindernissen entstand durch die Analogiebildung mit physikalischen Gesetzen der Lichtpropagation und wurde am Laboratoire de Mathématiques Appliquées in Toulouse entwickelt [70]. Dazu gehören etwa die Prinzipien von *Fermat* und *Huygens*, die die Abhängigkeit der

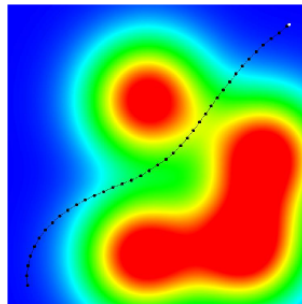


Abbildung 2.23: Die Bewegung eines Flugzeuges im Luftraum mit Flughindernissen kann mit Ausbreitung des Lichts in einem Medium mit variablem Brechungsindex verglichen werden. Gewitter erhöhen den lokalen Brechungsindex (in Rot) und bringen auf diese Weise Flugzeuge zum Ausweichen. Quelle: [70].

Lichtpropagation vom Brechungsindex des umgebenden Mediums beschreiben. Analog dazu werden Flughindernisse (Gewitter oder andere Flugzeuge) im *Light propagation algorithm* (LPA) als lokaler Anstieg im Brechungsindex des Umgebungsmediums betrachtet, wie in Abbildung 2.23 verdeutlicht. Diese stetigen Brechungsindexfluktuationen führen wiederum zur Änderung der gerichteten Flugbewegung vom Start- zum Zielpunkt. Gewitter werden im LPA als stationäre Objekte bekannter Position betrachtet. Auch Positionen anderer Flugzeuge werden berücksichtigt. Aufgrund der langen Rechenzeit beschränkt sich das Aufgabenfeld des LPA bisher auf wissenschaftliche Fragestellungen.

Modell DIVMET

Im folgenden Kapitel wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell mit dem Namen DIVMET (engl. *divert meteorology*) vorgestellt. Die primäre Anwendung von DIVMET ist die Simulation von Flugtrajektorien bei Gewitter anhand der verfügbaren Gewitterinformationen. Dabei sollen nicht nur Ausweichrouten in der Realität besser nachvollzogen werden, sondern vielmehr soll die Entscheidungsfindung im Hinblick auf eine Ausweichroute vereinfacht und optimiert werden. Im ersten Schritt geht es um die Aufbereitung der zur Verfügung stehenden Gewitterinformationen zu sogenannten Risikogebieten. Jedes Risikogebiet umschließt eine für den Flugverkehr potentiell gefährliche Umgebung eines Gewitters. Eine am Rand des Risikogebietes verlaufende Route gilt demnach als sicher. Befindet sich hingegen ein Risikogebiet auf einer geplanten Flugroute, wird dieses in DIVMET als Konflikt identifiziert. Eine Entscheidung zum Ausweichen und die Wahl der Ausweichrichtung werden darauf folgend getroffen. Die Berechnung einer sicheren Route durch ein Gewitterfeld erfolgt im entwickelten Algorithmus MET2ROUTE, der als ein eigenständiges Unterprogramm in DIVMET implementiert ist. Der Algorithmus arbeitet mit dem Ziel, unabhängig von der Anzahl und Anordnung der Gewitterzellen einen sicheren Routenvorschlag zu bestimmen. Mit Hilfe der einstellbaren Simulationsparameter des DIVMET-Modells¹ werden verschiedene Ausweichmanöver bei gefährlichen Schlechtwettersituationen simuliert. Dadurch kann ein Beitrag zur Unterstützung der Arbeit von Lotsen und Flugzeugführern geleistet werden.

¹ Es wird der Entwicklungsstand von 2013 beschrieben.

3.1 Aufbau von DIVMET

Das DIVMET-Modell besteht aus einer Abfolge von Rechenschritten, die sowohl von einem Hauptprogramm (DIVMET) als auch von einem Unterprogramm (MET2ROUTE), wie in Abbildung 3.1 zu sehen ist, ausgeführt werden. Darüber hinaus gibt es eine graphische Benutzeroberfläche (engl. *graphical user interface*, GUI), die einem Benutzer den Umgang mit dem Programm intuitiv zugänglich macht. Zu Beginn werden über die GUI das Wetterszenario, die geplante Flugroute und mehrere Simulationsparameter eingegeben. Während der Berechnung durchläuft das Hauptprogramm eine Schleife, in der für den Schleifenparameter Zeit die aktuelle Flugroute und alle Gewitterpositionen synchronisiert werden. Ausgehend vom Startpunkt der geplanten Route wird das Flugzeug zeitabhängig zu den einzelnen Positionen der eingegebenen Flugroute bewegt. In jedem Zeitschritt bestimmt DIVMET aktuell relevante Risikogebiete aus den eingegebenen Gewitterdaten, die als undurchdringliche Hindernisse im simulierten Luftraum behandelt werden. Beim Verlauf der Flugroute durch mindestens ein Risikogebiet wird im jeweiligen Zeitschritt die Berechnung einer Ausweichroute initiiert und im eigenständigen Unterprogramm MET2ROUTE ausgeführt. Die errechnete Route ersetzt in DIVMET die bis dahin gültige Flugtrajektorie. Anschließend beginnt der Schleifendurchgang im nächsten Zeitschritt erneut und endet, wenn das Flugzeug die Zielposition der geplanten Flugtrajektorie erreicht. Alle Berechnungen in DIVMET erfolgen auf einem festgelegten Höhenniveau und sind daher zweidimensional.

Mit Hilfe der GUI kann die gesamte Simulation, bestehend aus geplanter Flugroute, Wetterszenario, den ermittelten Risikogebieten und der berechneten Ausweichroute, graphisch visualisiert werden. Um die Bewertung der Ausweichroute zu verbessern, wird die graphische Auswertung durch Berechnung quantitativer Größen wie zusätzliche Flugstrecke, Verspätungszeit sowie zusätzlicher Treibstoffverbrauch und CO₂-Ausstoß unterstützt. Die berechneten Größen unterliegen dabei einer rein geometrischen Betrachtung und werden nicht durch aerodynamische Eigenschaften des Flugzeugs korrigiert. Die Bewegung des Flugzeuges erfolgt also kinematisch. Die Simulation einer realitätsnahen aerodynamischen Flugbewegung bei Gewitter unter Einhaltung der Flugverkehrsregeln kann durch eine Kopplung an ein Flugverkehrssimulationsmodell wie zum Beispiel NAVSIM realisiert werden (siehe Kapitel 4.2). Auch um diese Kopplung zu ermöglichen wurde der MET2ROUTE-Algorithmus als ein eigenständiges Unterprogramm umgesetzt.

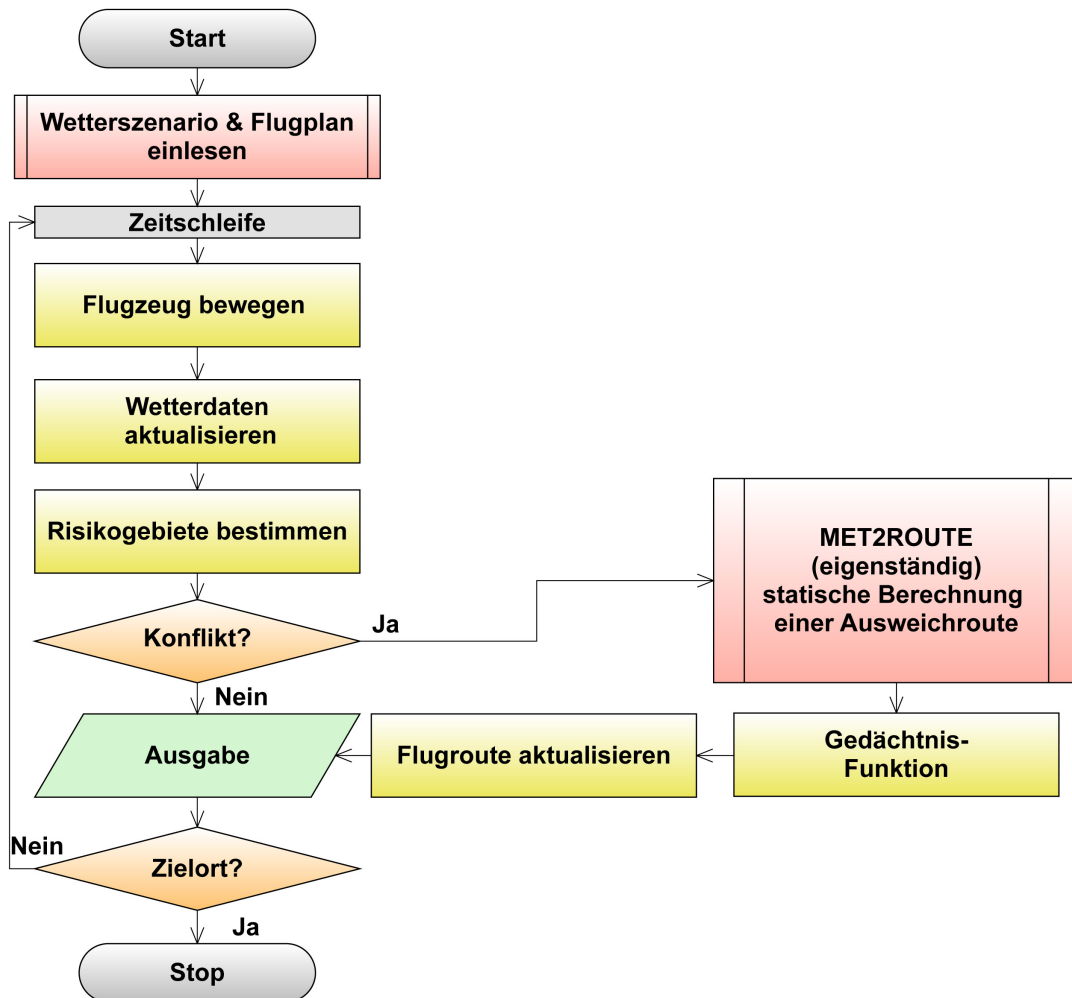


Abbildung 3.1: DIVMET-Modell. Stellt ein Risikogebiet einen Konflikt bezüglich der aktuellen Flugroute dar, initiiert DIVMET die Berechnung einer Ausweichroute im eigenständigen Unterprogramm MET2ROUTE. Die kalkulierte Ausweichroute ersetzt die bis dahin gültige Flugroute. Die Zeitschleife wird fortgesetzt, bis das Flugzeug die Zielposition erreicht hat.

3.1.1 Wetterobjekte

Die Berechnung einer Ausweichroute in DIVMET setzt die Verfügbarkeit von Gewitterdaten voraus. Als Quellen dieser Informationen können zum Beispiel Cb-TRAM-Daten (siehe Kapitel 2.1.3) oder Radarkompositbilder mit extrahierten Signalintensitäten oberhalb eines bestimmten Grenzwertes verwendet werden. In der Regel wird in DIVMET für die Signalstärke ein Grenzwert von 37 Dezibel verwendet, welcher sich am Grenzwert von Rad-TRAM orientiert [30]. Die Erfassung der Lage und Ausdehnung eines Gewitters innerhalb eines festgelegten Höhenniveaus erfolgt dabei mit Hilfe von Polygonen, d. h. durch einen Satz von n unterschiedlichen Punkten p_i . In der hier vorliegenden Anwendung sind die Punkte zweidimensional und beinhalten die geographischen Koordinaten Breitengrad (*latitude*) und Längengrad (*longitude*):

$$p := \{p_1, \dots, p_n\}, p_i \in \mathbb{R}^2, 1 \leq i \leq n, n \geq 3. \quad (3.1)$$

Ferner ist zu beachten, dass ein Polygon aus mindestens drei unterschiedlichen Punkten besteht, die nicht auf einer Geraden liegen. Die n Eckpunkte des Polygons verbinden die Streckenabschnitte $p_i \rightarrow p_{i+1}$ zu n Segmenten oder Randstrecken. Es wird zusätzlich festgelegt, dass jedes eine Wolkenfläche beschreibende Wetterobjekt für sich zusammenhängend ist. Für die mathematische Beschreibung bedeutet das, dass die Polygone zwar konvex oder konkav sein können, jedoch nicht überlappen bzw. einfach sind. Eine Cumulonimbuswolke kann schließlich als eine Zusammensetzung aus zweidimensionalen Wetterobjekten mit entsprechender räumlicher Ausdehnung auf unterschiedlichen Flughöhen betrachtet werden, wie Abbildung 3.2 veranschaulicht. Die Darstellung von Wetterobjekten in Form von einfachen Polygonen erlaubt schnelle Berechnungen durch Verwendung von Methoden der algorithmischen Geometrie.

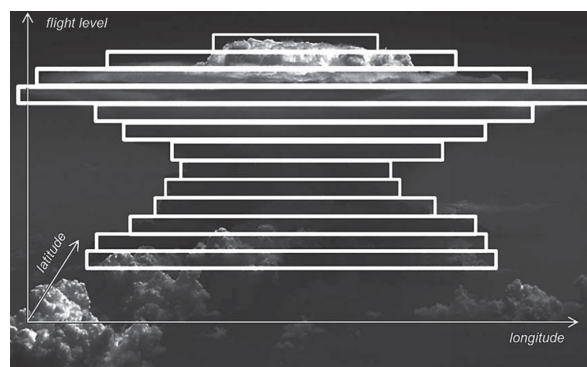


Abbildung 3.2: Numerische Erfassung einer Cumulonimbuswolke als eine Zusammensetzung von einzelnen horizontalen Schichten, die sogenannten Wetterobjekte.

3.1.2 Simulationsparameter

Neben der Flugroute, die durch eine Abfolge von Wegpunkten beschrieben wird, und den zeitabhängigen Wetterobjekten werden für die Berechnung einer Ausweichroute in DIVMET folgende Simulationsparameter einbezogen:

- Sichtfeld
- Sicherheitsabstand zum Wetterobjekt
- mittlere Fluggeschwindigkeit.

Sichtfeld

Der erste wichtige Simulationsparameter ist das Sichtfeld. Dieses wird in DIVMET folgendermaßen definiert: Ein Öffnungswinkel in Grad und ein Radius in nautischen Meilen legen einen Kreissektor ausgehend vom als punktförmig angenommenen Flugzeug fest. Der Radius ist als Sichtweite zu verstehen. Alle Informationen außerhalb des Sichtfeldes werden in der Simulation nicht berücksichtigt (eine Ausnahme stellt die Gedächtnis-Funktion dar, welche in Kapitel 3.1.5 erläutert wird). In der Praxis lässt sich das Sichtfeld im einfachsten Fall als die tageszeitabhängige Sicht des Piloten aus dem Cockpitfenster interpretieren, wie Abbildung 3.3 zeigt.



Abbildung 3.3: Gewitter, betrachtet aus dem Cockpitfenster des DLR-Forschungsflugzeuges Falcon bei einem Messflug. Quelle: [71].

Neben visuellen Informationen können auch Signale von Messinstrumenten, wie etwa vom Bordwetterradar, zum Informationsstand des Sichtfeldes beitragen. Zukünftig könnten im Cockpit eines Flugzeuges auch Wetterprodukte von einem Wetterdienst bereitgestellt

werden. So würde die aktuelle Wettervorhersage, das Nowcasting, zur Vervollständigung des Sichtfeldes eines Piloten beitragen.

Inwieweit die beiden Parameter Öffnungswinkel und Sichtweite, die zusammen das Sichtfeld charakterisieren, die Berechnung einer Ausweichroute beeinflussen, soll im Folgenden verdeutlicht werden. Als Wettersituation dient eine zufällige und statische Anordnung von Gewittern, in den folgenden Abbildungen dargestellt als blaue Kreisflächen. Im ersten Beispiel, in Abbildung 3.4, wird für jedes Wetterobjekt ein Gefahrenbereich mit einem festgelegten Sicherheitsabstand von 5 NM zum Gewitter berechnet. Diese so genannten Risikogebiete werden als rot umrandete Flächen gezeigt. Weiterhin wird in allen vier Teilabbildungen das jeweilige Sichtfeld am Anfangspunkt der geplanten Route dargestellt. Außerhalb des Sichtfeldes liegende Wetterobjekte erscheinen abhängig von der geplanten Flugroute erst zu einem späteren Zeitpunkt im Pilotensichtfeld und können deshalb auch erst mit fortschreitendem Flugverlauf zur Berechnung der Ausweichroute beitragen. Dies wird auch dadurch deutlich, dass nur Wetterobjekte innerhalb des Sichtfeldes zu Risikogebieten vergrößert werden. Abhängig vom jeweiligen Informationsstand stellen die eingezeichneten Ausweichrouten einen Anfangszustand dar, der sich im Verlauf der Simulation zur tatsächlich geflogenen Flugroute entwickelt. In den Beispielen (a) und (b) führen zwei unterschiedliche Kombinationen von Sichtfeldparametern (360°-Rundumsicht und Sichtweite von 30 NM bei (a) sowie 100° Öffnungswinkel und 60 NM Sichtweite bei (b)) zu identischen am Startpunkt berechneten Ausweichrouten. Die zusätzlich erfassten Wetterobjekte im Beispiel (b) haben keine Relevanz, da die zugehörigen Risikogebiete die anfänglich bestimmte Ausweichroute nicht schneiden. Der Verlauf beider Ausweichrouten außerhalb des Sichtfeldes zeigt, dass weitere Gewitterkonflikte im Flugverlauf zu erwarten sind. Am Startpunkt bleiben diese aufgrund des eingeschränkten Sichtfeldes in beiden Fällen unentdeckt. Wird das Sichtfeld jedoch ausreichend groß gewählt, wie in den Beispielen (c) (50° Öffnungswinkel und 150 NM Sichtweite) und (d) (uneingeschränkte Sicht mit der Kenntnis aller Wetterobjekte) zu sehen ist, um alle Gewitterkonflikte auf der Route zu erfassen, kann bereits an der Anfangsposition, noch bevor das Flugzeug zur nächsten Position bewegt wird, eine sichere finale Ausweichroute berechnet werden.

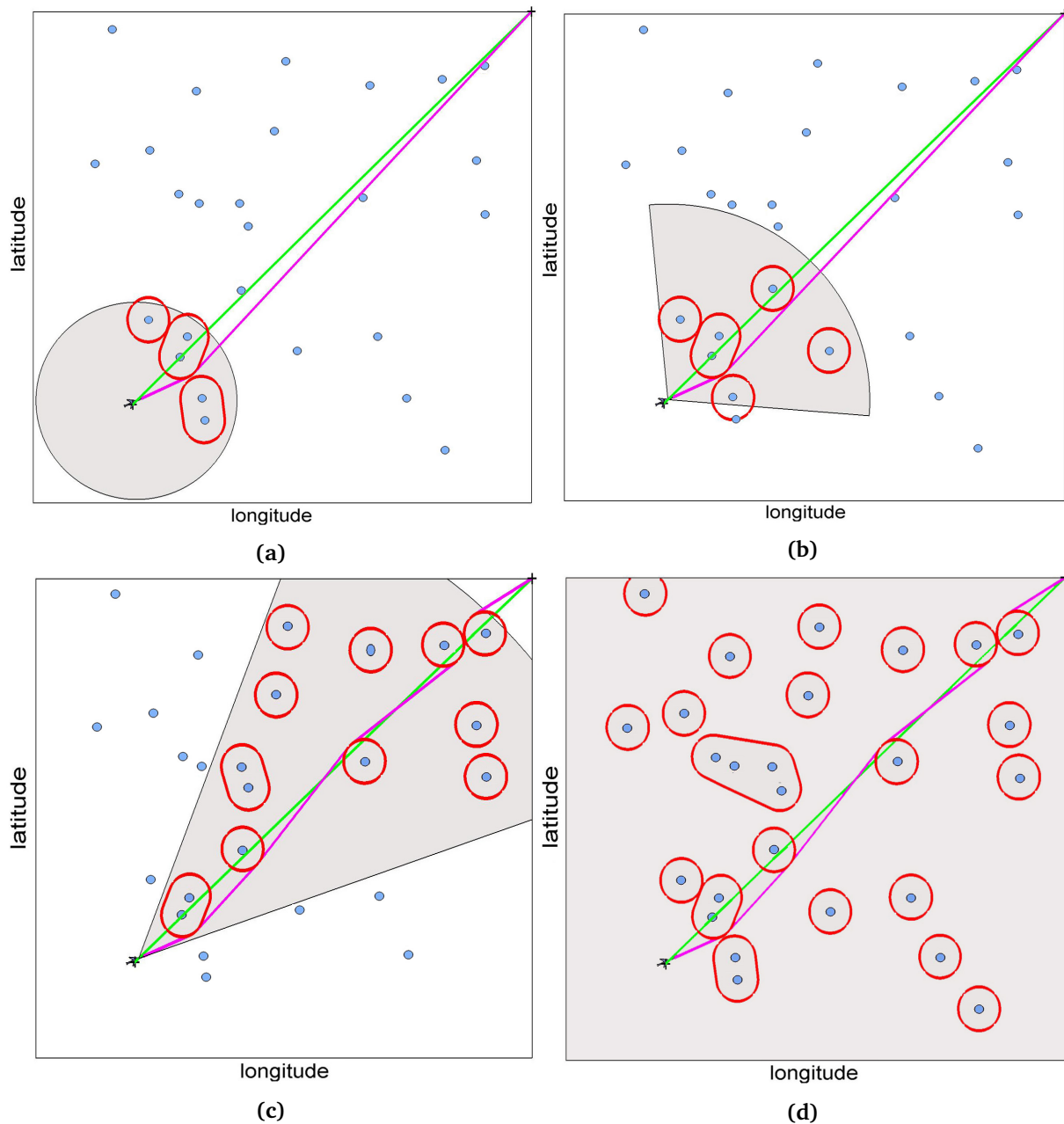


Abbildung 3.4: In einem Feld mit statischen Gewittern und einem Sicherheitsabstand von 5 NM werden für vier Sichtfelder, (a) 360° und 30 NM, (b) 100° und 60 NM, (c) 50° und 150 NM, (d) uneingeschränkte Sicht mit Kenntnis aller Wetterobjekte, die Ausweichrouten berechnet. Die erste Routenberechnung erfolgt auf Grundlage der am Startpunkt verfügbaren, vom Sichtfeld (in Grau) vorgegebenen Gewitterinformationen. Aufgrund der eingeschränkten Sichtfelder in den Beispielen (a) und (b) werden zu erwartende Gewitterkonflikte für den weiteren Flugverlauf nicht erfasst. Die anfänglich berechneten Ausweichrouten (in Magenta) sind daher vorläufig und müssen auf einem späteren Routenabschnitt erneut angepasst werden. Ein ausreichend groß gewähltes Sichtfeld, wie in den Beispielen (c) und (d), erlaubt es, alle Gewitterkonflikte auf der Route zu erfassen und eine sichere finale Ausweichroute zu berechnen, noch bevor das Flugzeug vom Startpunkt zur nächsten Position bewegt wird.

Sicherheitsabstand

Durch die Wahl eines geeigneten Sicherheitsabstandes definiert ein DIVMET-Anwender für jedes Wetterobjekt unabhängig von dessen räumlichen Ausdehnung einen Gefahrenbereich, welcher von Flugzeugen aus Sicherheitsgründen gemieden werden soll. Die Positionen der Wetterobjekte werden dabei als bekannt angenommen. Zwei Faktoren sollen bei der Festlegung dieses Parameters berücksichtigt werden: die Sicherheit und die Effizienz einer Flugroute. Es wird angenommen, dass sich mit zunehmendem Abstand zum Wetterobjekt (unter Ausschluss weiterer Hindernisse) die Flugsicherheit erhöht und ihr Maximum am Rand eines so genannten *Risikogebietes* erreicht, das einem Gefahrengebiet eines Wetterobjektes entspricht (die Methodik zur Berechnung eines Risikogebietes ist in Kapitel 3.1.4 beschrieben). Weiterführende Untersuchungen zur Risikoproblematik sind in [72] zu finden. Die meteorologischen Phänomene, welche die Einführung eines Sicherheitsabstandes begründen, sind in Kapitel 2.1.2 zusammengefasst. Eine unnötig große Abweichung von der geplanten Trajektorie und ein damit verbundenes Risiko für Konfliktsituationen mit anderen Flugobjekten sollen hingegen möglichst gering gehalten werden. Solche Konfliktsituationen werden vom Modell vorerst nicht erkannt. Die räumliche Ausdehnung der Risikogebiete ist allein durch den gewählten Sicherheitsabstand festgelegt. Wird der Parameter auf null gesetzt, entsprechen die Umrisse der Risikogebiete den mit einer konvexen Hülle versehenen Wetterobjekten. Innerhalb eines Risikogebietes, das von DIVMET als undurchdringlich behandelt wird, sind die Gewittergefahren für den Flugverkehr homogenisiert. Eine entlang des Risikogebietes verlaufende Ausweichroute gilt als sicher und effizient. Die Effizienz einer Route kann durch zusätzlichen Treibstoffverbrauch und die Verspätung am Zielort charakterisiert werden. Der festgelegte Sicherheitsabstand bestimmt maßgeblich den Verlauf der berechneten Ausweichtrajektorie, wie Abbildung 3.5 beispielhaft verdeutlicht. Hier führt eine willkürliche Route (grüne Linie) durch eine zufällige Anordnung von statischen Wetterobjekten mit hypothetischer Geometrie (blaue Kreisflächen). In vorliegenden simulierten Szenarien mit identischer Gewittersituation werden Wetterobjekte mit unterschiedlichen Sicherheitsabständen versehen und ergeben somit unterschiedlich große Risikogebiete (in Rot). Angefangen bei (a) mit einem Sicherheitsabstand von 1,5 NM erhöht sich der Wert des Sicherheitsabstandes bis 7 NM bei (d). Die Kenntnis der Positionen und Ausdehnung der zeitlich unveränderlichen Risikogebiete ermöglicht es bereits am Startpunkt, eine hindernisfreie Route zum Zielpunkt zu berechnen. Ein Vergleich der vier simulierten Ausweichrouten bestätigt einen intuitiv erfassbaren Zusammenhang: Mit zunehmendem Sicherheitsabstand erhöht sich die Längendifferenz der Ausweichroute (in Magenta) zur geplanten Route (grüne

Linienfarbe). Während in den Abbildungen 3.5 (a) bis (c) die Ausweichtrajektorie noch zwischen den Risikogebieten verläuft, schließen sich bei (d) die Lücken und die Wetterobjekte bilden Ketten. In der Simulation muss ein Flugzeug diese Gebiete großräumig umfliegen.

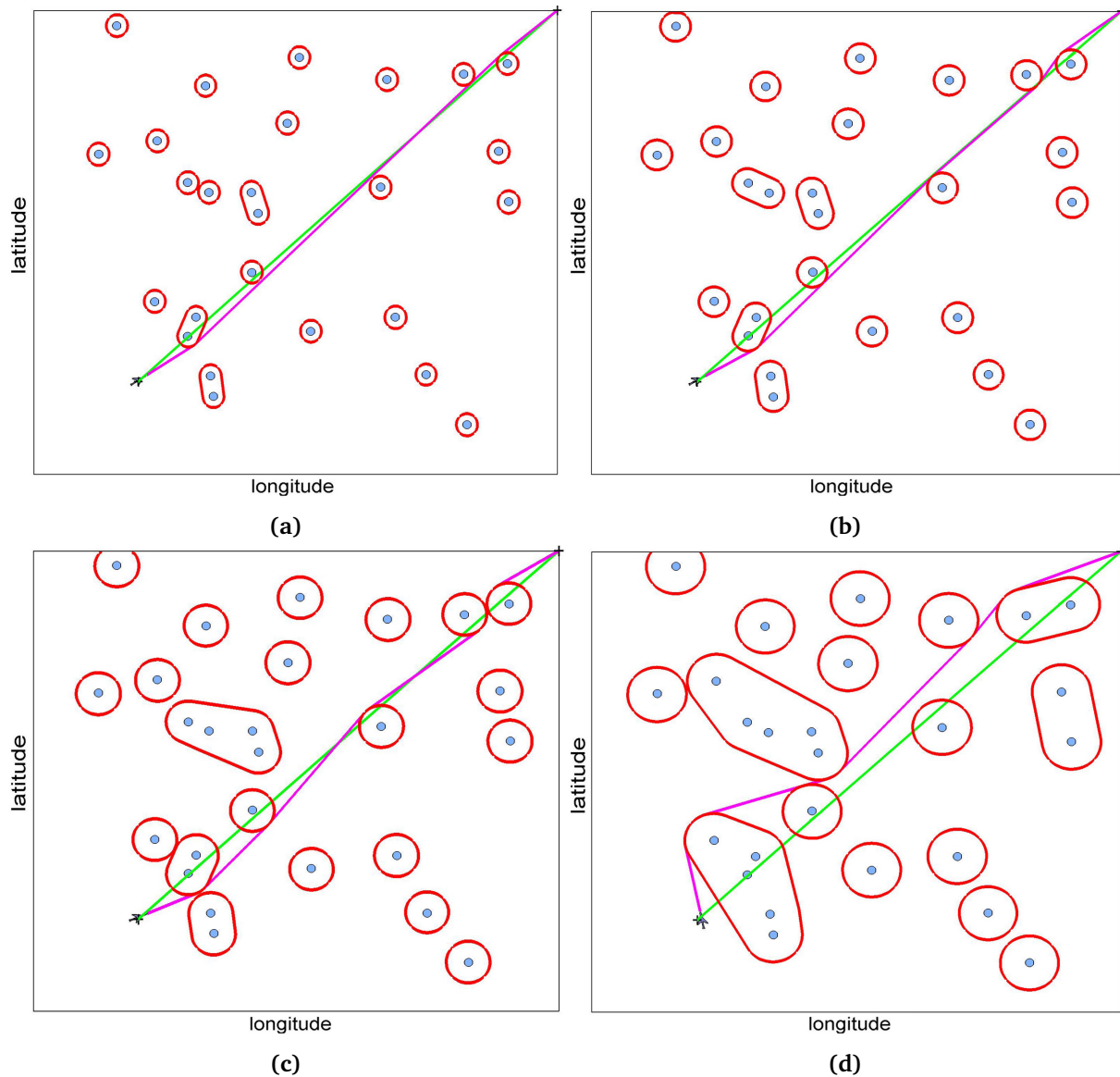


Abbildung 3.5: Eine willkürlich gewählte Flugtrajektorie (in Grün) verläuft durch ein statisches Gewitterfeld mit zufälliger Anordnung (blaue Kreisflächen). Zu den hypothetischen Wetterobjekten werden entsprechend dem gewählten Sicherheitsabstand die zu meidenden Risikogebiete berechnet (in Rot). Die sichere Ausweichroute (in Magenta) hängt vom gewählten Sicherheitsabstand mit (a) 1,5 NM, (b) 3 NM, (c) 5 NM und (d) 7 NM ab. Mit zunehmendem Sicherheitsabstand verschmelzen die Risikogebiete zu großräumigen Risikogebieten, die nur noch ein Ausweichen mit erheblicher Verlängerung der Flugwegstrecke erlauben. In diesem Beispiel wird ein uneingeschränktes Sichtfeld angenommen.

Die Entstehung solcher Ketten und der damit verbundene Anstieg des geflogenen Umweges wurden in mehreren DIVMET-Studien untersucht [73, 74]. Für unterschiedliche geplante Trajektorien in einem Gewitterfeld zeigte sich ab einer Überschreitung des Grenzwertes, der bei eins liegt und damit dem mittleren Abstand zwischen zwei Risikogebieten entspricht, ein nichtlineares Wachstum der normierten zusätzlichen Flugstrecke [75]. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.6 zusammengefasst. Zur Vereinfachung wurden auch hierfür Gewitter als kreisförmig angenommen. Auf der Abszisse ist der normierte Abstand zwischen zwei Risikogebieten aufgetragen. Für die Berechnung wurde der Quotient aus der Summe des mittleren Durchmessers der Risikogebiete und dem doppelten Sicherheitsabstand zum mittleren Abstand eines Risikogebietes zu seinem nächstliegenden Nachbarn gebildet [73]:

$$\text{normierter Abstand} = \frac{\text{mittlerer Durchmesser} + 2 \cdot \text{Sicherheitsabstand}}{\text{mittlerer Abstand}}$$

Die Ordinate bildet die normierte zusätzliche Flugstrecke ab, die einen Quotienten aus dem geflogenen Umweg und der Länge der geplanten Trajektorie darstellt.

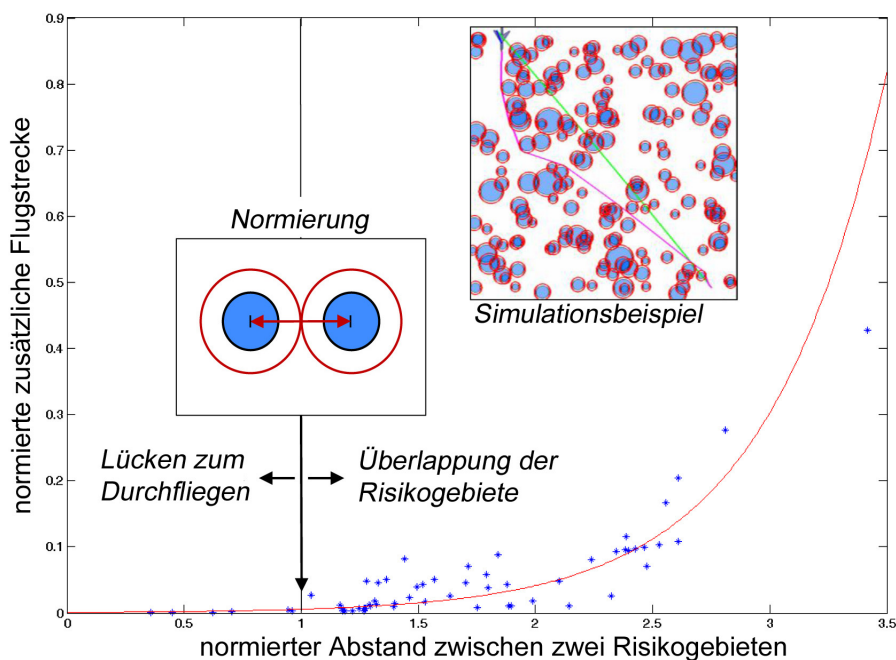


Abbildung 3.6: Die normierte zusätzliche Flugstrecke wächst exponentiell, sobald ein Grenzwert von eins überschritten wird, was einem mittleren Abstand zwischen zwei Risikogebieten entspricht. Erstellt in Anlehnung an [75].

Mit dem einstellbaren Sicherheitsabstand kann in DIVMET auch das individuelle Pilotenverhalten bei Gewitter, wie im Kapitel 2.2.4 bereits diskutiert, abgebildet werden. Dabei werden die Risikobereitschaft des Piloten und der Sicherheitsabstand als voneinander ab-

hängige Größen angenommen, und zwar derart, dass mit steigender Risikobereitschaft der Sicherheitsabstand gegen Null geht. Der Abstand Null bedeutet, dass ein Flugzeug am Rand eines Wetterobjektes fliegt, welches mit einer konvexen Hülle versehen ist. Ein Durchfliegen von Gewittern wird in DIVMET (im Entwicklungsstand von 2013) nicht simuliert. Es kann jedoch passieren, dass ein Flugzeug aufgrund einer Aktualisierung der Wettersituation in ein Gewitter gerät. In solchen Fällen wird entsprechend den Verhaltens-Richtlinien für Piloten bei Gewitter [76] auch in DIVMET der Flug ohne Kursänderung fortgesetzt. Die Vorgehensweise bei Gewitter am Zielort wird in Kapitel 3.1.4 erläutert.

3.1.3 Fallbezogene Simulationsparameterstudie

Die Verwendung der DIVMET-Simulationsparameter Sichtfeld und Sicherheitsabstand erlaubt eine Nachbildung unterschiedlicher Ausweichmanöver bei Gewitter, die wiederum von weiteren bereits diskutierten Faktoren wie Risikobereitschaft und Erfahrung des Flugzeugführers, aktueller Treibstoffverbrauch, Verspätung am Zielort etc. abhängen. Aus der Variation der Simulationsparameter resultiert eine Schar von Trajektorien, aus welcher eine fallbezogene optimale Ausweichroute abgeleitet werden kann. Zusätzlich können Grenzwerte für Simulationsparameter bestimmt werden, bei deren Unterschreitung die Sicherheit der von DIVMET vorgeschlagenen Ausweichroute nicht mehr gewährleistet wird. Im Folgenden werden zwei Simulationsparameterstudien vorgestellt, bei den zuerst der Öffnungswinkel des Sichtfeldes und anschließend die Sichtreichweite variiert werden.

Im ersten Beispiel wurde bei einem Sicherheitsabstand von 7 NM und einer gleichbleibenden Radarreichweite von 80 NM der Öffnungswinkel schrittweise in 10° -Abständen von 20° auf 360° erhöht. Es ergeben sich unterschiedliche Ausweichroutenverläufe, zwei davon sind exemplarisch in Abbildung 3.7 dargestellt.

- Mit einem Öffnungswinkel von 20° erkennt das simulierte Flugzeug an der Anfangsposition lediglich zwei von fünf Wetterobjekten, welche mit gestrichelter Linie in Abbildung 3.7 markiert sind. Daraufhin weicht das Flugzeug aus und registriert während seiner Flugbewegung (blaue Flugtrajektorie) ein weiteres Wetterobjekt, rechts von seiner Ausweichroute. Zwischen diesem Wetterobjekt und den zuerst erfassten Gewitterzellen wird der gewählte Sicherheitsabstand unterschritten. Alle drei Wetterobjekte werden von DIVMET zu einem Risikogebiet zusammenfasst, in welchem sich das Flugzeug aufgrund des fortgeschrittenen Flugverlaufs bereits befindet. Damit ist die Sicherheit der Ausweichroute für dieses Beispiel nicht gewährleistet.

- Eine weitere Trajektorie mit einem Öffnungswinkel von 130° , dargestellt in Magenta, wird geflogen, wenn nur vier der fünf Wetterobjekte an der Anfangsposition detektiert werden. Das außerhalb des Sichtfeldes liegende Wetterobjekt, markiert mit 3 in Abbildung 3.7, trägt nicht zur Berechnung des Risikogebietes zum Startzeitpunkt bei. Erst im Flugverlauf, nachdem eine anfängliche Ausweichrichtung bereits festgelegt wurde (die Wahl der Ausweichrichtung ist in Kapitel 3.2.1 erläutert), wird die Gewitterzelle 3 im Sichtfeld wahrgenommen und daraufhin umflogen. Die daraus resultierende Ausweichroute erfüllt zwar jederzeit das Sicherheitskriterium, ist jedoch insgesamt länger als die errechnete optimale Trajektorie.
- Die errechnete optimale Trajektorie, markiert mit Route II in Abbildung 3.8, wird mit einem Öffnungswinkel ab 140° geflogen.

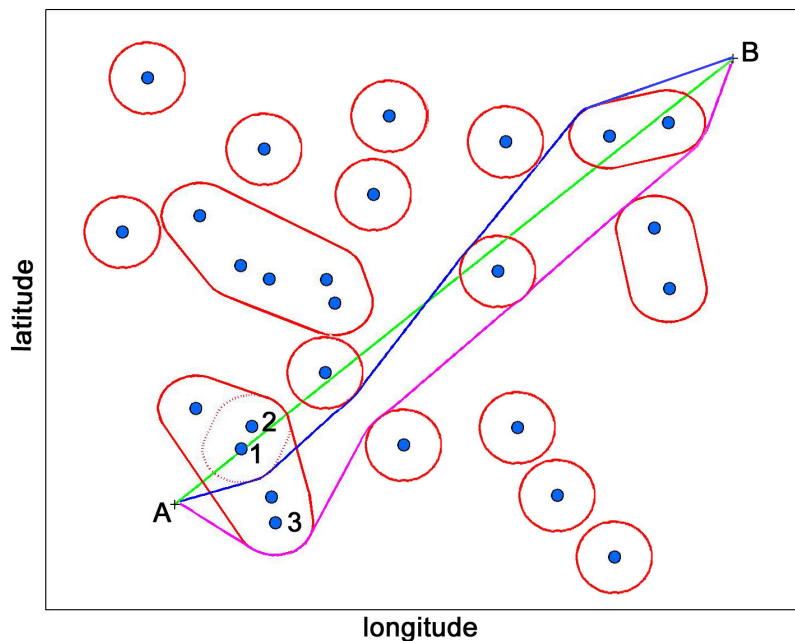


Abbildung 3.7: Zwei exemplarische Ausweichtrajektorien, welche in einer Simulationsparameterstudie durch die Variation des Öffnungswinkels von 20° auf 360° erzeugt werden. Bei einem Flug von A nach B mit einem Öffnungswinkel von 20° wird der Sicherheitsabstand zu nicht detektierten Gewitterzellen bei der blauen Trajektorie unterschritten, da vom ersten Risikogebiet, das aus fünf vereinzelt Wetterobjekten besteht, nur die Wetterobjekte 1 und 2 erfasst werden. Auch bei einem größeren Öffnungswinkel bis 130° werden dort nicht alle Wetterobjekte erfasst. So befindet sich zum Startzeitpunkt bei der Trajektorie in Magenta die Gewitterzelle 3 außerhalb des Sichtfeldes, das Flugzeug weicht hier nach rechts aus. Erst ab einem Öffnungswinkel von 140° sind keine Routenkorrekturen in der Nähe des Startpunktes notwendig. Alle Ausweichrouten verlaufen dann wie die Route II aus Abbildung 3.8.

Nachdem für dieses Beispiel ein optimaler Öffnungswinkel von 140° gefunden wurde, wird dieser Wert für die nächste Simulationsparameterstudie übernommen. Dort wird der Einfluss der Sichtfeldreichweite auf den Verlauf der Ausweichroute bei gleichbleibendem Sicherheitsabstand von 7 NM untersucht. Abbildung 3.8 zeigt zwei exemplarische Flugtrajektorien, die sich infolge einer Erhöhung der Sichtweite von 20 bis 300 NM in 10- NM-Schritten ergeben:

- Die geringste Sichtfeldreichweite von 20 NM ergibt sich in Route I. Charakteristisch bei dieser Trajektorie sind ein längeres Verweilen auf der aktuellen Route und das plötzliche Ausweichen aufgrund der vergleichsweise spät detektierten Hindernisse, wie an den markierten Stellen 1, 2 und 3 zu sehen ist. Route I zeichnet sich also durch größere Headingänderungen aus und ist außerdem für den hier betrachteten Fall am längsten.
- Für Sichtweiten von über 100 NM wird mit Route II die kürzeste Ausweichtrajektorie mit der geringsten Abweichung von der geplanten Route vorgeschlagen.

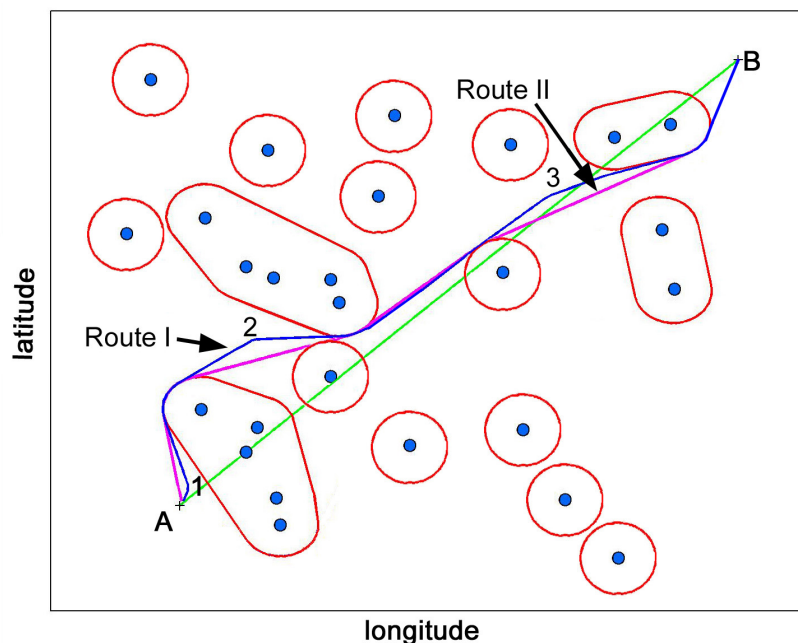


Abbildung 3.8: Variation der Sichtreichweite von 20 bis 300 NM bei einem bereits optimal eingestellten Öffnungswinkel von 140° und einem Sicherheitsabstand von 7 NM. Dargestellt sind zwei exemplarische Routenverläufe von A nach B. Aus der Route I mit einer Sichtweite von 20 NM resultiert ein Flug mit einem längeren Verweilen auf der aktuellen Route mit vergleichsweise großen Headingänderungen an den markierten Stellen 1, 2 und 3. Diese sind auf die späte Erfassung der Routenhindernisse zurückzuführen. Die kürzeste Trajektorie, die Route II, wird bei einer Sichtfeldreichweite von über 100 NM vorgeschlagen.

Zusammenfassend lässt sich angeben, dass die Bestimmung einer sicheren und effizienten Ausweichroute gewisse Merkmale des Sichtfeldes voraussetzt. Hierzu ermöglicht DIVMET die Durchführung von Parameterstudien zur Ermittlung optimaler Sichtfeldeinstellungen bei unterschiedlichen Gewitterlagen. Diese Informationen liefern wiederum einen Hinweis auf das Mindestmaß an erforderlichen Wetterinformationen im Cockpit oder im Kontrollzentrum.

3.1.4 Berechnung von Risikogebieten

Die Untersuchung von Wetterobjekten auf ihr Gefahrenpotential bezüglich der aktuellen Flugroute erfolgt erst, wenn diese vom Sichtfeld des Piloten erfasst werden. Wie bereits beschrieben, wird durch das Sichtfeld der Kenntnishorizont des Piloten simuliert und damit die Entscheidungsgrundlage für sein Verhalten bei Gewitter festgelegt. Aus den zum jeweiligen Zeitpunkt relevanten Wetterobjekten werden in DIVMET Risikogebiete in drei Etappen erzeugt:

1. **Wetterobjekte identifizieren.** Prüfen, welche Wetterobjekte vom Sichtfeld erfasst werden, verdeutlicht als blaue Flächen in Abbildung 3.9(a).
2. **Wetterobjekte vergrößern.** Detektierte Wetterobjekte werden um den definierten Sicherheitsabstand vergrößert, wie in Abbildung 3.9(b) dargestellt. Gewitter oder Gewitteranteile außerhalb des Sichtfeldes werden hierbei nicht berücksichtigt.
3. **Konvexe Hülle bilden.** Die vergrößerten Wetterobjekte werden jeweils auf das kleinste Polygon, das alle Punkte enthält, durch Berechnung einer konvexen Hülle reduziert. Das Platzieren einer konvexen Hülle erhöht bei gleichbleibender Sicherheit die Effizienz einer von DIVMET vorgeschlagenen Ausweichroute, wie im Folgenden noch erläutert wird. Bei Überschneidung mehrerer konvexer Hüllen untereinander erfolgen ihre Addition und erneute Bildung einer konvexen Hülle, wie Abbildung 3.9(c) verdeutlicht. Im Resultat erhält man Risikogebiete, die dann in der Simulation umflogen werden.

Wetterobjekte identifizieren

Für die Identifikation der Gewitter im Sichtfeld werden alle in der Simulation vorhandenen Wetterobjekte auf ihr Erscheinen im Sichtfeld untersucht. Dafür wird das Sichtfeld ebenfalls

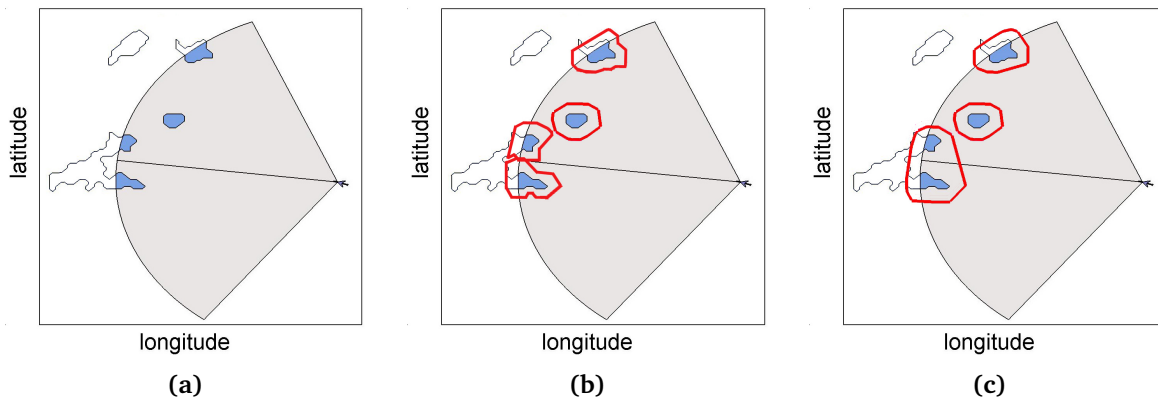


Abbildung 3.9: Nach erfolgreicher Identifikation der Wetterobjekte im Sichtfeld (blaue Flächen in (a)) werden diese um den Sicherheitsabstand vergrößert (b) und mit konvexen Hüllen versehen (c). Bei Überschneidung der konvexen Hüllen untereinander erfolgen ihre Addition und erneute Darstellung als konvexe Hülle (c). Daraus resultierende Polygone werden in DIVMET als Risikogebiete bezeichnet und sollen von Flugzeugen in der Simulation gemieden werden.

wie die Wetterobjekte als ein Polygon modelliert. Somit reduziert sich das Erfassen von Gewittern innerhalb eines Sichtfeldes auf eine Berechnung von Schnittflächen zweier Polygone. Das Ergebnis der Schnittflächenberechnung kann dem Gewitterpolygon selbst entsprechen, wenn die Zelle vollständig im Sichtfeld enthalten ist. Oder aus der Schnittflächenberechnung resultiert eine vom Gewitterpolygon abweichende Fläche, was bedeutet, dass das Gewitter vom Sichtfeld nur teilweise erfasst wird. Auch mehrere Schnittflächen können zum selben Wetterobjekt gehören, wie in Abbildung 3.10 gezeigt, die dann in DIVMET als einzelne Objekte betrachtet werden. Die restlichen Gewitterpolygone, die nicht im Sichtfeld erscheinen, sind in Abbildung 3.10 als Konturen dargestellt. Sie sind für die weitere Betrachtung im aktuellen Kalkulationszyklus nicht relevant.

Eine Methode zur Berechnung von Schnittflächen zweier beliebiger zweidimensionaler Polygone stellt der *Vatti-Algorithmus* [77] dar. Dieser wurde nach Bala R. Vatti benannt und ermöglicht auch die Berechnung von Vereinigung, Differenz und Exklusiv-Oder, was eine Umkehrung der Schnittflächenberechnung darstellt. Aufgrund seiner Schnelligkeit und Genauigkeit wurde der Vatti-Algorithmus an mehreren Stellen in DIVMET implementiert.

Wetterobjekte vergrößern

Jedes im Sichtfeld des Flugzeuges identifizierte Wetterobjekt wird in DIVMET um den festgelegten Sicherheitsabstand vergrößert. Mit dieser Vergrößerung wird die Einhaltung des Mindestsicherheitsabstandes zum Gewitter bei der Routenberechnung gewährleistet.

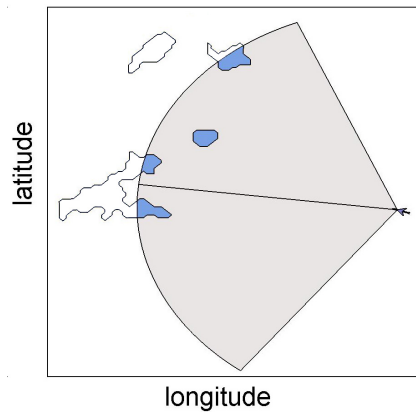


Abbildung 3.10: Wetterobjekte werden abhängig von ihrer relativen Position zum Sichtfeld entweder komplett, gar nicht oder partiell erfasst. Zwei am Rand des Sichtfeldes befindliche Wetterobjekte, die zu derselben Gewitterwolke gehören, werden als voneinander unabhängig betrachtet. Außerhalb des Sichtfeldes liegende Gewitter sind durch ihre Konturen abgebildet.

Zwei Gründe rechtfertigen diese Vergrößerung: Zum einen ist die Gefahr für Flugzeuge, wie bereits im Kapitel 2.1.6 diskutiert, nicht auf das Wetterobjekt beschränkt. Zum anderen sind die Positionsdaten je nach Datentyp mit Unsicherheiten behaftet.

Die Vergrößerung eines einfachen Polygons erfolgt in drei Schritten. Wie Abbildung 3.11 verdeutlicht, werden zuerst um jeden Eckpunkt des Polygons Kreisbögen gebildet, deren Radius dem gewählten Sicherheitsabstand S entspricht. Im zweiten Schritt werden an jedes

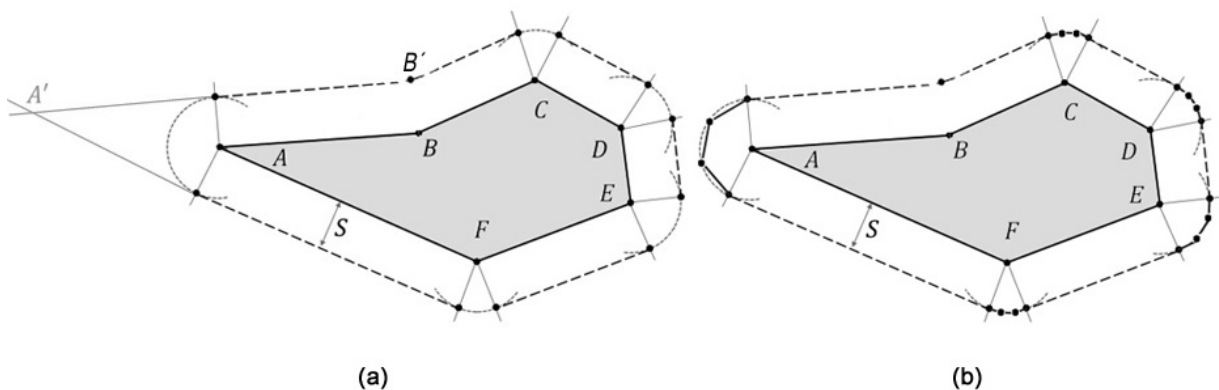


Abbildung 3.11: Vergrößerung eines einfachen Polygons ABCDEF um einen Sicherheitsabstand S . Mit Hilfe der Kreisbögen und der äußeren Tangenten wird dieses Objekt vergrößert (a) und anschließend polygonisiert (b).

Paar von nebeneinander liegenden Kreisbögen äußere Tangenten konstruiert. Die Tangenten müssen die Zusatzbedingung erfüllen, dass sie parallel zum entsprechenden Streckenabschnitt des zu vergrößernden Polygons verlaufen. Abhängig von der Größe des Winkels, der durch die beiden Verbindungslinien zum vorangegangenen und zum nachfolgenden

Polygoneckpunkt gebildet wird, unterscheidet sich die weitere Vorgehensweise:

- Für Winkel $\alpha \geq 180^\circ$ wie zum Beispiel $\angle ABC$ wird ein Schnittpunkt B' der benachbarten Tangenten berechnet, wie in Abbildung 3.11(a) gezeigt ist.
- Bei einem Winkel $\alpha < 180^\circ$ wie zum Beispiel $\angle CDE$ werden die Berührungspunkte der Tangenten auf den Kreisbögen bestimmt. Zwei Berührungspunkte grenzen dabei einen Kreisbogen ein. Die Berechnung eines Schnittpunktes der Tangenten wie bei einem Winkel $\alpha \geq 180^\circ$ würde den gewählten Sicherheitsabstand S erheblich überschreiten. Dies verdeutlicht der Schnittpunkt A' beim Winkel $\angle FAB$ in Abbildung 3.11(a).

Alle Tangentschnittpunkte sowie die Berührungspunkte mit den Kreisbögen bilden eine Figur, deren Kontur einem um den Sicherheitsabstand S nach außen vergrößerten Polygon entspricht. In einem weiteren Schritt wird aus der erzeugten Figur wieder ein Polygon erstellt. Dabei ist zu beachten, dass jedes auf diese Weise erzeugte Polygon möglichst aus einer geringen Anzahl von Eckpunkten bestehen soll. Dazu ist es erforderlich, die Kreisbögen durch eine endliche Anzahl von Eckpunkten zu ersetzen (die Berechnung der Eckpunkte ist im Anhang 6 beschrieben). Die sich ergebenden Verbindungslinien unterschreiten den Sicherheitsabstand S zwangsläufig. Bei Winkeln $\alpha < 90^\circ$ bzw. größeren Kreisbögen wie beim Eckpunkt A in Abbildung 3.11(b) ist die Unterschreitung deutlich zu erkennen. Die Reduktion der Eckpunktzahl wirkt sich bei einer großen Anzahl von Gewittern positiv auf die Rechenzeit von DIVMET aus. Darüber hinaus kann sich die beschriebene Unterschreitung bei Simulationen mittels eines Luftverkehrsmodells mit Berücksichtigung einer realistischen Fluggeometrie relativieren.

Konvexe Hülle bilden

Um jedes vergrößerte Wetterobjekt wird im nächsten Schritt eine konvexe Hülle gelegt, die per Definition die kleinste konvexe Menge darstellt, welche die Ausgangsmenge enthält [78]. Die Berechnung einer konvexen Hülle in DIVMET erfolgt mit Hilfe des Algorithmus *Graham's Scan* [79], welcher im Anhang 6 beschrieben ist. Die Verwendung von konvexen Hüllen statt vergrößerter Wetterobjekte ist darin begründet, dass mit DIVMET grundsätzlich die kürzeste Strecke gesucht wird. Wie im Folgenden noch erläutert wird, bestimmt DIVMET eine Ausweichroute um ein Risikogebiet derart, dass sich die Route um das Risikogebiet wie ein Seil schmiegt. Ohne die Verwendung konvexer Hüllen würde die errechnete Route in der Regel nicht nur insgesamt länger werden, sondern auch unnötige Kursänderungen

bei Buchten enthalten, in welche ein Pilot, wenn er die Buchten als solche erkennt, keinesfalls hineinfliegen würde. Abbildung 3.12(a) verdeutlicht diesen Sachverhalt. Zusätzlich überprüft DIVMET alle errechneten konvexen Hüllen auf ihre Überschneidung untereinander. Im positiven Fall erfolgt mit Hilfe der Polygonadditionsmethode nach Vatti [77] die Bestimmung eines resultierenden Additionspolygons, welches ebenfalls mit einer konvexen Hülle versehen wird. Diese Prozedur wiederholt sich bis alle Risikogebiete keine weiteren Überschneidungen untereinander aufweisen. Wie bereits diskutiert, können auf diese Weise entstandene konvexe Hüllen auf die Größe eines Flugsektors heranwachsen. Falls ein großräumiges Ausweichen nicht erwünscht ist, kann der festgelegte Sicherheitsabstand manuell in aufeinanderfolgenden Simulationen verringert werden, um so das Heranwachsen von Risikogebieten zu dämpfen und um ggf. einer erhöhten Risikobereitschaft des Piloten in solchen Situationen Rechnung zu tragen.

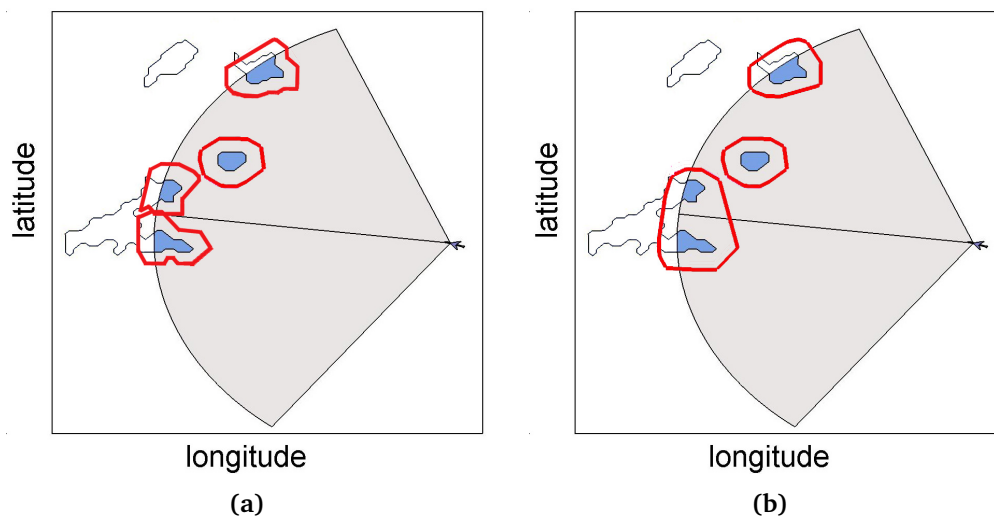


Abbildung 3.12: Um den Sicherheitsabstand vergrößerte Wetterobjekte (in Rot) weisen unregelmäßige und eckige Konturen auf (a). Diese werden mit Hilfe konvexer Hüllen vereinfacht. Bei Überschneidung konvexer Hüllen untereinander erfolgt ihre Addition wobei um das resultierende Polygon erneut eine konvexe Hülle bestimmt wird (b).

Eine weitere Situation, die im Zusammenhang mit konvexen Hüllen diskutiert werden soll, ist ein Gewitter am oder in der Nähe des im Flugplan festgelegten Zielortes. Abhängig vom gewählten Sicherheitsabstand ergeben sich unterschiedliche Risikopotentiale, die in DIVMET in vier Kategorien unterteilt werden, wie in Abbildung 3.13 dargestellt:

1. Das geringste Risiko liegt vor, wenn sich der Zielort außerhalb des Risikogebietes befindet, wie bei der Position 1 in Abbildung 3.13. Zu dieser Position kann ohne weitere Anpassung eine Ausweichroute in DIVMET gefunden werden.

2. Ein vergleichbares Risikoniveau weist die Position 2 auf. Hier befindet sich der Zielort in einer Bucht des um den Sicherheitsabstand vergrößerten Wetterobjektes, die durch die konvexe Hülle des Risikogebietes geschlossen ist. Durch Entfernung der konvexen Hülle an dieser Stelle kann der Zielort in der Bucht wieder erreicht werden.
3. Befindet sich der Zielort innerhalb des vergrößerten Wetterobjektes, wie bei Position 3, ist von einem erhöhten Risikoniveau auszugehen. Damit der Zielort erreicht werden kann und um die Berechnung der Ausweichroute abzuschließen, wird für das Gewitter in Zielortnähe das Risikogebiet mit einem verringerten Sicherheitsabstand erneut kalkuliert. Der Sicherheitsabstand wird dabei dann schrittweise reduziert, bis das Umfliegen bei diesem Objekt mit geringerem Abstand möglich wird.
4. Das höchste Risikoniveau liegt vor, wenn sich der Zielort innerhalb des Wetterobjektes, wie bei der Position 4, befindet. In diesem Fall muss für das Erreichen des Zielortes das Risikogebiet von DIVMET ignoriert werden. Entsprechendes Verhalten beim Anflug wird häufig im realen Flugverkehr beobachtet, wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben ist. Etwaige Holdingmaßnahmen, die in Realität ergriffen werden würden, sind derzeit nicht in DIVMET implementiert.

Weiterhin muss beachtet werden, dass bei Wetterobjekten mit speziellen Anordnungen wie bei einer *squall line* die Verwendung konvexer Hüllen zum Schließen möglicher Lücken zwischen den einzelnen Gewittern führen kann, womit die kalkulierten Ausweichrouten realitätsfern lang werden. Diese Situation wird in DIVMET erkannt und gesondert behandelt, worauf im Anhang 6.5 eingegangen wird.

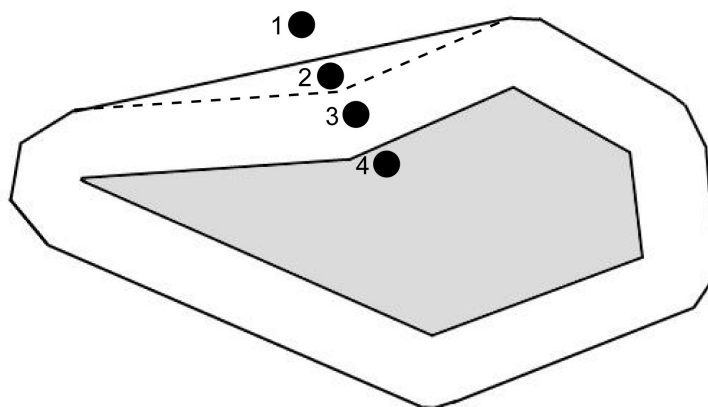


Abbildung 3.13: Beim Gewitter am oder in der Nähe des Zielortes unterscheidet DIVMET vier verschiedene Positionen: Zielort außerhalb des Risikogebietes (1), Zielort außerhalb des vergrößerten Wetterobjektes und innerhalb der konvexen Hülle (2), Zielort innerhalb des vergrößerten Wetterobjektes und außerhalb des Wetterobjektes selbst (3) sowie Zielort innerhalb des Gewitterpolygons (4).

3.1.5 Die Gedächtnisfunktion

Bei der Simulation eines Fluges mit einem limitierten Sichtfeld ändert sich im Flugverlauf und vor allem bei Richtungsänderungen der erfasste Informationsgehalt über die Wettersituation zum Teil erheblich. Die Ansammlung von Informationen über Risikogebiete ist Aufgabe der Gedächtnisfunktion. Genau wie ein Pilot sich im Vorbeiflug an bereits visuell erfasste Wetterobjekte erinnern kann, die nicht mehr im aktuellen Sichtfeld enthalten sind, speichert die Gedächtnisfunktion von DIVMET alle durch das Sichtfeld im Flugverlauf bereits erfassten Gewittergeometrien zum Zeitpunkt ihrer letzten Detektion und berücksichtigt diese bei der weiteren Entscheidungsfindung. Inwiefern die vorangegangenen Gewitterinformationen die Sicherheit der aktuellen Entscheidungen beeinflussen können, zeigt das Beispiel aus Abbildung 3.14.

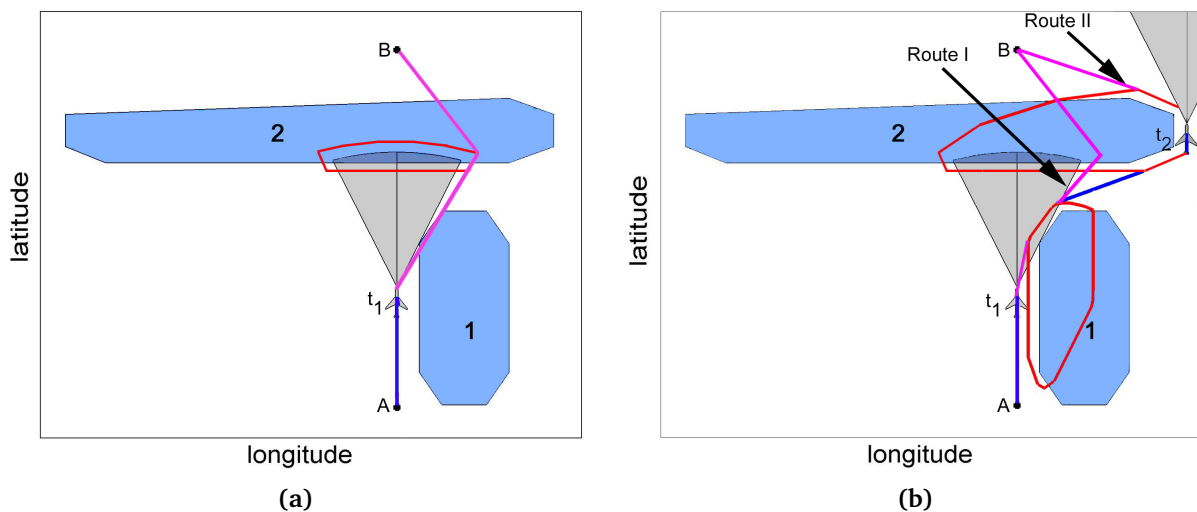


Abbildung 3.14: Für die Berechnung einer Ausweichroute ohne die Gedächtnisfunktion werden nur die aktuellen Gewitterinformationen im Sichtfeld berücksichtigt. Die dann vorgeschlagene Ausweichroute zum Zeitpunkt t_1 , dargestellt in Magenta, schneidet das Risikogebiet 1 (a). Die Aktivierung der Gedächtnisfunktion für den gleichen Fall speichert vorangegangene Gewitterinformationen und berücksichtigt diese bei Berechnung der Ausweichroute. Mit der vorgeschlagenen Ausweichroute I zum Zeitpunkt t_1 wird daher zu jedem Zeitpunkt der Sicherheitsabstand zu beiden Wetterobjekten eingehalten (b).

Hier bewegt sich ein Flugzeug zunächst auf seiner geplanten Trajektorie, wobei das erfasste Risikogebiet (1) die Route nicht schneidet und somit kein Hindernis darstellt. Ein weiteres Risikogebiet quer zur Flugroute (2) zwingt das Flugzeug zum Ausweichen. Ohne die Gedächtnisfunktion würde die zum Zeitpunkt t_1 berechnete Ausweichroute zum Teil durch das erste Risikogebiet verlaufen, wie in Abbildung 3.14(a) gezeigt. Die vorgeschlagene Ausweichroute, dargestellt in Magenta, ist daher nicht sicher. Erst beim Abfliegen der Ausweichroute würde

das erste Risikogebiet (1) als Hindernis für die Flugroute identifiziert werden und daraufhin eine erneute Kalkulation der Ausweichroute auslösen. Im Vergleich dazu werden bei der Berechnung der Ausweichroute mit der aktivierten Gedächtnisfunktion von vornherein beide Risikogebiete berücksichtigt. Die zum Zeitpunkt t_1 berechnete und in Abbildung 3.14(b) dargestellte Ausweichroute I ist dann sicher. Aufgrund des eingeschränkten Sichtfeldes wird Route I im weiteren Flugverlauf zu Route II korrigiert. Es lässt sich erkennen, dass mit der geflogenen Trajektorie zu jedem Zeitpunkt der Sicherheitsabstand eingehalten wird. Aufgrund ihrer Sicherheitsrelevanz ist die Gedächtnisfunktion standardmäßig in DIVMET aktiviert. Es gibt jedoch Fälle, bei denen das Sichtfeld im Vergleich zur aktuellen Route hinreichend groß ist und die Risikogebiete in ihrer Vielzahl im Flugverlauf unverändert bleiben. Dann könnte die Speicherung aller Gewitterinformationen über mehrere Simulationszeitschritte hinweg, zum Beispiel bis zur nächsten Aktualisierung der Wetterobjekte, und ihre Berücksichtigung bei der Berechnung der Ausweichroute die Rechenzeit erheblich erhöhen. In solchen Fällen lässt sich die Gedächtnisfunktion¹ vor Simulationsbeginn deaktivieren.

3.1.6 Konflikterkennung

Die errechneten Risikogebiete stellen in DIVMET undurchdringliche Luftraumhindernisse dar, die von Flugzeugen gemieden werden sollen. Inwieweit diese die aktuelle Flugroute beeinträchtigen, wird mit einer Konflikterkennungsfunktion überprüft. Ein Konflikt liegt vor, wenn mindestens ein Risikogebiet aus dem aktuellen Sichtfeld die Flugroute schneidet. Darüber hinaus, wie im Abschnitt 3.1.5 erläutert, kann auch die Gedächtnisfunktion aufgrund eines Einflusses von zu früheren Zeitpunkten erfassten Risikogebieten einen Konflikt auslösen. Da sich das Flugzeug bewegt und weil sich die Wettersituation ändern kann, unterliegt die Konflikterkennung einer zeitabhängigen Dynamik. Risikogebiete, die zur selben Gewitterwolke gehören, können ein unterschiedliches Konfliktpotential zu verschiedenen Zeitpunkten aufweisen. Dies verdeutlicht Abbildung 3.15. In diesem Beispiel werden Risikogebiete zum Zeitpunkt t_1 zwar erfasst, zunächst jedoch nicht als Wetterkonflikte betrachtet. Das Flugzeug bewegt sich auf seiner geplanten Route (in Grün) weiter. Erst zu einem späteren Zeitpunkt t_2 löst ein Risikogebiet einen Konfliktfall aus, dem eine Ausweichroutenkalkulation folgt. Die Flugbewegung wird dann auf der berechneten Ausweichroute (in Magenta) fortgesetzt, bis erneut ein Konflikt auftritt und damit ein Ausweichroutenvorschlag zum Zeitpunkt t_3 berechnet wird. Für die Konflikterkennung ist es unerheblich, ob sich ein Konflikt aufgrund

¹ In einer späteren DIVMET-Version wurde die Gedächtnisfunktion untersucht und weiter optimiert [80].

der Flugzeugbewegung oder der Änderung von Gewitterpositionen ereignet. Der folgende Abschnitt erklärt die Kalkulation der Ausweichroute in MET2ROUTE.

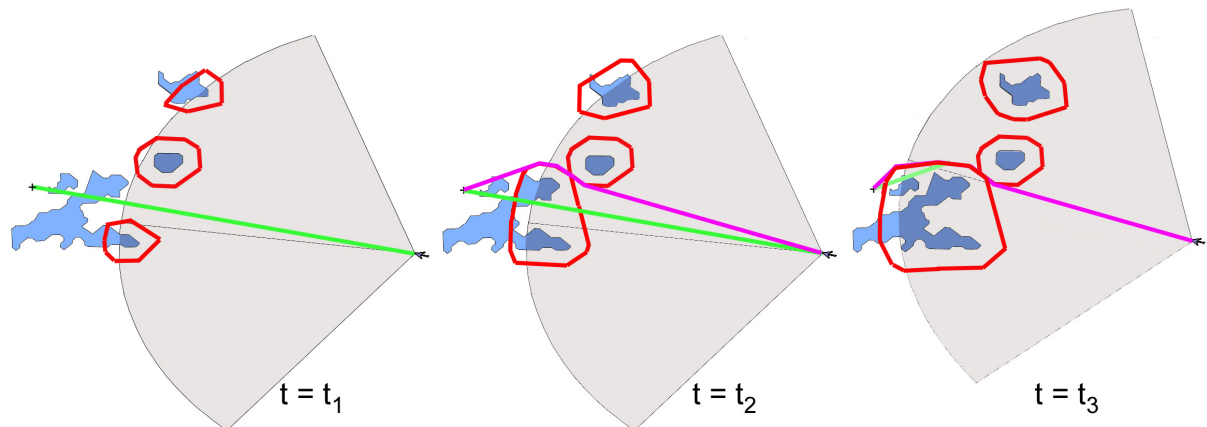


Abbildung 3.15: Konflikterkennung im Flugverlauf mit eingeschränktem Sichtfeld exemplarisch für drei diskrete Zeitpunkte t_1 , t_2 und t_3 dargestellt. Das simulierte Flugzeug bewegt sich auf der aktuellen Route (in Grün), bis ein Konflikt aufgrund eines Risikogebietes ausgelöst wird. Die Flugbewegung wird zum Zeitpunkt t_2 auf einer Ausweichroute (in Magenta) fortgesetzt. Im Flugverlauf gelangen weitere Abschnitte desselben Wetterobjektes ins aktuelle Sichtfeld. Erneute Konflikte führen zur Anpassung der aktuellen Ausweichroute an die aktuelle Wettersituation, wie zum Zeitpunkt t_3 zu erkennen ist.

3.2 Ausweichtrajektorie in MET2ROUTE

Im Konfliktfall erfolgt die Berechnung einer Ausweichroute durch den MET2ROUTE-Algorithmus. Zum Informationsstand tragen alle aktuellen Risikogebiete sowie vorangegangenen Risikogebiete aus der Gedächtnisfunktion bei. Alle Risikogebiete werden als undurchdringliche stationäre Hindernisse behandelt. Ihr meteorologischer Hintergrund hat für die Ausweichroutenberechnung keine Relevanz. Für einen MET2ROUTE-Durchlauf sind Informationen zur aktuellen Flugtrajektorie erforderlich. Diese werden durch DIVMET bereitgestellt. Es werden mindestens zwei Positionen übergeben, die aktuelle Position A des Flugzeuges sowie der Zielpunkt B der geplanten Route. MET2ROUTE sucht dann eine hindernisfreie Route von A nach B durch das übergebene Feld von Risikogebieten. Je nach Situation findet das Unterprogramm bereits im ersten Durchlauf eine konfliktfreie Trajektorie bis zum Routenendpunkt oder es können für die Berechnung einer Ausweichroute auch mehrere Durchläufe von MET2ROUTE erforderlich sein. Jeder ProgrammDurchlauf besteht aus einer identischen Abfolge von Funktionen:

1. Konflikterkennung für die aktuelle Route,

2. Bestimmung der Ausweichrichtung,
3. Berechnung der Ausweichroute für ein *oder* für zwei Hindernisse und
4. erneute Konflikterkennung für die berechnete Ausweichroute.

Im Konfliktfall, also beim Auftreten von mindestens einem relevanten Hindernis auf der übergebenen Route, folgt die Bestimmung einer Ausweichrichtung und die Berechnung einer Ausweichroute für dasjenige Hindernis, welches als erstes die Route schneidet und daher als primäres Objekt bezeichnet wird. Falls die berechnete Ausweichroute mit mindestens einem weiteren Risikogebiet hinter dem primären Objekt in Konflikt tritt, dies wird durch den Programmteil Konflikterkennung überprüft, wird im nächsten Programmdurchlauf die Funktion zur Berechnung der Ausweichroute für zwei Objekte aufgerufen. Die folgenden Abschnitte nehmen im Detail Bezug darauf. Das Unterprogramm wird beendet sobald eine konfliktfreie Trajektorie von *A* nach *B* gefunden wurde. In DIVMET wird die Simulation mit der berechneten Ausweichtrajektorie im nächsten Zeitschritt fortgeführt. Schneidet die gefundene Ausweichroute im Simulationsverlauf weitere Routenhindernisse, erfolgt eine erneute Ausweichroutenberechnung durch MET2ROUTE.

3.2.1 Ausweichrichtung

Für die Wahl der Ausweichrichtung gibt es für Flugzeugführer keine allgemeingültige Empfehlung, wie bereits in Kapitel 2.2.3 diskutiert wurde. Der Gesamteindruck des Piloten von allen im Cockpit verfügbaren Informationen zu aktuellen Gewitteraktivitäten ist als Entscheidungsgrundlage daher naheliegend. Eine Möglichkeit diesen Gesamteindruck nachzuzahlen ist eine richtungsabhängige Aufteilung aller auf der Route liegenden Hindernisse in Flächenbereiche links und rechts von der aktuellen Route. Je mehr Routenhindernisse auf einer Seite der Trajektorie vorzufinden sind, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit für ein erfolgreiches Ausweichmanöver in dieselbe Richtung. Die Berücksichtigung aller Gewitter, die als Routenhindernisse für die Bestimmung der Ausweichrichtung fungieren, wird im Folgenden als *flächenbezogenes integrales Kriterium* (Entscheidungskriterium E1) bezeichnet. Risikogebiete fernab der Route stellen zunächst keinen Konflikt dar und werden deshalb außer Acht gelassen. Sie können jedoch können sie eine errechnete Ausweichroute schneiden und damit weitere Konflikte auslösen. Neben dem flächenbezogenen integralen Kriterium wurden mit DIVMET weitere Möglichkeiten zur Bestimmung der Ausweichrichtung getestet:

- Die Anwendung des Flächenkriteriums nur auf das primäre Objekt (Kriterium E2). Bei diesem Kriterium werden Informationen zu weiteren Risikogebieten, unabhängig von ihrem Konfliktpotential, nicht zur Entscheidungsfindung herangezogen.
- Die Bestimmung der maximalen lateralen Ausdehnung unter allen Hindernissen bezüglich der aktuellen Position orthogonal zur Flugrichtung (Kriterium E3). Mit diesem Kriterium wird für beide Richtungen die größte zu erwartende Heading-Änderung des Flugzeuges beim Umfliegen der Hindernisse ermittelt.
- Zufällige Wahl der Ausweichrichtung.

Unabhängig vom gewählten Kriterium bezieht sich die Festlegung der Ausweichrichtung immer auf das nächste zur aktuellen Position liegende Routenhindernis, das primäre Objekt. Dadurch kann es unabhängig vom festgelegten Kriterium, bei mehr als einem Hindernis, zu Unterschieden in den Routenverläufen kommen, wenn die Start- und Zielpositionen vertauscht werden. Dies trifft besonders dann zu, wenn das Kriterium mit Fokussierung nur auf das primäre Objekt angewendet wird (Kriterium E2). Die Simulation unterschiedlicher Kriterien zeigte, dass diese maßgeblich die Länge der Ausweichroute beeinflussen können. Insbesondere bei einer squall line oder anderen großräumigen Gewittersystemen werden abhängig von der gewählten Ausweichrichtung zum Teil signifikante Unterschiede in den Längen der vorgeschlagenen Ausweichrouten beobachtet. Beispiele aus den Abbildungen 3.16 und 3.17 illustrieren die vorgeschlagenen Ausweichrouten für jeweils ein Paar von Risikogebieten, basierend auf den Kriterien E1, E2 und E3. In beiden Fällen resultiert das flächenbezogene integrale Kriterium E1 in der kürzesten Ausweichroute. Bei geringen Unterschieden in den Flächeninhalten der Routenhindernisse auf beiden Seiten einer betrachteten Trajektorie liefert das flächenbezogene integrale Kriterium keine eindeutige Entscheidung. In DIMVET wird in solchen Fällen die Entscheidungsfindung durch die Bestimmung der maximalen lateralen Ausdehnung aller Hindernisse unterstützt (Kriterium E3). In seltenen Fällen, bei denen die geplante Route zum Beispiel direkt durch die Mitte eines kreisförmigen Risikogebietes verläuft und sowohl das flächenbezogene integrale Kriterium als auch die Bestimmung der maximalen lateralen Ausdehnung keine Ergebnisse liefern, wird die Entscheidung zufällig getroffen.

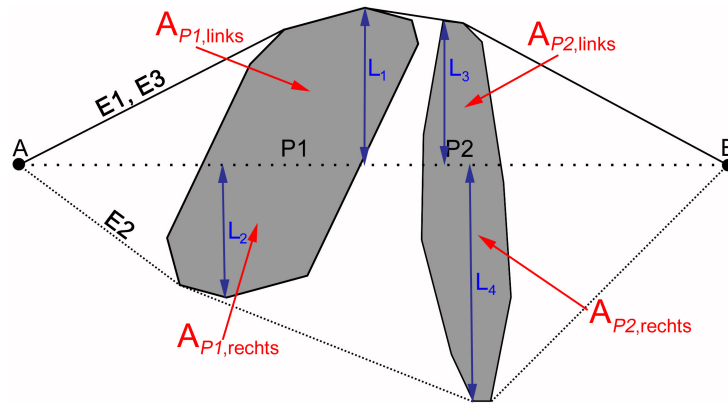


Abbildung 3.16: Drei Kriterien für die Entscheidungsfindung der Ausweichrichtung für das primäre Objekt P1 sowie die zugehörigen Ausweichrouten um beide Hindernisse am Beispiel 1. Das flächenbezogene integrale Kriterium E1 ($A_{P1,rechts} + A_{P2,rechts} > A_{P1,links} + A_{P2,links}$) ergibt „links umfliegen“. Die Anwendung des Flächenkriteriums nur auf das primäre Objekt P1, das Kriterium E2 ($A_{P1,rechts} < A_{P1,links}$), ergibt „rechts umfliegen“. Das Kriterium E3, bei dem die maximale laterale Ausdehnung aller Routenhindernisse bestimmt wird ($\max\{L_1, \dots, L_4\} = L_4$), resultiert in „links umfliegen“. Für die umgekehrte Richtung von B nach A würden die Ausweichrouten bei aller Kriterien dem Verlauf der oberen Ausweichroute, markiert mit „E1, E3“, entsprechen. Die Symmetrie wäre somit bei der Auswahl des Kriteriums E2 verletzt.

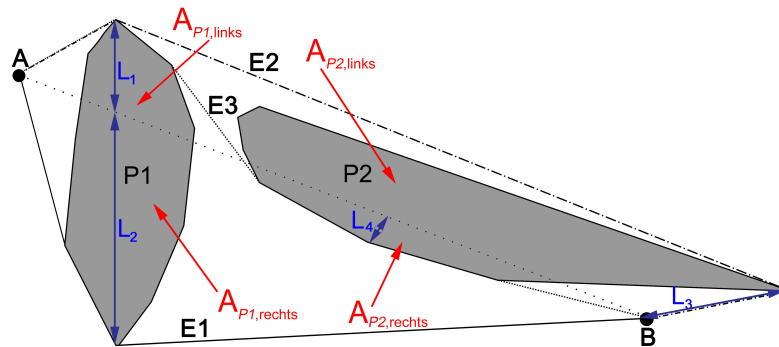


Abbildung 3.17: Drei Kriterien für die Entscheidungsfindung der Ausweichrichtung für das primäre Objekt P1 sowie die zugehörigen Ausweichrouten um beide Hindernisse am Beispiel 2. Das flächenbezogene integrale Kriterium E1 ($A_{P1,links} + A_{P2,links} > A_{P1,rechts} + A_{P2,rechts}$) ergibt „rechts umfliegen“. Die Anwendung des Flächenkriteriums nur auf das primäre Objekt P1, das Kriterium E2 ($A_{P1,links} < A_{P1,rechts}$), ergibt „links umfliegen“. Das Kriterium E3, bei dem die maximale laterale Ausdehnung aller Routenhindernisse bestimmt wird ($\max\{L_1, \dots, L_4\} = L_2$), resultiert in „links umfliegen“. Die Betrachtung der umgekehrten Richtung von B nach A ergibt eine Symmetrieverletzung bei der Festlegung der Ausweichrichtung für alle Routen bei allen drei Kriterien. Die mit „E1“ markierte Ausweichroute würde für die umgekehrte Richtung als Routenvorschlag sogar entfallen.

3.2.2 Ausweichroute für ein Risikogebiet

Nach der Bestimmung der Ausweichrichtung beginnt der Algorithmus, unabhängig von der Anzahl der Routenhindernisse, mit der Berechnung einer Ausweichroute um das primäre Objekt. Idealerweise kann der errechnete Routenvorschlag bis zum Zielpunkt bereits nach dem ersten Durchlauf von MET2ROUTE hindernisfrei sein. Anderenfalls wird die vollständig hindernisfreie Ausweichroute iterativ in mehreren Durchläufen von MET2ROUTE bestimmt. Eine Ausweichroute um ein Hindernis in DIVMET beginnt in der Anfangsposition A , welche der von DIVMET übergebenen aktuellen Flugzeugposition entspricht, verläuft entlang eines minimalen Abschnittes zwischen zwei ausgewählten Positionen auf der konvexen Hülle des primären Risikogebiet-Polygons und endet im Zielpunkt B , welcher der vorgesehenen Zielposition der geplanten Route entspricht. Dabei besteht der Abschnitt der konvexen Hülle aus mindestens einer Position, zum Beispiel wenn ein Risikogebiet eine zugespitzte Form wie in Abbildung 3.18(a) aufweist. In den meisten Fällen stellt der Abschnitt der konvexen Hülle jedoch einen Polygonzug dar, der von zwei Positionen, dem Eingangspunkt EP und dem Ausgangspunkt XP begrenzt ist, wie in Abbildung 3.18(b) verdeutlicht wird. Diese Positionen weisen folgende Eigenschaften auf:

- EP und XP liegen auf der konvexen Hülle des primären Risikogebietes.
- Die Geradenabschnitte $A \rightarrow EP$ und $XP \rightarrow B$ schneiden nicht das primäre Risikogebiet.
- Der Polygonzug zwischen EP und XP ist bezüglich der gewählten Richtung minimal.

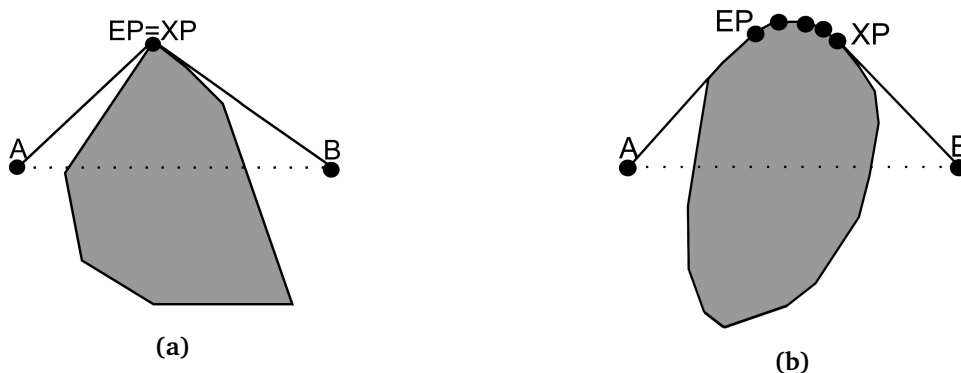


Abbildung 3.18: Der Abschnitt der konvexen Hülle als Teil der Ausweichroute kann aus einer Position EP bestehen wie im Fall (a) oder einen Polygonzug darstellen, der in der Position EP beginnt und in der Position XP endet (b).

Für die Berechnung der Positionen EP und XP werden ausgehend von den Positionen A und B Verbindungslinien zu allen Punkten des primären Risikogebiet-Polygons gebildet und

Winkel zwischen diesen Verbindungslinien und der nordweisenden Linie im Uhrzeigersinn berechnet. Abbildung 3.19 verdeutlicht dies. Für das Ausweichen nach links (nach rechts) gilt dann:

- Bezüglich der aktuellen Flugzeugposition A ergibt sich für die Verbindungslinie zur Position EP ein maximaler (minimaler) Winkel.
- Bezüglich des Zielpunktes B ergibt sich für die Verbindungslinie zur Position XP ein minimaler (maximaler) Winkel.

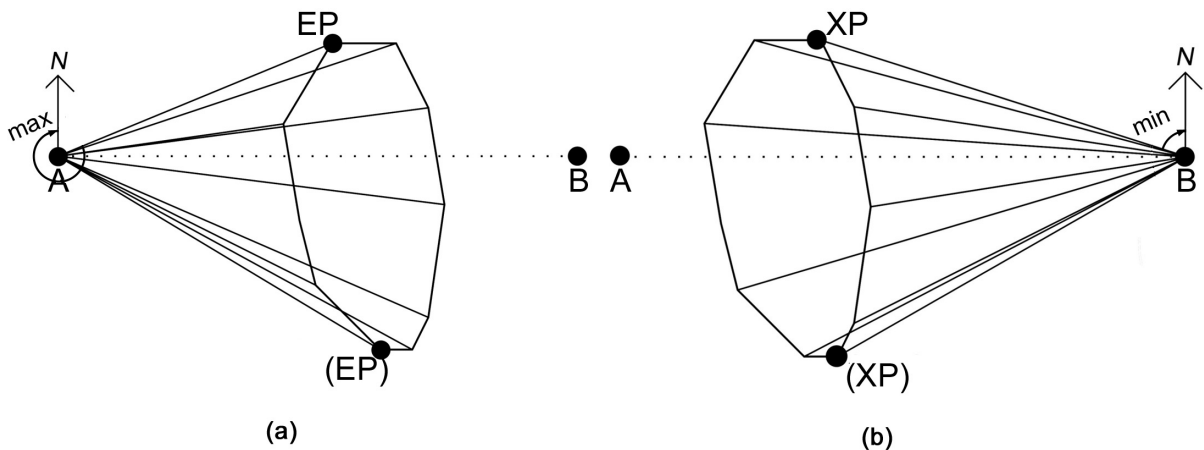


Abbildung 3.19: Bestimmung der Positionen EP und XP für die Ausweichrichtung links (rechts). Bezüglich der aktuellen Flugzeugposition A zeichnet sich die Verbindungslinie zur Position EP des Risikogebiet-Polygons durch einen maximalen (minimalen) Winkel aus (a) und bezüglich des Zielpunktes B resultiert für die Verbindungslinie zur Position XP ein minimaler (maximaler) Winkel (b). Die Winkelmessung erfolgt ausgehend von den Verbindungslinien zu nordweisenden Linie im Uhrzeigersinn.

Der Polygonzug der Ausweichroute für das primäre Risikogebiet lautet in seiner vollständigen Form:

$$\text{Polygonzug} = A, EP, \text{Conv}_{prim}, XP, B.$$

Conv_{prim} bezeichnet den Polygonzug der konvexen Hülle des primären Risikogebietes zwischen EP und XP . Im Beispiel aus Abbildung 3.18(a) entfallen entsprechend der Beitrag der konvexen Hülle Conv_{prim} sowie die Position XP .

Vertauscht man die Start- und die Zielposition miteinander, hat die gesuchte Ausweichroute um das primäre Objekt bei umgekehrter Reihenfolge der Positionen des Polygonzuges denselben Verlauf.

Die berechnete Ausweichroute um das primäre Objekt kann unabhängig von der Anzahl

der von DIVMET übergebenen Hindernisse bereits die gesuchte konfliktfreie Trajektorie zwischen A und B darstellen (*konfliktfreier Fall*). Wenn jedoch die Funktion zur Konflikterkennung am Ende des MET2ROUTE-Durchgangs ein oder mehrere Hindernisse auf der berechneten Ausweichroute identifiziert, entscheidet die Position des ersten Hindernisses über den weiteren Verlauf der Ausweichroutenberechnung. Insgesamt werden drei mögliche Szenarien in MET2ROUTE unterschieden:

1. *Konfliktfreier Fall*. Die Funktion MET2ROUTE übergibt die konfliktfreie Route an das Hauptprogramm DIVMET.
2. *Wiederholung*. Mindestens ein Konflikt wird auf dem Routenabschnitt von A bis EP , vor dem primären Objekt, detektiert, wie es in Abbildung 3.20(a) der Fall ist. Die Kalkulation der Ausweichroute wird in einem weiteren MET2ROUTE-Durchgang wiederholt, wobei die von DIVMET übergebene geplante Trajektorie nicht mehr als aktuelle Flugroute fungiert. Sie wird vollständig durch die berechnete konfliktbehaftete Ausweichroute ersetzt.
3. *Sicherer Routenabschnitt*. Der Abschnitt der Route von A bis EP ist hindernisfrei und kann somit zum Polygonzug der Endroute beitragen. Die verbleibende Route von EP bis B wird im nächsten Durchlauf von MET2ROUTE als aktuell gültige Flugroute verwendet. Für diese Route, auf der sich wie in Abbildung 3.20(b) dargestellt, mindestens ein Hindernis zwischen XP und B befindet, wird für das erste Hindernis und das bisherige primäre Objekt eine neue Ausweichroute unter Berücksichtigung beider Risikogebiete kalkuliert. Die entsprechende Vorgehensweise wird im folgenden Abschnitt 3.2.3 erläutert.

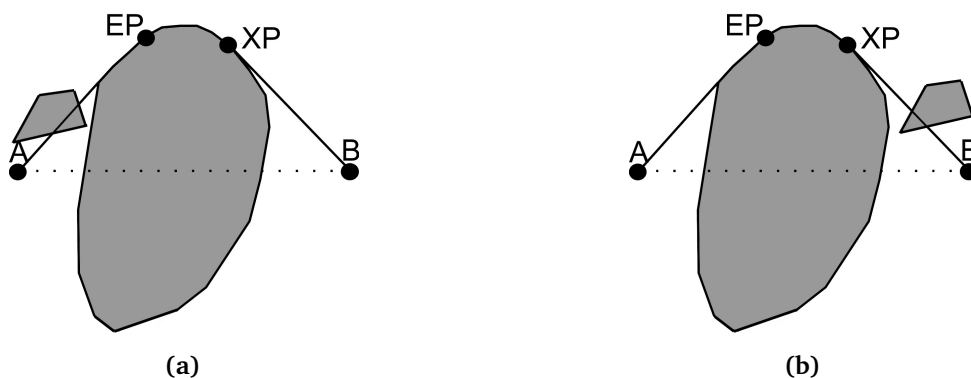


Abbildung 3.20: MET2ROUTE löst im Konfliktfall *Wiederholung* aus, wenn ein weiteres Risikogebiet auf dem Routenabschnitt von A bis EP , vor dem primären Objekt, erkannt wird (a). Im Konfliktfall *sicherer Routenabschnitt* ist allein der Routenabschnitt hinter dem primären Objekt, zwischen XP und B konfliktbehaftet (b).

Die Szenarien 2 und 3 erfordern also weitere Durchläufe von MET2ROUTE. Die Ausweichroute wird iterativ bestimmt. Sie stellt eine Lösung für die von DIVMET übergebene aktuelle Situation dar. Während der Rechenzeit gibt es zwischen MET2ROUTE und DIVMET keine Kommunikation. Wie bereits erwähnt, wird in DIVMET bis zum Erhalt der konfliktfreien Ausweichroute die Simulationszeit angehalten. Sowohl die aktuelle Flugzeugposition als auch die Gewitterpositionen bleiben unverändert.

Für die Realisierung einer Echtzeit-Simulation muss bei komplexen Fällen die Rechenzeit von MET2ROUTE berücksichtigt werden. Um die Berechnung in kürzeren Zeiteinheiten durchführen zu können, könnte eine Übergabe von Zwischenergebnissen von MET2ROUTE an DIVMET im Fall *sicherer Routenabschnitt* eingebaut werden.

3.2.3 Ausweichroute für zwei Risikogebiete

Die Berechnung einer Ausweichroute für zwei Risikogebiete wird erstmalig initiiert, wenn im vorangegangenen Durchlauf von MET2ROUTE das Szenario *sicherer Routenabschnitt* identifiziert wurde. Der Startpunkt der zu bestimmenden Ausweichroute, der im Folgenden mit A' bezeichnet wird, befindet sich dabei auf dem Eingangspunkt EP der konvexen Hülle des bisherigen primären Objektes. Die Verschiebung des Startpunktes erfolgt nicht bis zum Ausgangspunkt XP der konvexen Hülle, da sich diese Position ändern kann. Ein solcher Fall liegt vor, wenn die Ausweichroute um das neue Hindernis einen Konflikt mit dem vorangegangenen primären Risikogebiet aufweist, wie im Folgenden erläutert wird. Es ist daher notwendig, beide Risikogebiete bei der Berechnung einer geeigneten Ausweichroute zu berücksichtigen. Die zwei Risikogebiete, um die eine Ausweichroute gefunden werden soll, werden im Weiteren als das *primäre Objekt*, welches dem neuen Hindernis entspricht, und das *sekundäre Objekt*, also das Risikogebiet auf dessen konvexer Hülle sich die Startposition A' befindet, bezeichnet. Entsprechend werden die bekannten Positionen auf den konvexen Hüllen mit EP_{sek} und XP_{sek} sowie die gesuchten Positionen mit EP_{prim} und XP_{prim} deklariert. Für die Bestimmung der Ausweichroute für zwei Risikogebiete wird zunächst der Konflikt mit dem primären Objekt gelöst. Für diese Berechnung muss der Startpunkt, abhängig von der Form der aktuellen Route, festgelegt werden. Wenn die aktuelle Route aus zwei Positionen A' und B besteht, wie es in Abbildung 3.21 der Fall ist, wird der Startpunkt auf die Startposition A' gelegt. Anderenfalls, wenn die Positionen EP_{sek} und XP_{sek} nicht übereinstimmen, beginnt die Ausweichroute um das primäre Objekt bei der Position XP_{sek} auf der konvexen Hülle des sekundären Objekts. Dadurch richtet sich der Fokus nur auf den konfliktbehafteten Abschnitt der aktuellen Route zwischen XP_{sek} und B . Entsprechend

der Methode zur Berechnung einer Ausweichroute um ein Risikogebiet, welche im Kapitel 3.2.2 beschrieben ist, ermittelt der Algorithmus eine Trajektorie um das primäre Objekt. Der resultierende Polygonzug lautet $XP_{sek}, EP_{prim}, Conv_{prim}, XP_{prim}, B$. Diese Ausweichroute wird anschließend auf einen möglichen Konflikt mit dem sekundären Objekt überprüft. Dabei lassen sich folgende Fälle unterscheiden:

1. *Konfliktfreier Fall.* Die Ausweichroute um das primäre Objekt weist keinen Konflikt mit dem sekundären Objekt auf. Der gefundene Polygonzug ersetzt den konfliktbehafteten Routenabschnitt der aktuellen Route zwischen XP_{sek} und B . Der Polygonzug der Ausweichroute um beide Risikogebiete lautet dann:

$$\text{Polygonzug} = A', Conv_{sek}, XP_{sek}, EP_{prim}, Conv_{prim}, XP_{prim}, B.$$

Im Beispiel aus Abbildung 3.21 liegt der konfliktfreie Fall vor. Da dort kein Routenabschnitt entlang der konvexen Hülle des sekundären Objekts existiert, besitzt der Polygonzug der Ausweichroute die verkürzte Form:

$$\text{Polygonzug} = A', EP_{prim}, Conv_{prim}, XP_{prim}, B.$$

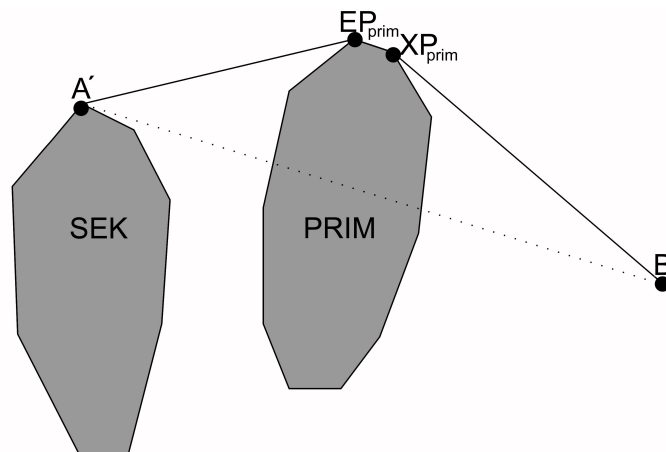


Abbildung 3.21: Die Ausweichroute um das primäre Objekt weist keinen Konflikt mit dem sekundären Objekt auf. Es liegt der konfliktfreie Fall vor.

2. *Konflikt mit dem sekundären Objekt.* Der Algorithmus erkennt einen Konflikt mit dem sekundären Objekt, welcher sich auf dem Routenabschnitt vor dem primären Objekt und zwischen den Positionen A' und EP_{prim} befindet, wie Abbildung 3.22 verdeutlicht. Zur Konfliktlösung wird eine weitere Ausweichroutenberechnung, in diesem Fall um das sekundäre Objekt, ausgeführt. Erneut richtet sich der Fokus nur auf den

konfliktbehafteten Abschnitt der Route mit den Positionen A' und EP_{prim} als Start- und Zielpunkte. Die Methode zur Bestimmung einer Ausweichroute um ein Risikogebiet liefert für das sekundäre Objekt den Polygonzug $A', Conv_{sek}, XP_{sek}, EP_{prim}$. Schließlich wird die errechnete Ausweichroute auf einen möglichen Konflikt mit dem primären Objekt untersucht. Dieser kann aufgrund der Fokussierung des Algorithmus auf das jeweilig aktuelle Konfliktobjekt nicht ausgeschlossen werden. Liegt kein Konflikt vor, wie es im Beispiel aus Abbildung 3.22 der Fall ist, ersetzt der gefundene Polygonzug den konfliktbehafteten Routenabschnitt zwischen A' und EP_{prim} und der Polygonzug der Ausweichroute für zwei Risikogebiete lautet schließlich:

$$\text{Polygonzug} = A', Conv_{sek}, XP_{sek}, EP_{prim}, Conv_{prim}, XP_{prim}, B.$$

Der beschriebene Konfliktfall mit dem sekundären Objekt resultiert häufig in einer Verschiebung der Position XP_{sek} gegenüber ihrer ursprünglichen Position (XP_{sek}) auf der aktuellen Route, wie Abbildung 3.22 zeigt. Deshalb ist es notwendig, wie bereits erwähnt, bei der Berechnung einer Ausweichroute um zwei Risikogebiete den Punkt A' bzw. EP_{sek} als Startposition festzulegen.

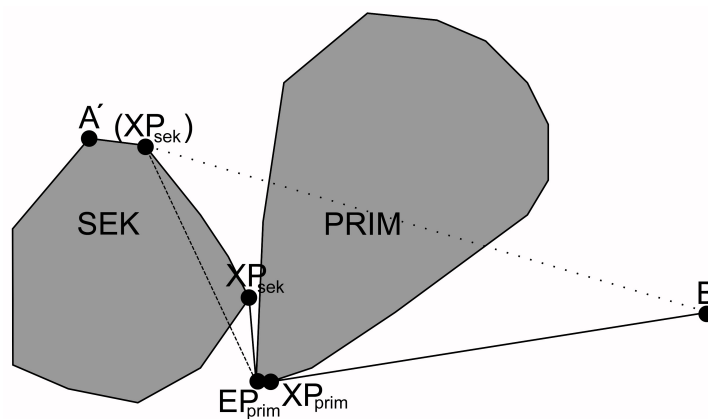


Abbildung 3.22: Die Ausweichroute um das primäre Objekt weist einen Konflikt mit dem sekundären Objekt im Abschnitt zwischen A' und EP_{prim} auf. Die Ausweichroute um das sekundäre Risikogebiet resultiert in einer Neupositionierung von XP_{sek} .

3. *Konflikt mit dem primären Objekt.* Wie im vorangegangenen Beispiel angedeutet, besteht die Möglichkeit, dass die Ausweichroute um das sekundäre Objekt einen Konflikt mit dem primären Objekt aufweist. Eine weitere Iteration von MET2ROUTE mit einer Ausweichroutenberechnung um ein Risikogebiet dient als Ansatz zur Konfliktlösung. Abbildung 3.23 verdeutlicht dies. Diesmal liegt der konfliktbehaftete Routenabschnitt zwischen den Positionen XP_{sek} und B vor. Entsprechend werden auch die Start- und

Zielpunkte der neuen Ausweichroute um das primäre Objekt festgelegt und ein Polygonzug der Form $XP_{sek}, EP_{prim}, Conv_{prim}, XP_{prim}, B$ bestimmt. Die anschließende Konfliktüberprüfung, so wie sie nach jeder Ausweichroutenberechnung durchgeführt wird, findet keinen Konflikt. Der gefundene Polygonzug kann direkt den konfliktbehafteten Routenabschnitt der aktuellen Route zwischen XP_{sek} und B ersetzen. Im Ergebnis kann sich die Position EP_{prim} gegenüber ihrer ursprünglichen Lage (EP_{prim}) verändert haben. Diese Positionsänderung hängt ausschließlich von dem gewählten Startpunkt ab, welcher für die Berechnung der Ausweichroute um das primäre Objekt festgelegt wurde.

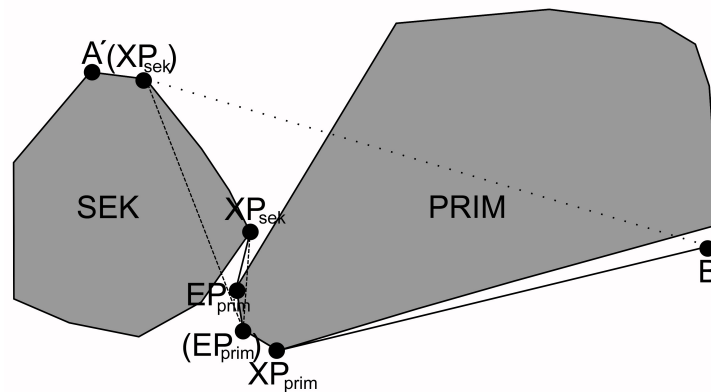


Abbildung 3.23: Erneuter Konflikt mit dem primären Objekt erfordert eine weitere Korrektur der Ausweichroute im Abschnitt zwischen XP_{sek} und B . Aufgrund der Verschiebung der Startposition für die Bestimmung der Ausweichroute um das primäre Objekt wurde die Position EP_{prim} neu bestimmt.

Erst wenn die gefundene Ausweichroute frei von Konflikten bezüglich des primären und des sekundären Objekts ist, wird sie auf Konflikte bezüglich weiterer Risikogebiete, falls diese vorhanden sind, untersucht. Der Algorithmus wertet das Ergebnis der Konfliktanalyse analog der Berechnung einer Ausweichroute um ein Risikogebiet aus dem vorangegangenen Kapitel 3.2.2 aus.

3.2.4 Gekrümmter Routenverlauf

Ein Hindernis auf einer Route mit gekrümmtem Verlauf, dessen räumliche Ausdehnung jedoch keinen Konflikt auf der Verbindungslinie zwischen der Start- und Zielposition der Route auslöst, stellt einen Sonderfall dar, bei dem die beschriebene Methodik zur Berechnung einer Ausweichroute um das primäre Objekt an ihre Grenzen stößt. Dieser soll am Beispiel aus Abbildung 3.24 erläutert werden. Dort befindet sich in der Anfangssituation ein Hindernis zwischen den Start- und Zielpositionen A und B , dargestellt in Abbildung 3.24(a).

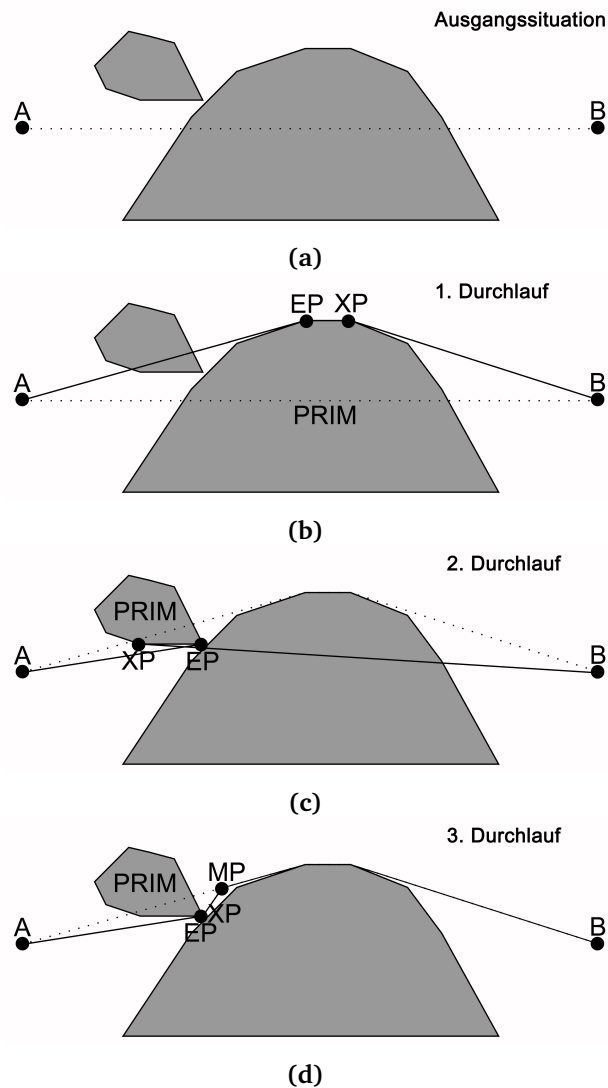


Abbildung 3.24: Konstruktion einer Ausweichroute mit MET2ROUTE bei einem gekrümmten Routenverlauf. Zwischen den Start- und Zielpositionen A und B befindet sich ein Risikogebiet (a) um welches eine Ausweichroute bestimmt wird (b). Auf dieser Ausweichroute mit gekrümmtem Verlauf befindet sich ein weiteres Hindernis. Der Algorithmus bestimmt für das neue primäre Objekt $PRIM$ die Positionen EP und XP , wobei ihre Konstellation zur Überschneidung der Strecken \overline{AEP} und \overline{BXP} führt (c). Die vorgeschlagene Route kann aufgrund dieser Überschneidung nicht als eine Ausweichtrajektorie um das primäre Objekt angenommen werden. Durch die Verschiebung des Zielpunktes B auf die erste Position der aktuellen Route hinter dem primären Objekt, bezeichnet mit MP , verlagert sich die Position des Punktes XP . Mit dieser Speziallösung wird der Sonderfall gelöst (d).

Dieses Hindernis wird von MET2ROUTE als das primäre Objekt eingeordnet, für welches eine Ausweichroutenberechnung initiiert wird. Auf der resultierenden Ausweichroute mit dem Polygonzug $A, EP, \text{Conv}_{prim}, XP, B$ stellt die Konflikterkennung ein neues Risikogebiet

fest, wie Abbildung 3.24(b) verdeutlicht. Das neue Risikogebiet befindet sich vor dem primären Objekt auf dem Routenabschnitt zwischen A und EP , wodurch der Konfliktfall *Wiederholung* aktiviert wird. Im darauffolgenden MET2ROUTE-Durchlauf ersetzt die neu berechnete Ausweichroute die geplante Route. Weil das neue Hindernis als das aktuelle primäre Objekt behandelt wird, bleibt das ursprüngliche primäre Objekt unbeachtet.

Bei der Bestimmung des Abschnittes der konvexen Hülle werden die Positionen EP und XP berechnet. Für die Abstände d zwischen den errechneten Positionen auf der konvexen Hülle und der Start- und Zielposition ergeben sich dabei folgende Relationen:

$$d(A,XP) < d(A,EP) \text{ und } d(B,EP) < d(B,XP).$$

Im Resultat kann die ermittelte Trajektorie um das primäre Objekt mit dem Polygonzug $A, EP, \text{Conv}_{prim}, XP, B$ aufgrund der Überschneidung der Strecken \overline{AEP} und \overline{BXP} , wie in Abbildung 3.24(c) zu sehen ist, nicht als Ausweichroute angenommen werden. Als Kriterium zur Identifizierung einer solchen Situation gelten die oben genannten Abstandsrelationen. Für diesen Sonderfall musste eine Speziallösung implementiert werden: Durch eine temporäre Verschiebung des Zielpunktes B auf eine andere Position, wird eine Verlagerung des Punktes XP auf der konvexen Hülle des primären Objekts erreicht. Eine solche Position, markiert mit MP (engl. *moved point*) in Abbildung 3.24(d), kann die erste Position auf der Route hinter dem primären Objekt sein. Ausgehend von MP bestimmt der Algorithmus erneut die Position XP auf der konvexen Hülle des primären Objekts. Im Beispiel aus Abbildung 3.24(d) fallen die Positionen EP und XP zusammen. Der Polygonzug dieser Ausweichroute lautet A, EP, MP . Anschließend wird dieser Polygonzug um den Abschnitt von MP zu B ergänzt und damit eine Ausweichroute bis zum Zielpunkt mit dem Polygonzug A, EP, MP, \dots, B generiert.

Die Verwendung solcher Speziallösungen stellt eine Schwachstelle des entwickelten Algorithmus dar. Insbesondere kann die Lage des gewählten Verschiebungspunktes MP zu weiteren Konflikten führen, zum Beispiel wenn sich diese Position innerhalb eines weiteren Risikogebiets befindet. Des Weiteren werden beide Risikogebiete nicht simultan bei der Bestimmung der Ausweichroute zum Zielpunkt berücksichtigt. Dies ist zwar, wie das Beispiel 3.25 zeigt, in manchen Fällen durchaus sinnvoll, jedoch überwiegt die Anzahl der Fälle bei denen es sich eher nachteilig auf die Rechenzeit auswirkt bei Weitem.

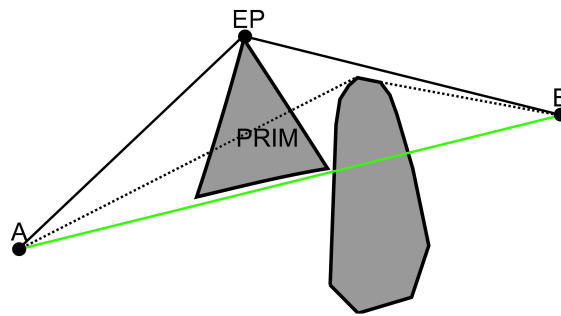


Abbildung 3.25: Erneuter Konflikt mit einem weiteren Hindernis führt zur Korrektur der Ausweichroute. Die konfliktfreie Ausweichroute um das neu primären Objekt (PRIM) führt direkt zum Zielpunkt. Dabei wird das ehemalige primäre Objekt indirekt umflogen.

Als Folge dieser Erkenntnisse wurde der MET2ROUTE-Algorithmus weiterentwickelt. Der überarbeitete Ansatz wird im folgenden Kapitelabschnitt diskutiert.

3.2.5 Weiterentwicklung von MET2ROUTE

MET2ROUTE als Teil von DIVMET wurde über mehrere Jahre durch die Mitglieder der Arbeitsgruppe verwendet. Dabei zeigten sich einige Defizite, die durch eine Weiterentwicklung ausgeglichen werden sollten. Eins der Defizite wurde im vorangegangenen Kapitel erläutert: Der Sonderfall *gekrümmter Routenverlauf* wird in MET2ROUTE nicht zufriedenstellend gelöst. Darüber hinaus ist die Effizienz des Algorithmus bei immer wieder auftretenden neuen Hindernissen vor dem primären Objekt nicht annehmbar, da wiederholt rekalkuliert werden muss. Sowohl die sicheren Routenabschnitte hinter dem primären Objekt als auch die Abfolge von Risikogebieten um die bereits eine Ausweichroute gelegt wurde, werden für die Bestimmung der endgültigen Ausweichroute nicht berücksichtigt. Es wird daher im Folgenden ein weiterentwickelter Ansatz für die Ausweichroutenberechnung diskutiert, der als Computerprogramm bisher nicht umgesetzt wurde. Diese Weiterentwicklung von MET2ROUTE wird als MET2ROUTE₂ bezeichnet. Folgende Eigenschaften sind durch den neuen Algorithmus zusätzlich zu erfüllen:

1. Die Ausweichroute soll auch für gekrümmte Trajektorienabschnitte der aktuellen Route mit der gleichen Methodik gefunden werden.
2. Zwischenergebnisse aus einzelnen Durchläufen sollen gespeichert werden, um die Rechenzeit zu reduzieren.

Die aufgezählten Eigenschaften sollen durch MET2ROUTE₂ für die von DIVMET übergebenen Risikogebiete auf zwei unterschiedlichen Abstraktionsebenen realisiert werden. In der ersten

Ebene werden Risikogebiete, die als Hindernisse erkannt werden, von ihrer 2-D-polygonalen Form zu zweidimensionalen *räumlichen Objekten* abstrahiert. Weiterhin werden der Start- und Zielpunkt als *eindimensionale Objekte* behandelt. Den räumlichen Objekten werden bestimmte Eigenschaften zugeordnet, die dann im gesamten Algorithmusverlauf unverändert bleiben. Dazu gehört neben der Kennung und den geographischen Positionen, die das Objekt beschreiben, auch die Richtung, in der ein räumliches Objekt umflogen werden soll. In der ersten Ebene sucht der Algorithmus solche konfliktfreien Tangentenabschnitte, welche die räumlichen Objekte zwischen der Start- und der Zielposition der jeweiligen MET2ROUTE-Kalkulation miteinander verbinden. Dabei existiert eine festgelegte Einschränkung, die in den folgenden Kapiteln diskutiert wird. Wenn ein entsprechender Satz von konfliktfreien Tangentenabschnitten gefunden wurde, geht der Algorithmus zur zweiten Ebene über. Dort werden die räumlichen Objekte wieder als zweidimensionale konvexe Polygone betrachtet. Die konfliktfreien Tangentenabschnitte tragen dann, zusammen mit den Routenabschnitten auf den konvexen Hüllen der Risikogebiete, zur Erstellung des Polygonzuges der endgültigen Ausweichroute bei.

Konfliktfreie Tangentenabschnitte

MET2ROUTE₂ startet mit der Festlegung von drei Objekten, welche zuerst durch ein Paar von Tangentenabschnitten verknüpft werden sollen. Das *Startobjekt* i kann sowohl ein eindimensionales Objekt sein, etwa der aktuelle Wegpunkt, an dem sich das Flugzeug befindet, als auch ein räumliches Objekt darstellen. Das Gleiche gilt für das *Zielobjekt* k . Zwischen Start- und Zielobjekt befindet sich mindestens ein Hindernis j , welches den aktuellen Durchlauf von MET2ROUTE₂ initiiert hat. Analog zu MET2ROUTE wird auch hier bei mehreren Hindernissen nur dem zum Startobjekt am nächsten liegenden Objekt, das als *primäre Objekt* j bezeichnet wird, ausgewichen. Beim primären Objekt handelt es sich immer um ein Wetterobjekt, nie um eine Position. Der Algorithmus ordnet dem primären Objekt eine Kennung sowie die Richtung, in der es umflogen werden soll, zu. Die Bestimmung der Ausweichrichtung erfolgt wie bei MET2ROUTE, wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben. Nach Festlegung der drei Objekte werden diese paarweise miteinander verknüpft. Die Verknüpfung erfolgt jeweils durch zwei Tangentenabschnitte.

Abbildung 3.26 zeigt ein Beispiel mit einem räumlichen Hindernis P1 zwischen den Start- und Zielpositionen A und B. Hierbei entspricht P1 dem primären Objekt j . A und B werden den eindimensionalen Objekten i und k zugeordnet.

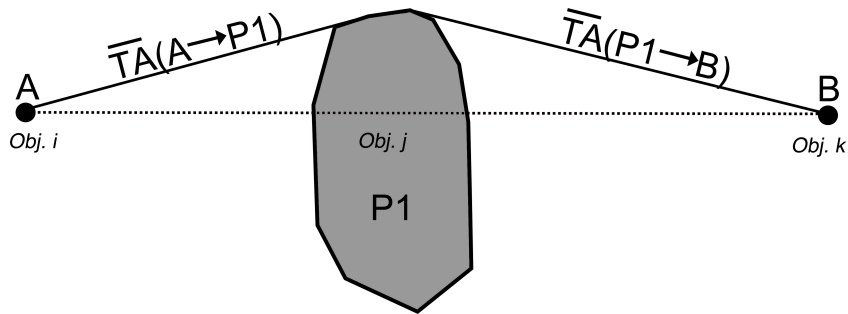


Abbildung 3.26: Auf der geplanten Route (gestrichelte Linie) wird ein Hindernis erkannt. Nach Einordnung der Positionen A und B als eindimensionale Start- und Zielobjekte i und k wird das räumliche Hindernis $P1$ als das primäre Objekt j erkannt und mit der Ausweichrichtung *links* referenziert. Die Verknüpfung erfolgt durch zwei Tangentenabschnitte $\overline{TA}(A \rightarrow P1)$ und $\overline{TA}(P1 \rightarrow B)$.

Für die Verknüpfung von zwei eindimensionalen Objekten mit einem räumlichen Objekt gibt es genau zwei Verknüpfungsmöglichkeiten: Links und rechts. Diese entsprechen einer Ausweichroute links oder rechts um das räumliche Hindernis herum. Im Beispiel aus Abbildung 3.26 sind es die Tangentenabschnitte $\overline{TA}(A \rightarrow P1)$ und $\overline{TA}(P1 \rightarrow B)$, welche von links an das primäre Objekt j angelehnt werden.

Für die paarweise Verknüpfung von drei räumlichen Objekten ergeben sich insgesamt acht unterschiedliche Möglichkeiten: Vier äußere und vier innere Verbindungen, wie in Abbildung 3.27 verdeutlicht wird. Die Wahl der geeigneten Verbindungslinien ist allein an den Parameter *Ausweichrichtung* der räumlichen Objekte geknüpft. Dieser Parameter wird jedem räumlichen Objekt, wenn es als primäres Objekt identifiziert wird, fest zugewiesen und nicht mehr geändert. Die Festlegung der zu verwendenden Tangentenabschnitte aus den unterschiedlichen Möglichkeiten resultiert aus einem Vergleich der Ausweichrichtungsparameter von jeweils zwei räumlichen Objekten, die miteinander verknüpft werden sollen. Wenn diese voneinander abweichen, erfolgt die Verbindung durch einen inneren Tangentenabschnitt. Zwei räumliche Objekte mit identischen Ausweichrichtungsparametern verknüpft der Algorithmus durch einen äußeren Tangentenabschnitt. Anschließend werden die ausgewählten Tangentenabschnitte auf Konflikte mit weiteren Risikogebieten untersucht.

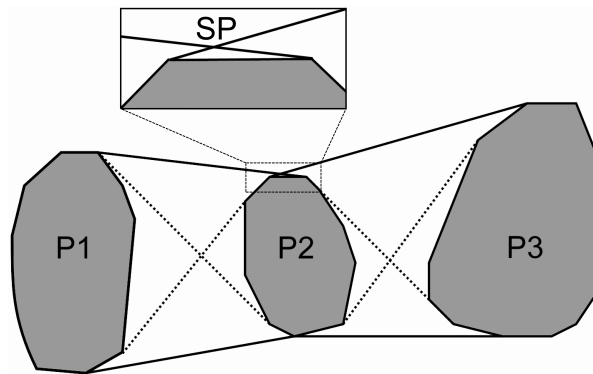


Abbildung 3.27: Drei räumliche Objekte können durch vier äußere Tangentenabschnitte (durchgezogene Linien) und vier innere Tangentenabschnitte (gestrichelte Linien) miteinander verbunden werden. Als ein Entscheidungskriterium zur Auswahl der Tangentenabschnitte des Verbindungspfades dient ein Vergleich der Ausweichrichtungsparameter der räumlichen Objekte. Eine Übereinstimmung der Parameter resultiert in einer äußeren Tangente. Bei einem Richtungswechsel erfolgt die Verbindung durch einen inneren Tangentenabschnitt. Die Tangentenabschnitte können sich in einem Schnittpunkt überschneiden (Detailansicht). Dieser Schnittpunkt *SP* ist relevant für die Erstellung des Polygonzuges der Endroute im weiteren Verlauf von $MET2ROUTE_2$.

Im Falle eines auftretenden Konfliktes werden drei Fälle unterschieden, bei denen ein neuer $MET2ROUTE_2$ -Algorithmusdurchlauf initiiert wird:

- Bei mindestens einem Hindernis auf dem Tangentenabschnitt zwischen den Objekten *i* und *j* löst der Algorithmus den *Konfliktfall 1* aus. Der Tangentenabschnitt zwischen den Objekten *j* und *k* wird, unabhängig davon, ob dort ein Konflikt vorliegt oder nicht, auf eine Tangentenabschnitt-Warteliste (\overline{TA} W-Liste) gesetzt und in einem späteren Schritt wieder aufgegriffen und zwar dann, wenn weder Konfliktfall 1 noch Konfliktfall 2 vorliegen.
- Wenn der Tangentenabschnitt zwischen den Objekten *i* und *j* keinen Konflikt aufweist, womit der Konfliktfall 1 ausgeschlossen ist, und sich auf dem Tangentenabschnitt zwischen den Objekten *j* und *k* mindestens ein Hindernis befindet, dann wird die Situation als *Konfliktfall 2* eingestuft. Der erste Tangentenabschnitt wird zur Menge der *konfliktfreien Tangentenabschnitte* hinzugefügt und somit zur Bestimmung der Ausweichroute in Etappe 2 von $MET2ROUTE_2$ mit einbezogen.
- Schließlich ruft die Situation, dass weder Konfliktfall 1 noch Konfliktfall 2 vorliegen, die *Tangentenabschnitt-Warteliste* nicht leer ist und mindestens einen konfliktbehafteten Tangentenabschnitt enthält, den *Konfliktfall 3* hervor.

Im Folgenden werden die drei Konflikte in ihrer allgemeinen Form formuliert und mit Hilfe von Beispielen im Detail erläutert.

Konfliktfall 1

Die im Konfliktfall 1 durchgeführten Schritte für zwei aufeinanderfolgende Algorithmusdurchläufe n und $n + 1$ zeigt Tabelle 3.1. Im Durchlauf n erkennt der Algorithmus auf dem ersten Tangentenabschnitt, der das Startobjekt i_n mit dem primären Objekt P_n verknüpft, mindestens ein neues Hindernis. Als Folge davon wird der zweite Tangentenabschnitt $\overline{TA}(P_n \rightarrow k_n)$ auf die Tangentenabschnitt-Warteliste (\overline{TA} W-Liste) gesetzt und der nächste Algorithmusdurchlauf $n + 1$ mit neu gesetzten Objekten initiiert. Dabei richtet sich der Fokus auf den konfliktbehafteten ersten Tangentenabschnitt. Entsprechend bleibt das Startobjekt i unverändert und als Zielobjekt k wird das ursprüngliche primäre Objekt P_n festgelegt. Das neue primäre Objekt j mit der Bezeichnung P_{n+1} stellt das zum Startobjekt i am nächsten liegende Risikogebiet dar, welches im Algorithmusdurchlauf n auf dem ersten Tangentenabschnitt erkannt wurde.

Tabelle 3.1: Festlegung der drei Objekte i , j und k bei *Konfliktfall 1* für zwei aufeinanderfolgende Algorithmusdurchläufe.

Schritt:	Objekt:			Konfliktfall	\overline{TA} W-Liste	Konfliktfreie \overline{TA}
	i	j	k			
n	i_n	P_n	k_n	1	$\overline{TA}(P_n \rightarrow k_n)$	–
$n + 1$	i_n	P_{n+1}	P_n			

Abbildung 3.28 und Tabelle 3.2 sollen den Algorithmusablauf an einem konkreten Beispiel verdeutlichen: Nachdem im ersten Durchlauf von MET2ROUTE₂ zwei Tangentenabschnitte $\overline{TA}(A \rightarrow P1)$ und $\overline{TA}(P1 \rightarrow B)$ von links an das primäre Objekt $P1$ angelehnt wurden, ergibt die Konflikterkennung, dass sich zwei Hindernisse auf dem ersten Tangentenabschnitt befinden. Die Situation wird demnach als Konfliktfall 1 eingeordnet. Folglich wird der zweite Tangentenabschnitt auf die Warteliste gesetzt und ein neuer Algorithmusdurchlauf gestartet. Es gilt im zweiten Durchlauf eine konfliktfreie Verknüpfung mittels Tangentenabschnitten zwischen den Objekten A und $P1$ zu finden. Dabei wird das räumliche Objekt $P2$ als das neue primäre Objekt j behandelt. Wie bereits erwähnt, findet nur das primäre Objekt j bei der Ausweichroutenbestimmung in einem Durchgang von MET2ROUTE oder MET2ROUTE₂ Berücksichtigung.

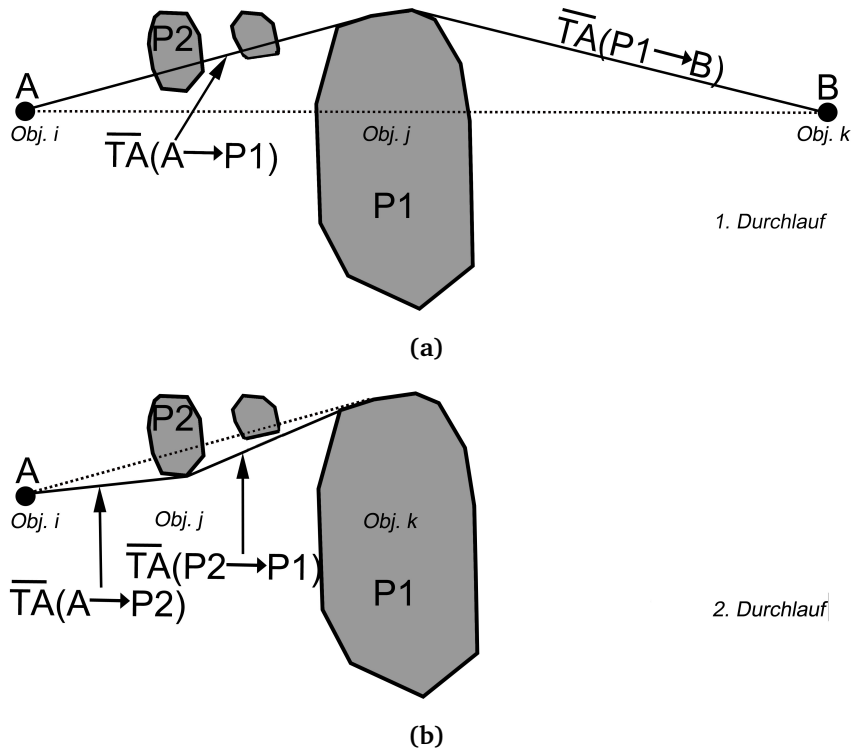


Abbildung 3.28: Die geplante Route von A nach B verläuft durch ein Risikogebiet P1. Zur Bestimmung der Ausweichroute werden die Objekte i, j und k durch zwei Tangentenabschnitte $\overline{TA}(A \rightarrow P1)$ und $\overline{TA}(P1 \rightarrow B)$ verknüpft. Auf dem Tangentenabschnitt $\overline{TA}(A \rightarrow P1)$ befindet sich mindestens ein weiteres Risikogebiet, weshalb die Situation als *Konfliktfall 1* eingestuft wird (a). Im 2. Durchlauf werden die Objekte j und k neu gesetzt und zwei konfliktfreie Tangentenabschnitte, $\overline{TA}(A \rightarrow P2)$ und $\overline{TA}(P2 \rightarrow P1)$, zwischen den Objekten i, j und k bestimmt (b). Sowohl die im zweiten Durchlauf erzeugten Tangentenabschnitte als auch der Tangentenabschnitt $\overline{TA}(P1 \rightarrow B)$ von der Tangentenabschnitt-Warteliste sind in diesem Beispiel hindernisfrei.

Das zweite Risikogebiet auf dem konfliktbehafteten Tangentenabschnitt $\overline{TA}(A \rightarrow P1)$ fließt jedoch bei der Bestimmung der Ausweichrichtung für das primäre Objekt mit ein. In diesem Fall liefert das Entscheidungskriterium (beschrieben in Kapitel 3.2.1) die Ausweichrichtung rechts, was dem primären Objekt P2 als fester Parameter zugewiesen wird. Da sich in diesem Beispiel die Ausweichrichtungparameter von P1 und P2 unterscheiden, erfolgt die Verknüpfung der Objekte j und k durch einen inneren Tangentenabschnitt $\overline{TA}(P2 \rightarrow P1)$. Auch das Startobjekt i wird gemäß Ausweichrichtungparameter durch einen Tangentenabschnitt $\overline{TA}(A \rightarrow P2)$ mit dem primären Objekt j verknüpft. Die neu bestimmten Tangentenabschnitte werden anschließend, entsprechend dem MET2ROUTE₂-Ablaufplan, auf Konflikte untersucht. Im Konfliktfall wird ein neuer Durchlauf initiiert. Im hier betrachteten Fall sind beide Tangentenabschnitte als konfliktfrei identifiziert. Es folgt die Überprüfung des Tangentenabschnitts $\overline{TA}(P1 \rightarrow B)$ von der Tangentenabschnitt-Warteliste auf mögliche Hindernisse. Da

dort ebenfalls keine Konflikte vorliegen, beendet MET2ROUTE₂ die Etappe 1 und geht zur Erstellung des Polygonzuges der Endroute über.

In dem Fall, dass mindestens ein Tangentenabschnitt von der Tangentenabschnitt-Warteliste konfliktbehaftet wäre, würde gemäß Konfliktfall 3 fortgefahren werden.

Tabelle 3.2: Tabellarischer Ablauf der ersten Etappe von MET2ROUTE₂ für das Beispiel aus Abbildung 3.28.

Schritt:	Objekt:			Konfliktfall	\overline{TA} W-Liste	Konfliktfreie \overline{TA}
	i	j	k			
1	A	P1	B	1	$\overline{TA}(P1 \rightarrow B)$	-
2	A	P2	P1	-	-	$\overline{TA}(A \rightarrow P2), \overline{TA}(P2 \rightarrow P1), \overline{TA}(P1 \rightarrow B)$

Konfliktfall 2

Konfliktfall 2 entspricht einer Situation bei der sich mindestens ein Hindernis auf dem zweiten Tangentenabschnitt, zwischen den Objekten j und k befindet. Anders als beim Konfliktfall 1 wird der konfliktfreie Tangentenabschnitt hier nicht zu einer Warteliste zur nachträglichen Überprüfung hinzugefügt, sondern der Menge der *konfliktfreien Tangentenabschnitte* zugeordnet. Anschließend erfolgt in Analogie zum Konfliktfall 1 die Initiierung eines weiteren MET2ROUTE₂-Durchlaufs mit neu festgelegten Objekten. Tabelle 3.3 verdeutlicht diese Vorgehensweise: Während das Zielobjekt k unverändert bleibt, verschiebt sich das Startobjekt im Durchlauf $n + 1$ auf das primäre Objekt aus dem Durchlauf n . Das Hindernis, dass dem Startobjekt am nächsten ist, wird zum neuen primären Objekt.

Tabelle 3.3: Festlegung der drei Objekte i, j und k bei *Konfliktfall 2* für zwei aufeinanderfolgende Algorithmusdurchläufe.

Schritt:	Objekt:			Konfliktfall	\overline{TA} W-Liste	Konfliktfreie \overline{TA}
	i	j	k			
n	i_n	P_n	k_n	2	-	$\overline{TA}(i_n \rightarrow P_n)$
$n + 1$	P_n	P_{n+1}	k_n			

Im Folgenden wird ein Beispiel vorgestellt bei dem der Konfliktfall 2 zweimal eintritt, wodurch insgesamt drei Algorithmusdurchläufe für die Bestimmung aller *konfliktfreien Tangentenabschnitte* zwischen der Start- und der Zielposition erforderlich sind. Abbildung 3.29 und Tabelle 3.4 verdeutlichen die Situation und die einzelnen Durchläufe. Im ersten Durchlauf werden zwei Risikogebiete auf dem zweiten Tangentenabschnitt $\overline{TA}(P1 \rightarrow B)$ zwischen

dem Risikogebiet $P1$ und dem Zielpunkt B erkannt. Von den beiden Hindernissen auf dem konfliktbehafteten Tangentenabschnitt wird das am nächsten zum Startobjekt i liegende Risikogebiet mit der Bezeichnung $P2$ im darauffolgenden zweiten Durchlauf zum primären Objekt j . Das zweite Hindernis trägt an dieser Stelle nur zur Bestimmung des Ausweichrichtungsparameters nach dem flächenbezogenen integralen Kriterium bei.

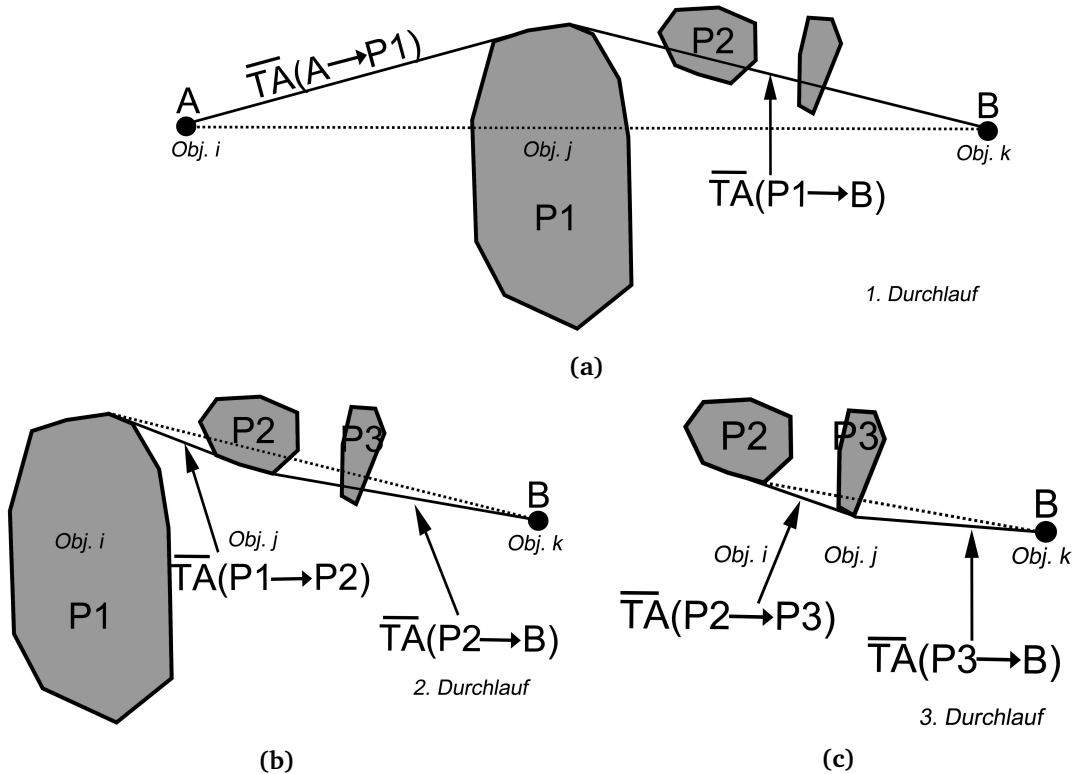


Abbildung 3.29: Ein konfliktfreier erster Tangentenabschnitt $\overline{TA}(A \rightarrow P1)$ und mindestens ein Hindernis auf dem zweiten Tangentenabschnitt $\overline{TA}(P1 \rightarrow B)$ entsprechen dem *Konfliktfall 2* (a). Die Verknüpfung von zwei räumlichen Objekten $P1$ und $P2$ im darauffolgenden zweiten Durchlauf erfolgt durch einen inneren Tangentenabschnitt $\overline{TA}(P1 \rightarrow P2)$. Ein erneuter Konflikt auf dem zweiten Tangentenabschnitt $\overline{TA}(P2 \rightarrow B)$ löst zum zweiten Mal den Konfliktfall 2 aus und initiiert einen dritten Durchlauf von MET2ROUTE₂ (b). Der Algorithmus bestimmt einen äußeren Tangentenabschnitt zwischen den räumlichen Objekten $P2$ und $P3$, da diese identische Ausweichrichtungsparameter aufweisen. Ein weiterer Tangentenabschnitt $\overline{TA}(P3 \rightarrow B)$ verbindet das primäre Objekt j mit dem Zielobjekt k (c). Das Zielobjekt k ist in allen drei Durchläufen der Zielpunkt B . Insgesamt findet MET2ROUTE₂ in der Etappe 1 vier *konfliktfreie Tangentenabschnitte* zwischen der Start- und der Zielposition.

Der konfliktfreie Tangentenabschnitt $\overline{TA}(A \rightarrow P1)$ wird als solcher gespeichert und ein neuer Algorithmusdurchlauf beginnt. Im zweiten Durchlauf verlagert sich das Startobjekt i auf das Risikogebiet $P1$ und der Algorithmus verknüpft die Objekte i und j nach einem Vergleich der Ausweichrichtungsparameter durch einen inneren Tangentenabschnitt $\overline{TA}(P1 \rightarrow P2)$.

Ein zweiter Tangentenabschnitt $\overline{TA}(P2 \rightarrow B)$ verbindet das primäre Objekt j mit dem unverändert gebliebenen Zielobjekt k . Die anschließende Konflikterkennung für die beiden Tangentenabschnitte ordnet die Situation erneut dem Konfliktfall 2 zu. Folglich wird der konfliktfreie Tangentenabschnitt $\overline{TA}(P1 \rightarrow P2)$ gespeichert und ein weiterer MET2ROUTE₂-Durchlauf initiiert. Der dritte Durchlauf wird nach dem gleichen Muster gelöst: Weil die ermittelten Ausweichrichtungsparameter der beiden Risikogebiete $P2$ und $P3$ identisch sind, werden sie über einen äußeren Tangentenabschnitt verbunden. Da die Konflikterkennung die Tangentenabschnitte zwischen den Objekten i , j und k als konfliktfrei einstuft und die Tangentenabschnitt-Warteliste leer ist, werden keine weiteren MET2ROUTE₂-Durchläufe initiiert. Alle konfliktfreien Tangentenabschnitte können zur Erstellung des Polygonzuges der Endroute in Etappe 2 verwendet werden.

In anderen Fällen, bei den die Tangentenabschnitt-Warteliste nicht leer ist und mindestens einen konfliktbehafteten Tangentenabschnitt enthält, wird gemäß Konfliktfall 3 vorgegangen.

Tabelle 3.4: Tabellarischer Ablauf der ersten Etappe von MET2ROUTE₂ für das Beispiel aus Abbildung 3.29.

Schritt:	Objekt:			Konfliktfall	\overline{TA} W-Liste	Konfliktfreie \overline{TA}
	i	j	k			
1	A	P1	B	2	–	$\overline{TA}(A \rightarrow P1)$
2	P1	P2	B	2	–	$\overline{TA}(P1 \rightarrow P2)$
3	P2	P3	B	–	–	$\overline{TA}(P2 \rightarrow P3), \overline{TA}(P3 \rightarrow B)$

Konfliktfall 3

Wenn weder Konfliktfall 1 noch Konfliktfall 2 vorliegen, werden alle Tangentenabschnitte, die sich in der Warteliste befinden, nacheinander überprüft. Konfliktfreie Tangentenabschnitte werden als solche gespeichert und von der Liste entfernt. Konfliktbehaftete Tangentenabschnitte werden durch eine Initiierung des nächsten MET2ROUTE₂-Durchlaufes mit entsprechend gesetzten Start- und Zielobjekten gelöst. Gemäß MET2ROUTE₂-Ablaufplan wird, wie auch bei den anderen Konfliktfällen, das primäre Objekt j als das am nächsten zum Startobjekt i liegende Risikogebiet festgelegt.

Zur Verdeutlichung kann, ausgehend von der Situation in Abbildung 3.30, ein alternatives Entwicklungsszenario überlegt werden, bei dem der Tangentenabschnitt $\overline{TA}(P1 \rightarrow B)$ nicht konfliktfrei ist. Nach Lösung des Konfliktfalls 1 wird der konfliktbehaftete Tangentenabschnitt $\overline{TA}(P1 \rightarrow B)$ von der Warteliste, wie in Abbildung 3.30 gezeigt, durch einen neuen

MET2ROUTE₂-Durchlauf gelöst. Es besteht die Möglichkeit, dass die neu erzeugten Tangentenabschnitte $\overline{TA}(P1 \rightarrow P3)$ und $\overline{TA}(P3 \rightarrow B)$ weitere Konflikte aufweisen. Entsprechend der Konfliktlage wird dann gemäß Konfliktfall 1 oder Konfliktfall 2 fortgefahren, bis alle Tangentenabschnitte hindernisfrei sind und die Tangentenabschnitt-Warteliste leer ist.

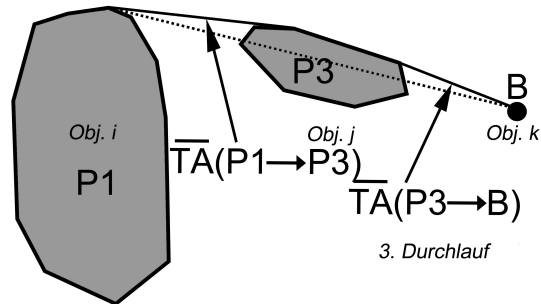


Abbildung 3.30: Alternatives Entwicklungsszenario am Beispiel des Szenarios aus Abbildung 3.28. Im zweiten Durchlauf liegen weder Konfliktfall 1 noch Konfliktfall 2 vor, jedoch enthält die Tangentenabschnitt-Warteliste einen hindernisbehafteten Tangentenabschnitt zwischen dem Hindernis $P1$ und dem Zielpunkt B . In der Folge wird ein dritter Durchlauf initiiert, bei dem das Hindernis $P3$ als primäres Objekt j behandelt wird. Der Algorithmus verbindet das primäre Objekt j mit dem Objekt i durch einen äußeren Tangentenabschnitt $\overline{TA}(P1 \rightarrow P3)$. Mit einem zweiten Tangentenabschnitt $\overline{TA}(P3 \rightarrow B)$ erfolgt die Verbindung des primären Objektes j mit dem Zielpunkt B . Der Algorithmus bewertet anschließend beide Tangentenabschnitte als konfliktfrei und beendet damit die Etappe 1 von MET2ROUTE₂.

Tabelle 3.5: Tabellarischer Ablauf der ersten Etappe von MET2ROUTE₂ für das Beispiel aus Abbildung 3.30.

Schritt:	Objekt:			Konfliktfall	\overline{TA} W-Liste	Konfliktfreie \overline{TA}
	i	j	k			
1	A	P1	B	1	$\overline{TA}(P1 \rightarrow B)$	–
2	A	P2	P1	3	–	$\overline{TA}(A \rightarrow P2), \overline{TA}(P2 \rightarrow P1)$
3	P1	P3	B	–	–	$\overline{TA}(P1 \rightarrow P3), \overline{TA}(P3 \rightarrow B)$

Polygonzug der Ausweichroute

Die errechneten konfliktfreien Tangentenabschnitte aus Etappe 1 von MET2ROUTE₂ bilden die Grundlage zur Erstellung eines Polygonzuges der Ausweichroute zwischen den Positionen A und B . Neben den Start- und Zielpositionen können zum Polygonzug einer Ausweichroute zwei weitere Komponenten beitragen: Schnittpunkte von zwei benachbarten Tangentenabschnitten und Abschnitte von konvexen Hüllen bestimmter Risikogebiete. Zur Bestimmung dieser Komponenten werden zunächst potentielle Schnittpunkte von allen benachbarten Tangentenabschnitten \overline{TA}_i und \overline{TA}_{i+1} mit $i \in \mathbb{N}$ berechnet. Ob der vorliegende Schnittpunkt

SP_k , mit $k \in \mathbb{N}$ als Objektkennung zum Polygonzug der Ausweichroute beitragen kann oder nicht, hängt von der Art des Schnittpunktes ab. MET2ROUTE₂ differenziert zwei Arten von Schnittpunkten:

- Ein Schnittpunkt befindet sich außerhalb des Risikogebiet-Polygons, wie im Beispiel aus Abbildung 3.27. Damit wird die Funktion *Routenoptimierung* aufgerufen. Diese überprüft ob die direkte Verbindung zwischen den vorangegangenen und den darauffolgenden Risikogebieten einen Konflikt mit weiteren Risikogebieten aufweist. Liegt ein Konflikt vor, wird der Schnittpunkt zur Berechnung des Polygonzuges herangezogen. Anderenfalls wird die Route durch die Abkürzung optimiert, denn durch die direkte Verbindung der benachbarten Objekte wird das mittlere Objekt automatisch umflogen.
- Ein Schnittpunkt gehört zur konvexen Hülle des Risikogebiet-Polygons. Der Algorithmus vergleicht daher die Ausweichrichtungparameter der beiden benachbarten Risikogebiete. Stimmen diese überein, wird die Funktion *Routenoptimierung* aktiviert. Weist die mögliche Verbindungslinie zwischen den benachbarten Risikogebieten weder mit dem mittleren Risikogebiet noch mit weiteren Risikogebieten einen Konflikt auf, kann die Route wie im Beispiel aus Abbildung 6.8 in Anhang 6 abgekürzt werden. Wenn die Verbindungslinie einen Konflikt aufweist, wie in Abbildung 3.28(b) dargestellt oder die Ausweichrichtungparameter der benachbarten Risikogebiete variieren, wie in Abbildung 6.7 in Anhang 6, wird keine Abkürzung realisiert. Der Schnittpunkt wird ein Teil des Polygonzuges der Ausweichroute.

Ist kein Schnittpunkt vorhanden, werden Informationen von demjenigen Risikogebiet herangezogen, an dem beide Tangentenabschnitte anliegen. Auf der konvexen Hülle dieses Risikogebietes werden, wie auch bei der Vorgehensweise von MET2ROUTE beschrieben (s. Kapitel 3.2.2), die zu den beiden Tangentenabschnitten zugehörigen Berührungspunkte EP_k und XP_k , mit $k \in \mathbb{N}$ als Objektkennung berechnet. Der kürzeste Abstand auf der konvexen Hülle zwischen den Berührungspunkten wird zur Bestimmung des Polygonzuges der Ausweichroute verwendet. Die Erstellung der Polygonzüge von Ausweichrouten soll anhand von unterschiedlichen Beispielen aus Kapitel 3.2.5 erläutert werden. Im Fall aus Abbildung 3.28 konnten drei konfliktfreie Tangentenabschnitte entsprechend der Richtungsvorgabe gefunden werden. Die ersten zwei schneiden sich im Schnittpunkt SP_2 . Der zweite und der dritte Tangentenabschnitte schneiden sich hingegen nicht, weshalb auf dem gemeinsamen Risikogebiet P_1 die Berührungspunkte EP_1 und XP_1 sowie der Abschnitt der konvexen Hülle Conv_{P_1} bestimmt werden. Der resultierende Polygonzug der Ausweichroute setzt sich

zusammen aus:

$$\text{Polygonzug} = A, SP_2, EP_1, \text{Conv}_{P_1}, XP_1, B.$$

Im zweiten Beispiel aus Abbildung 3.29 untersucht der Algorithmus vier konfliktfreie Tangentenabschnitte auf potentielle Schnittpunkte. Bis auf das letzte Paar von Tangentenabschnitten liegen dort keine Schnittpunkte vor, wodurch der Algorithmus für die Risikogebiete P_1 und P_2 die Abschnitte der konvexen Hüllen heranzieht. Der Polygonzug der Ausweichroute hat die Form:

$$\text{Polygonzug} = A, EP_1, \text{Conv}_{P_1}, XP_1, EP_2, \text{Conv}_{P_2}, XP_2, SP_3, B.$$

Im Alternativfall aus Abbildung 3.29 setzt sich der Polygonzug der Ausweichroute aus dem Schnittpunkt SP_2 von den ersten zwei Tangentenabschnitten, einem Abschnitt der konvexen Hülle auf dem Risikogebiet P_1 und einem Abschnitt der konvexen Hülle auf dem Risikogebiet P_3 zusammen:

$$\text{Polygonzug} = A, SP_2, EP_1, \text{Conv}_{P_1}, XP_1, EP_3, \text{Conv}_{P_3}, XP_3, B.$$

Weitere Beispiele für die Bestimmung einer Ausweichroute mit MET2ROUTE₂ sind in Anhang 6 aufgeführt.

4

Anwendungsbereiche von DIVMET

Im folgenden Kapitel erfolgt eine Validierung des entwickelten Modells DIVMET, um erste Aussagen über die Anwendbarkeit in realen Situationen machen zu können. Dafür müssen bestimmte Annahmen getroffen werden, welche einen Vergleich der Simulation mit realen Bedingungen erlauben. Die Validierung soll Vor- und Nachteile des entwickelten Modells aufdecken und die Richtung für eine Weiterentwicklung vorgeben. Anschließend wird eine Anwendungsmöglichkeit von DIVMET vorgestellt. Neben der primären Anwendung von DIVMET als Hilfestellung für Lotsen und Piloten bei der Routenfindung bei ungünstigen Wetterbedingungen, könnte das Modell in Kombination mit einem Flugverkehrssimulationsmodell wie NAVSIM für Studien zur Änderung der Luftraumkapazitäten bei Gewitter herangezogen werden. Da die Anwendungsbereiche von Mitgliedern der Arbeitsgruppe kontinuierlich weiterentwickelt werden, wird im Folgenden der Entwicklungsstand aus dem Jahr 2013 zusammengefasst.

4.1 Validierung von DIVMET

Um die Güte eines Modells zu bestimmen, werden in der Regel Validierungen durchgeführt. Diese liefern keineswegs eine allgemeingültige Aussage über ein Modell, vielmehr spiegeln sie die Anwendbarkeit auf eine konkrete Situation wieder. Auch für DIVMET wurde eine Validierung anhand von realen Anflugtrajektorien auf den Hong Kong International Airport (HKIA) bei Gewitter durchgeführt. Das Besondere an diesem Flughafen ist seine Präsenz im Flugverkehr. Er gehört zu den größten internationalen Flughäfen und befand sich im Jahr 2014 auf Platz drei der Liste mit den größten Flughäfen nach Passagieraufkommen sowie auf Platz eins beim Transport von Luftfracht [55]. Täglich werden dort um die 1100

Flüge von mehr als 100 Fluggesellschaften abgefertigt [6]. Diese Zahlen resultieren in einem großen Koordinationsaufwand, der auch bei Störungen des Flughafenbetriebs, zum Beispiel in Form eines Gewitters im Nahverkehrsbereich des Flughafens, reibungslos funktionieren muss. Um den Koordinationsaufwand bei Gewitter zu reduzieren, könnte DIVMET zukünftig zur Ermittlung von sicheren Flugtrajektorien beitragen. Auch die Anwendung als Unterstützungsprogramm für den Arrival Manager (AMAN), ein System zur Koordinierung des ankommenden Flugverkehrs [81], ist denkbar. Konkret könnte die Berechnung der voraussichtlichen Ankunftszeit (engl. *estimated time of arrival*, ETA) bei Schlechtwetter unterstützt werden.

Als Datenquelle für die Validierung wurde Bildmaterial verwendet, welches die zu einem bestimmten Zeitpunkt aufgenommenen Positionen von Flugzeugen beim Anflug auf HKIA sowie Blitzinformationen und Radarechointensitäten im Nahverkehrsbereich des Flughafens enthält. Das gesamte Bildmaterial bezieht sich auf den 8. September 2010. Die Bereitstellung der Daten erfolgte auf Basis einer Kooperation mit dem *Hong Kong Observatory*. Aus der Bildabfolge konnten mit einem externen Programm sowohl die Positionen der Flugzeuge im Landeanflug auf HKIA als auch die Gewitterpolygone mit Radarechointensitäten größer als 37 dBZ extrahiert und jeweils mit dem entsprechenden Zeitstempel versehen werden [82]. Damit war die Datengrundlage für die Durchführung einer Simulation gegeben. Für die Abschätzung weiterer Simulationsparameter und für die Erstellungen Referenztrajektorien wurden die extrahierten Daten analysiert. Dabei konnten sechs relevante Flugtrajektorien identifiziert werden, bei denen ein Ausweichmanöver stattgefunden hat. Andere Trajektorien werden nicht weiter betrachtet. Die von den sechs ausgewählten Flugzeugen real geflogenen Flugtrajektorien im Anflug auf HKIA am 8. September 2010 sind in Abbildung 4.1 zur Ankunftszeit dargestellt. Die dazu gehörigen Routenparameter sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Insgesamt zeigte sich folgendes Flugverhalten:

- In den meisten Fällen waren die Flugzeuge den Gewitterzellen ausgewichen.
- Beim Ausweichen wurde ein Sicherheitsabstand zu den Gewitterzellen eingehalten, dessen Größe mit 1 NM abgeschätzt wurde. Dieser Wert dient für die nachfolgenden Simulationen als Simulationsparameter. Aufgrund der Gewitterverteilungen und der limitierten Manövrierbarkeit im Nahverkehrsbereich des Flughafens fällt dieser Wert deutlich geringer aus als der empfohlene Sicherheitsabstand zu einem Gewitter, welcher im Kapitel 2.2.3 diskutiert wurde.
- Zur Regulierung des Anflugverfahrens wurden im entsprechenden Luftraumsektor Warteschleifen (engl. *holdings*) geflogen.

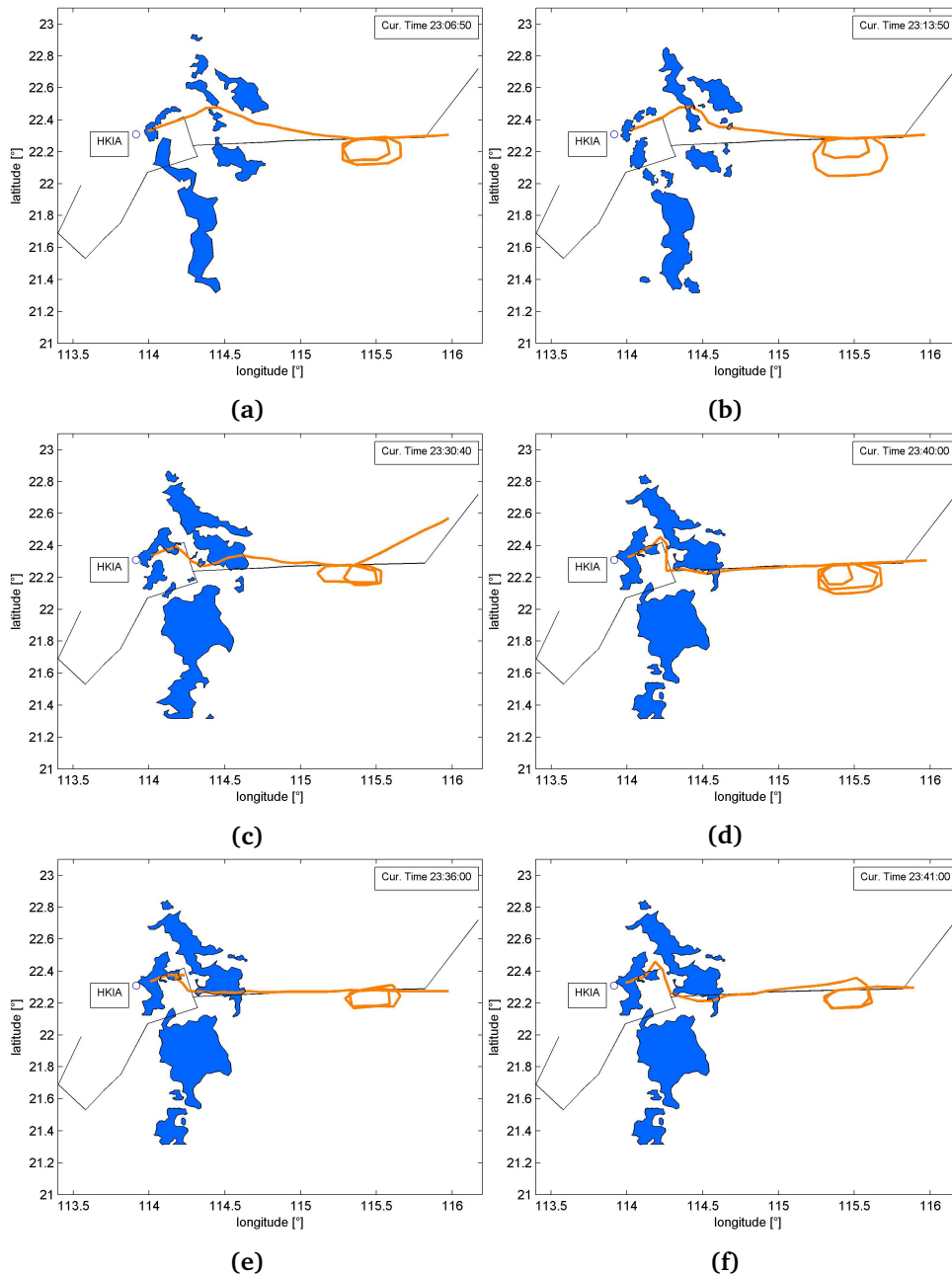


Abbildung 4.1: Dargestellt sind die real geflogenen Flugtrajektorien von sechs ausgewählten Flugzeugen im Anflug auf HKIA am 8. September 2010. Bei allen sechs Trajektorien wurden die Gewitter umflogen, was mit einem Verlassen der regulären Routen bzw. Flugstraßen (in Schwarz) verbunden war. Weiterhin wurden bei allen Routen Warteschleifen in einem dafür vorgesehenen Luftraumbereich geflogen. Die waren für die Regulierungen des Anflugverfahrens notwendig.

Folglich lassen sich für die Simulation folgende Festlegungen für die Erstellung der Referenztrajektorien tätigen, welche in Tabelle 4.1 zusammengefasst sind. Die Referenztrajektorien sind notwendig, um eine mit DIVMET errechnete Ausweichroute mit realen

Flugdaten vergleichen zu können.

Für die Durchführung einer Simulation in DIVMET mussten noch weitere Annahmen getroffen werden. Es wurde angenommen, dass sich alle Flugzeuge auf einem konstanten Flugniveau bewegen. Weiterhin wurde für jede Trajektorie die mittlere Fluggeschwindigkeit bestimmt und diese für die Simulation des Flugverlaufs als konstant angenommen. Als Simulationsanfang wurde das Ende des Warteschleifenfluges gewählt, also der Punkt, ab dem die Ansteuerung auf den Zielflughafen HKIA beginnt. Als Trajektorienende wurde ein STAR-Wegpunkt festgelegt, da dieser zum Erreichen des Zielflughafens angefliegen werden muss. Jede Ausweichroute in der Simulation endet in diesem STAR-Wegpunkt. Eine Rückkehr zur geplanten Route findet daher nicht statt. Die Rückkehr-Problematik wird in der nachfolgenden Arbeit von Patrick Hupe [83] erläutert.

Mit den genannten Annahmen konnten die realen Trajektorien in Referenztrajektorien umgerechnet werden. Die Start- und Endpunkte von jeder Referenztrajektorie wurden in DIVMET als geplante Routen verwendet. Zusammen mit den extrahierten Gewitterpolygonen im Anflugbereich des HKIA wurden schließlich für die sechs geplanten Routen in DIVMET Ausweichrouten simuliert. Dafür wurde das Sichtfeld so groß gewählt, dass der HKIA am Startpunkt der geplanten Route im Sichtfeld enthalten war. Dabei ist zu ergänzen, dass unter realen Bedingungen ein STAR-Wegpunkt der zur gewählten Landebahn gehört, mit einem bestimmten Heading angefliegen wird. Eine spätere Kursänderung kann nicht realisiert werden. Aufgrund der Tatsache, dass der Anflug eines beliebigen Wegpunktes aus einer vorgegebenen Richtung in DIVMET bisher nicht implementiert wurde, ist zu erwarten, dass die simulierten Ausweichrouten und die verwendeten Referenztrajektorien im Routenabschnitt um den STAR-Wegpunkt voneinander abweichen.

Tabelle 4.1: Routenparameter der ausgewählten real geflogenen Trajektorien im Anflug auf HKIA am 8. September 2010.

N°	Startzeit	Ankunftszeit	mittl. Geschwind. in m s^{-1}	Ausweichrichtung
1	22:26	23:07	161	rechts
2	22:28	23:14	153	rechts
3	22:47	23:31	144	rechts
4	22:50	23:40	165	links
5	22:51	23:36	143	links
6	23:00	23:41	154	links

Im Folgenden werden die Ergebnisse der sechs simulierten Trajektorien vorgestellt. Die Darstellung erfolgt jeweils zu ausgewählten, für den Flugverlauf markanten Zeitpunkten. In den Abbildungen sind die Referenztrajektorien in orange und die berechneten Ausweichrouten

in blau dargestellt.

Beispiel 1

Im ersten Beispiel aus Abbildung 4.2 stimmen die untersuchten Trajektorien zunächst gut überein. Aufgrund fehlender Hindernisse zwischen der Startposition und dem Zielpunkt, steuert das simulierte Flugzeug das Ziel direkt an. Ein Ausweichmanöver findet erst statt, als in Folge von Aktualisierung der Gewitterinformationen der Algorithmus einen Konflikt bezüglich der aktuellen Route erkennt. Die errechnete Ausweichroute verläuft zwischen zwei Gewitterzellen und behält ihre Gültigkeit bis zum Erreichen des Zielpunktes.

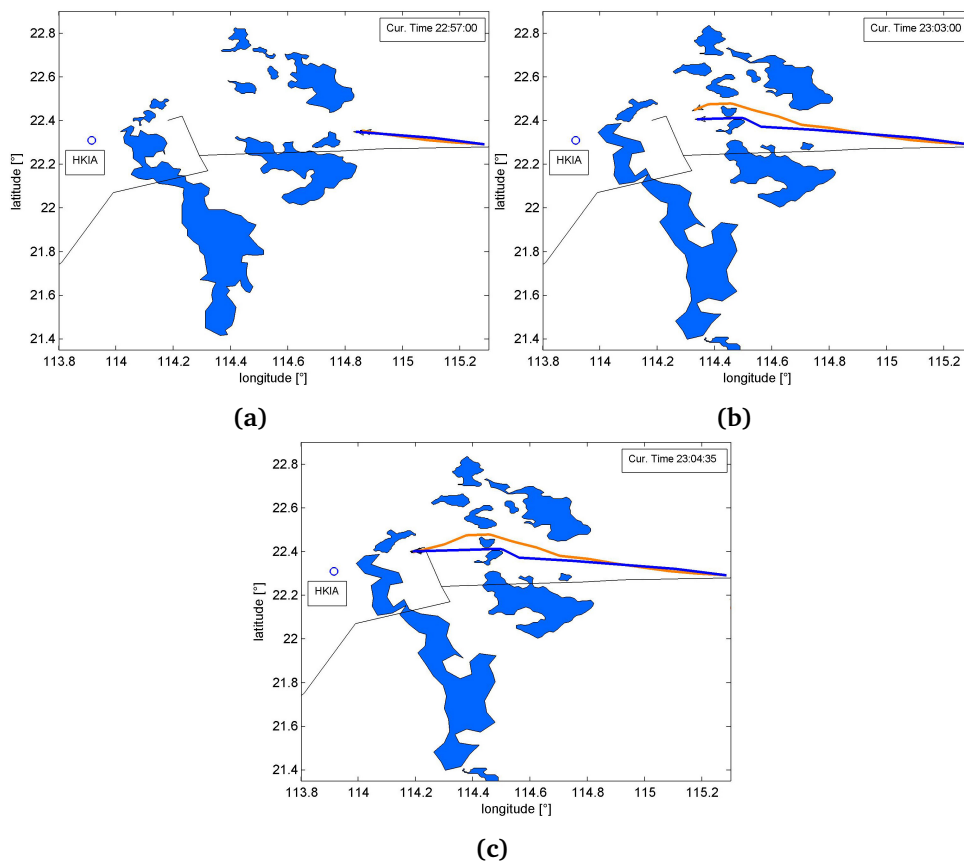


Abbildung 4.2: Die simulierte Flugroute (in Blau) zeigt zunächst einen ähnlichen Verlauf wie die Referenztrajektorie (in Orange) (a). Nach Aktualisierung der Gewitterinformationen verläuft die simulierte Ausweichroute zwischen zwei Gewitterzellen. In der Realität hat das Flugzeug die nah beieinander liegenden Gewitterzellen nördlich umflogen (b). Der Zielpunkt wird gleichzeitig erreicht (c).

Bei der Referenztrajektorie hingegen weicht das Flugzeug großräumiger nach Norden aus. Die Route verläuft zwischen zwei nördlich liegenden Gewitterzellen, die einen größeren

Abstand zueinander aufweisen als die zwei Gewitterzellen zwischen denen die von DIVMET vorgeschlagene Ausweichtrajektorie verläuft. Argumente für das großräumigere Ausweichen könnten zum einen die Steigerung der Flugsicherheit sein, zum anderen wäre der STAR-Wegpunkt von Norden aus günstiger anzufliegen. In beiden Fällen erreichen die Flugzeuge etwa gleichzeitig den Zielpunkt.

Beispiel 2

Wenige Minuten nachdem beide Flugzeuge aus dem ersten Beispiel ihren Zielpunkt erreicht haben, zeigt die Aktualisierung der Gewitterinformationen die Vereinigung derjenigen Gewitterzellen, zwischen denen die simulierte Flugtrajektorie aus dem ersten Beispiel verlief, dargestellt in Abbildung 4.3.

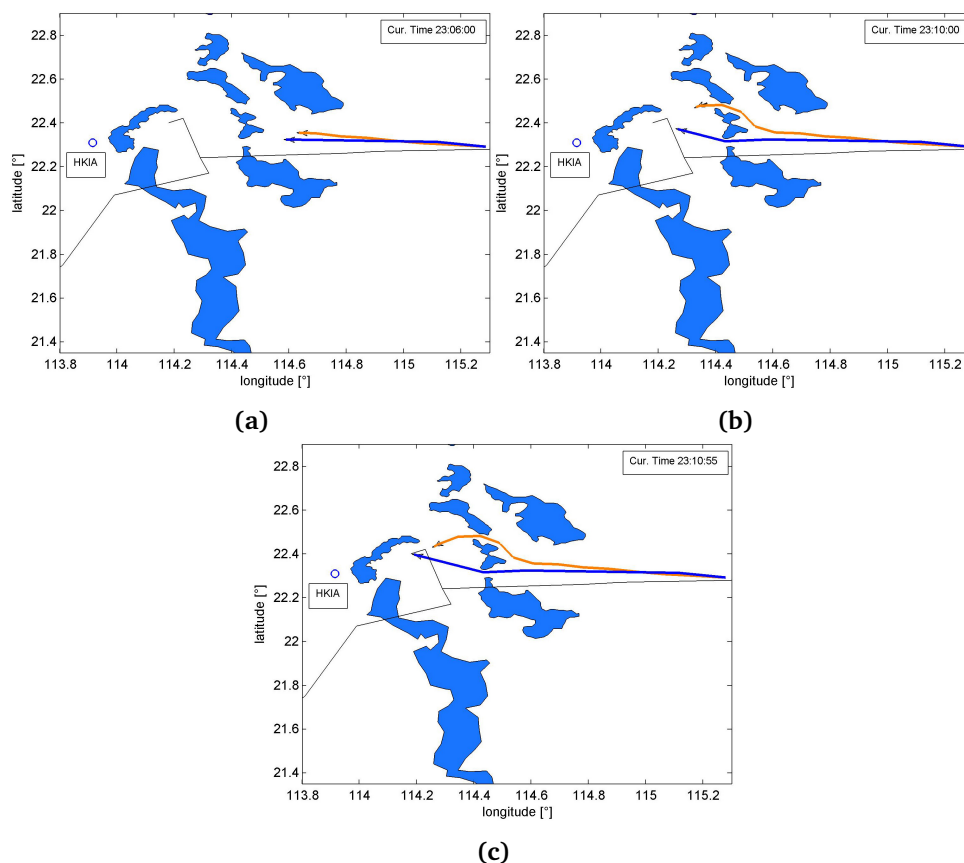


Abbildung 4.3: Im zweiten Beispiel findet während des untersuchten Zeitfensters keine Aktualisierung der Gewitterinformationen statt. Die zum Zeitpunkt des Startes berechnete Ausweichroute (in Blau) wurde ohne weitere Korrekturen in der Simulation abgeflogen. Die Referenztrajektorie und die simulierte Ausweichroute verlaufen in unterschiedlicher Richtung um die Gewitterzelle. Im Vergleich zur Referenztrajektorie ist die simulierte Flugroute insgesamt kürzer und weist weniger Kursänderungen auf.

Damit ergeben sich für Flugzeuge, die auf dieses Gewitter zufliegen zwei Optionen zum Ausweichen: nach links oder nach rechts. Die Referenztrajektorie verläuft rechts um die Gewitterzelle. Ihr Verlauf ähnelt dem vorangegangenen Beispiel. Auf der simulierten Ausweichroute hingegen würde das Gewitter von links und damit in südlicher Richtung umflogen werden. Bei beiden Trajektorien wird ein ähnlicher Sicherheitsabstand zum Gewitter eingehalten. Im Vergleich zur Referenztrajektorie ist die simulierte Flugroute insgesamt kürzer und zeichnet sich durch weniger Kursänderungen aus. Entsprechend würde ein Flugzeug auf der simulierten Route früher am Zielort ankommen. Während des untersuchten Zeitfensters fand keine Aktualisierung der Gewitterinformationen statt. Somit konnte die zum Zeitpunkt des Startes berechnete Ausweichroute ohne weitere Korrekturen in der Simulation abgeflogen werden.

Beispiel 3

Mit dem nächsten Beispiel werden die Nachteile, welche eine diskontinuierliche Aktualisierung der Gewitterinformationen bei einer Flugroutensimulation mit sich bringt, demonstriert. So befindet sich das simulierte Flugzeug nach einem sicheren Verlauf der ersten Routenhälfte aufgrund einer Aktualisierung der Gewitterinformationen auf einmal in einem Wetterobjekt. Dieses Wetterobjekt wird in der Folge von DIVMET nicht zur Routenberechnung herangezogen. Da keine weiteren Hindernisse zwischen Flugzeugposition und dem Zielpunkt vorzufinden sind, wird das Ziel von dort direkt angeflogen. Auch das Flugzeug auf der Referenztrajektorie befindet sich laut verwendeten Daten temporär innerhalb der Wetterobjekte. Jedoch können, aufgrund fehlender Informationen zur Höhenverteilung der Wetterobjekte und der Flugzeugpositionen, Überflüge nicht ausgeschlossen werden. Außerdem werden, wie bereits im Kapitel 2.2.4 diskutiert, Gewitter am Zielort aufgrund der limitierten Manövrierbarkeit häufig durchflogen. Im letzten Drittel der Route findet eine weitere Kursänderung in der Referenztrajektorie statt. Diese ist nicht primär auf die Gewitterhindernisse zurückzuführen und resultiert aus der Koordination des Anflugverfahrens durch die Lotsen.

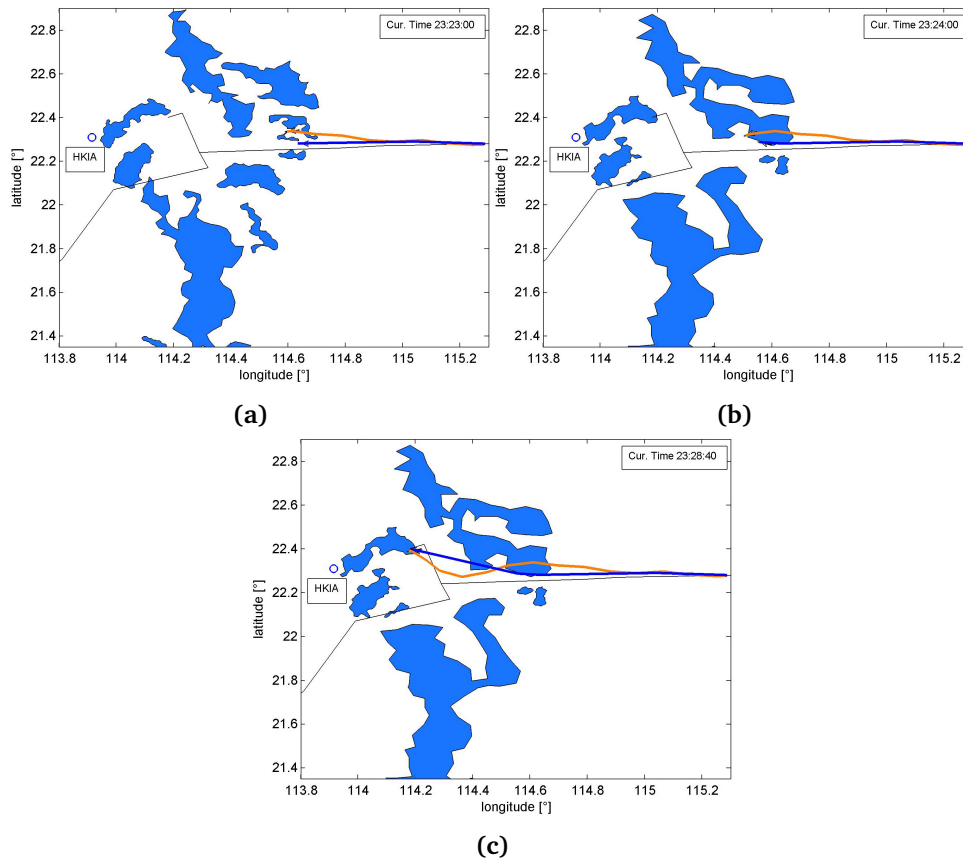


Abbildung 4.4: Im dritten Beispiel verlaufen sowohl die simulierte Flugroute (in Blau) als auch die entsprechende Referenztrajektorie (in Orange) temporär durch Wetterobjekte. Bei der simulierten Ausweichroute befindet sich das Flugzeug aufgrund der diskontinuierlichen Aktualisierung der Gewitterinformationen plötzlich innerhalb eines Wetterobjektes. Dieses wird dann nicht mehr von DIVMET berücksichtigt, woraufhin das Flugzeug direkt die Zielposition ansteuert. Aufgrund der fehlenden Informationen über die Höhenverteilung der Wetterobjekte und über die vertikalen Flugzeugpositionen können weder ein Überflug noch ein Durchflug des Gewitters, dargestellt in (a) und (b), bei der Referenztrajektorie ausgeschlossen werden. Die Kursänderung der Referenztrajektorie im letzten Drittel der Route ist nicht auf Gewitterhindernisse zurückzuführen (c).

Beispiel 4

Im vierten Beispiel weisen die simulierte Route und die dazugehörige Referenztrajektorie größtenteils einen ähnlichen Verlauf auf, welcher in den Abbildungen 4.5(a) und 4.5(b) dargestellt ist. Beide Flugzeuge umfliegen das großräumige Gewitter aus südlicher Richtung. Die Abweichungen im letzten Drittel sind auf das Gewitter am Zielort sowie die situationsbedingten notwendigen Regulierungen des Anflugverfahrens bei der Referenztrajektorie zurückzuführen. Bei dem simulierten Flugverlauf bleibt das Gewitter am Zielort erneut unberücksichtigt und die Zielposition wird direkt angesteuert.

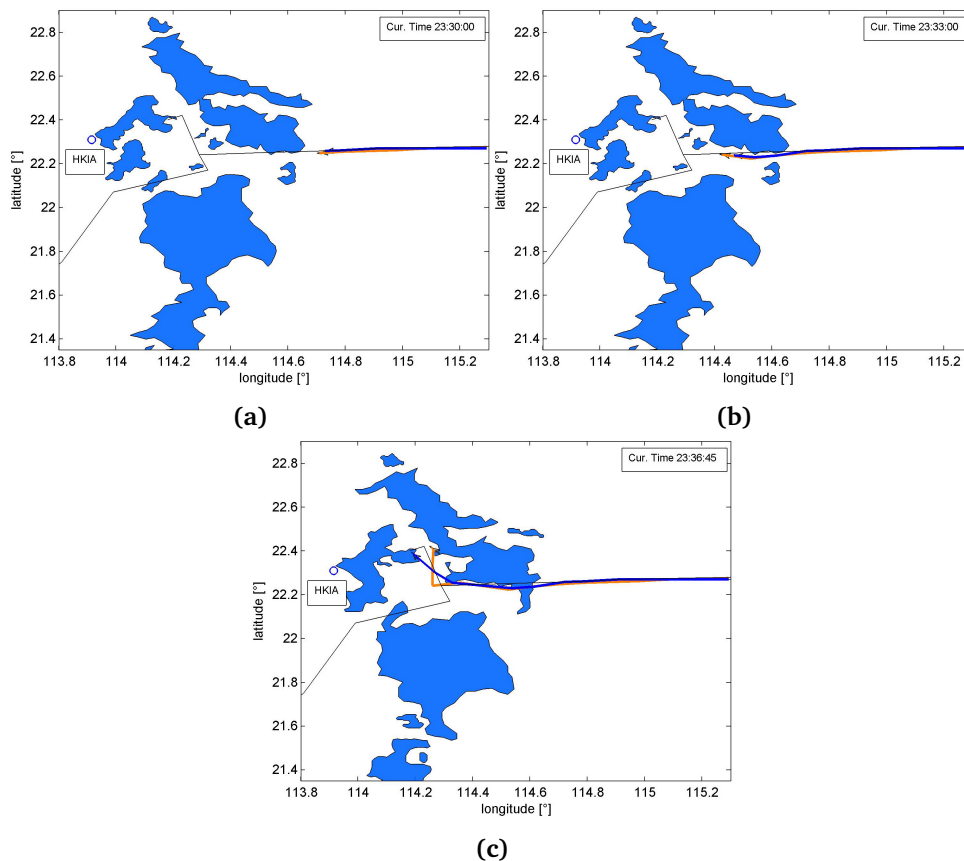


Abbildung 4.5: Die simulierte Flugroute (in Blau) und die vierte Referenztrajektorie (in Orange) zeigen eine gute Übereinstimmung (a) und (b). Beide verlaufen südlich um das großräumige Gewitter. Die Unterschiede in den Routenverläufen (c) sind auf das Gewitter am Zielort zurückzuführen.

Beispiel 5

Auch im fünften Beispiel zeichnen sich beide Trajektorien zunächst durch eine gute Übereinstimmung im Flugverlauf aus und verlaufen bis zum Zeitpunkt, welcher in Abbildung 4.6(c) dargestellt wird, parallel. Zu diesem Zeitpunkt werden die Gewitterinformationen aktualisiert und beide Flugzeuge befinden sich scheinbar in einem Wetterobjekt. Aufgrund der kontinuierlichen Verfügbarkeit der aktuellen Gewitterpositionen im Fall der Referenztrajektorie lässt sich hier ein Überflug vermuten. Schließlich führt das Gewitter am Zielort zu weiteren Abweichungen der Flugverläufe.

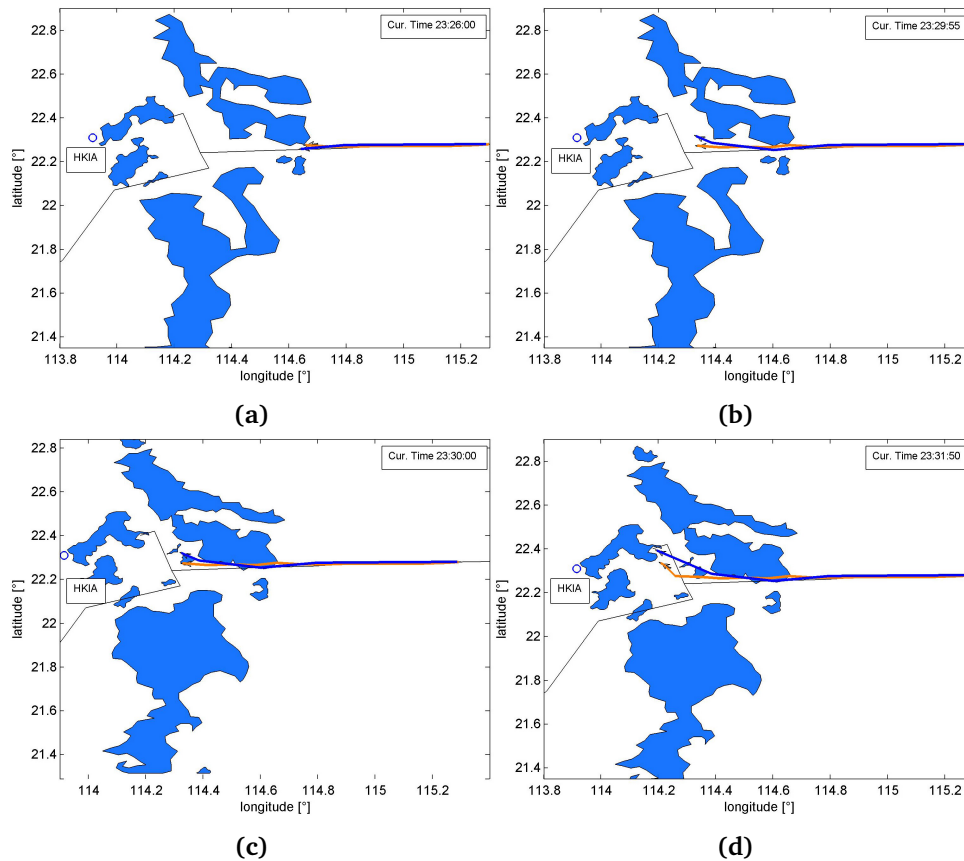


Abbildung 4.6: Die simulierte Flugroute (in Blau) stimmt gut mit der fünften Referenztrajektorie (in Orange) bis zur Aktualisierung der Gewitterinformationen überein (a-b). Zum Zeitpunkt der Aktualisierung befinden sich beide Flugzeuge in der vorliegenden Darstellung innerhalb eines Wetterobjektes (c). Das Gewitter am Zielort wird von DIVMET bei der Ausweichroutenberechnung erneut nicht berücksichtigt (d).

Beispiel 6

Im letzten der sechs Beispiele stimmt die simulierte Ausweichtrajektorie am besten mit der zugehörigen Referenztrajektorie überein. Dies ist hauptsächlich auf die Tatsache zurückzuführen, dass sich das simulierte Flugzeug zum Zeitpunkt der Aktualisierung der Gewitterinformationen außerhalb der Wetterobjekte befindet. Die zum Zeitpunkt des Startes errechnete Ausweichroute wird ohne weitere Korrekturen abgeflogen. Der Sicherheitsabstand zum großräumigen Wetterobjekt wird zu jeder Zeit eingehalten. Lediglich das Gewitter am Zielort wird von DIVMET bei der Routenfindung erneut vernachlässigt.

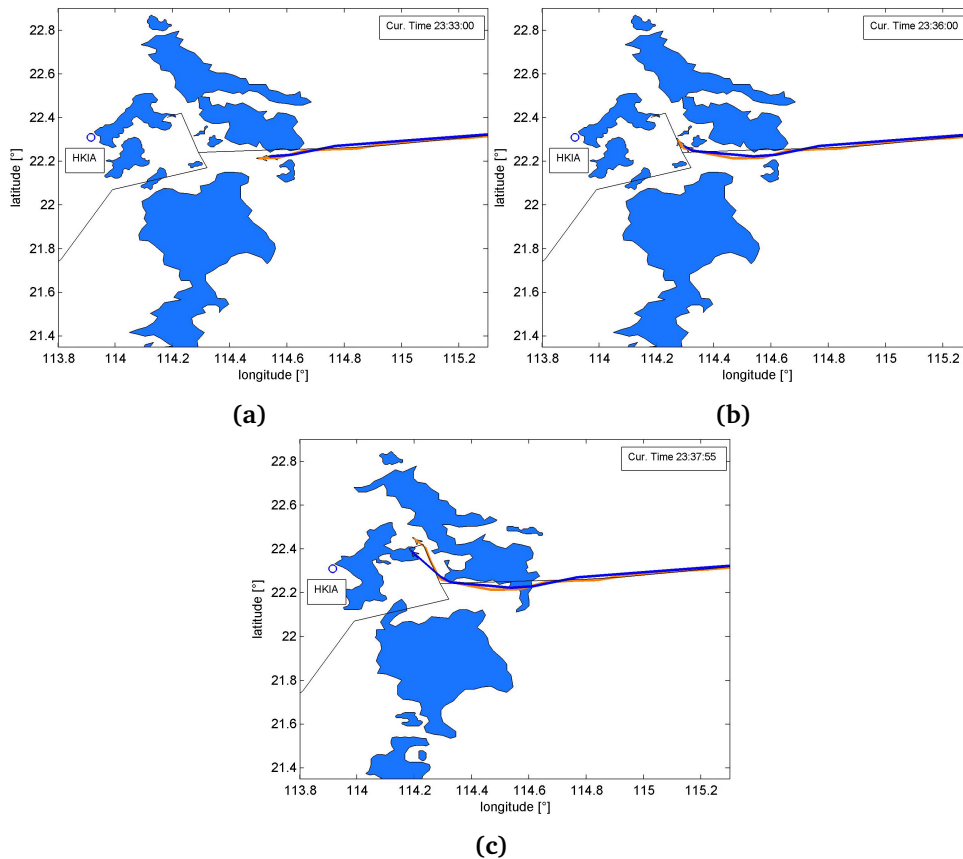


Abbildung 4.7: Ein Vergleich der simulierten Flugroute in blau mit der sechsten Referenztrajektorie in orange zeigt die beste Übereinstimmung der Flugverläufe (a-b). Lediglich das Gewitter am Zielort, welches von DIVMET unberücksichtigt bleibt, führt zu Abweichungen der beiden Trajektorien (c).

Die Validierung von DIVMET anhand der Anflugdaten auf HKIA offenbart Stärken und Defizite des entwickelten Modells. Da DIVMET in der dargestellten Version ausschließlich für Trajektorien im Enroute-Flugabschnitt konzipiert wurde, sind die meisten Unstimmigkeiten im letzten Drittel der Anflugtrajektorie, wie im Vorfeld erwartet, vorzufinden. Die Koordination des Anflugverfahrens von Seiten der Lotsen sowie die Einhaltung eines bestimmten Headings beim Anflug des STAR-Wegpunktes sind nicht in DIVMET implementiert. Im Enroute-Flugabschnitt weisen die simulierten Ausweichrouten und die Referenztrajektorien Routen in den Beispielen vier bis sechs einen ähnlichen Verlauf auf. Die gewählte Ausweichrichtung und der eingehaltene Sicherheitsabstand zum Gewitter stimmen in diesen Fällen gut überein. Die Unstimmigkeiten im Enroute-Flugabschnitt sind größtenteils auf die diskontinuierliche Aktualisierung der Gewitterinformationen im simulierten Flugverlauf zurückzuführen. Insbesondere dann, wenn sich ein Flugzeug infolge einer solchen Aktualisierung plötzlich innerhalb eines Wetterobjektes befindet und kein Ausweichen mehr möglich

ist. Im ersten und zweiten Beispiel weichen die Ausweichrichtungen bei den simulierten Ausweichrouten von denen der Referenztrajektorien ab. Diese Variation könnte sowohl durch das implementierte Entscheidungskriterium als auch durch die Koordination des Anflugverfahrens bedingt sein.

Die durchgeführte Validierung gibt die Richtung für die Weiterentwicklung des DIVMET-Modells vor: Zum einen sollte der Anflug eines Wegpunktes mit einem festgelegten Flugheading als ein Parameter des Zielpunktes implementiert werden. Zum anderen würde die Erhöhung der Aktualisierungsfrequenz der Gewitterinformationen, zum Beispiel durch die Verwendung von Nowcast-Daten oder durch die Interpolation der verfügbaren Informationen, das plötzliche Hineinfliegen in ein Wetterobjekt verhindern.

In einer weiteren umfangreichen Studie [84] wurden gewitterinduzierten Ausweichrouten im Anflugbereich des HKIA identifiziert. Die Simulation dieser Anflugtrajektorien in DIVMET lieferte Ausweichrouten, welche von den lokalen Fluglotsen als möglich und realistisch bezeichnet wurden.

4.2 DIVMET-NAVSIM Kommunikation

Die Anbindung von DIVMET an ein globales Flugverkehrsimulationsmodell wie NAVSIM, welches von Professor Rokitsansky von der Paris Lodron Universität in Salzburg in Zusammenarbeit mit der 4D-Aerospace Research and Simulation GmbH entwickelt wurde, ermöglicht eine realitätsnahe Darstellung des Flugverkehrs bei Gewitter. NAVSIM stellt eine Simulationsumgebung für die Kommunikation, Navigation und Überwachung im Flugverkehr dar und ermöglicht in Echtzeit, aber auch in Schnellzeit (mit bis zur 60-fachen Geschwindigkeit), den Flugverkehr von Landebahn zu Landebahn zu simulieren. NAVSIM kann bis zu 350.000 Flüge pro Tag parallel ausführen und eignet sich damit auch für die Simulation des zukünftigen Flugverkehrs [85]. Die verwendeten Flugtrajektorien als Eingabedaten für eine Simulation können dabei entweder aus dem Luftfahrthandbuch entnommen werden oder den realen Flugtrajektorien entsprechen. Die Flugdurchführung wird anhand der BADA-Flugzeugdaten (BADA steht für *Base of Aircraft Data*), welche für jeden Flugzeugtyp eine spezifische Charakteristik für die Realisierung von Abflug, Landung, Kurvenflug etc. enthalten, von NAVSIM realistisch simuliert. Der Simulationsprozess wird auf einem NAVSIM-Monitor, der einem Radarbildschirm ähnelt und in Abbildung 4.8 zu sehen ist, visualisiert. Die hohe Flexibilität von NAVSIM und die bereits vorhandene Kommunikationsbibliothek mit einer MATLAB-JAVA Schnittstelle erlauben eine einfache Realisierung der

Kopplung beider Modelle. Die ersten Schritte bei der Realisierung dieser Kopplung sind in Kapitel zusammengefasst.

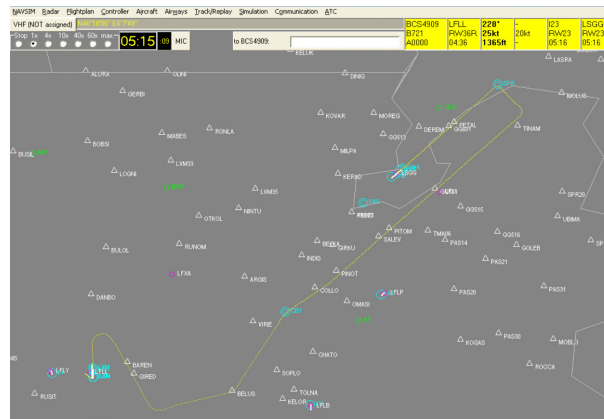


Abbildung 4.8: Simulation eines Fluges von Lyon (ICAO-Code: LFL) nach Genf (ICAO-Code: LSGG) in NAVSIM. Die aktuellen Fluginformationen (heading 228°, Geschwindigkeit 25 kn und Flughöhe 1376 ft) befinden sich in der dritten gelben Spalte von links. Die Änderungen im Flugverlauf werden entweder vom Benutzer direkt über die Eingabebezeile realisiert oder im gekoppelten Modus mit DIVMET über XML-Nachrichten induziert.

4.3 Sektorbelastungsstudie

Die Kopplung von DIVMET und NAVSIM ermöglicht es, komplexe Fragestellungen, über die Routenfindung bei Gewitter hinausgehend, zu untersuchen. Angeregt von Seiten der Österreichischen Gesellschaft für Zivilluftfahrt (Austro Control) wurde das Projekt MET2ATM in Kooperation mit der Universität Salzburg initiiert. Dieses hatte das Ziel, die Kapazität von Luftraumsektoren bei Gewitter zu untersuchen [83, 85]. Die Sektorkapazität spiegelt sich in der Arbeitsbelastung der Lotsen in den Kontrollzentren wieder. Nur eine begrenzte Anzahl von Flugbewegungen in einem Sektor kann durch Lotsen sicher koordiniert werden, wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben. Steigt die Anzahl der Flugbewegungen in einem Sektor zum Beispiel in Folge von Routenumleitungen bei Gewitter über einen Kapazitätsgrenzwert hinaus, müssen Maßnahmen eingeleitet werden um den Verkehr weiterhin sicher zu regulieren. Dazu gehören eine laterale und vertikale Aufteilung des Sektors in mehrere Untersektoren, die dann jeweils von zwei Lotsen überwacht werden. Die Koordinierung des Personals erfolgt dabei in der Regel unmittelbar vor dem Erreichen des Kapazitätsgrenzwertes, was zu einer weiteren Zunahme der Arbeitsbelastung führen kann. An dieser Stelle könnte eine Vorhersage der Sektorkapazität bei Gewitter durch die Kopplung von DIVMET-NAVSIM auch die Arbeit des Personalkoordinators unterstützen. Von Seiten der Flugsicherung wäre eine

Vorhersage für einen Zeitraum von zwei Stunden wünschenswert, denn dieses Zeitintervall entspricht der mittleren Flugdauer im europäischen Luftraum.

Das Prinzip einer Sektorbelastungsstudie mit DIVMET lässt sich anhand des folgenden Beispiels demonstrieren. Zunächst wird der Luftraum, in diesem Fall über Österreich, in Sektoren aufgeteilt und durchnummeriert. Durch diese Sektoren verlaufen Flugstraßen, in Abbildung 4.9 in Blau dargestellt, auf denen sich Flugzeuge bewegen. Im vorliegenden Beispiel folgen die Flugzeuge nacheinander und in äquidistanten Zeitabständen von 5 Minuten mit identischen Geschwindigkeiten den Flugstraßen. Kommt es zu einem Konflikt mit einem Risikogebiet, verlässt das entsprechende Flugzeug die Flugstraße und setzt die Bewegung auf einer Ausweichroute fort, dargestellt in Abbildung 4.10(b,d und f) in Magenta.

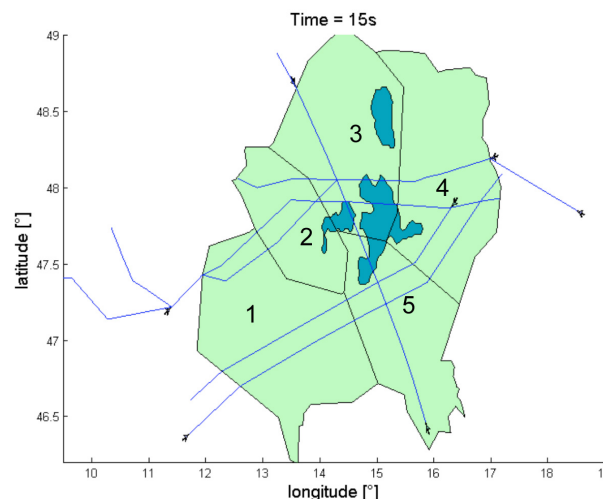


Abbildung 4.9: Simulationsumgebung für eine Sektorbelastungsstudie mit fünf Sektoren im Luftraum über Österreich. Es werden Flugstraßen (in Blau) dargestellt und eine willkürlich gewählte zeitabhängige Gewittergeometrie, für die im Folgenden Ausweichrouten simuliert werden.

In diesem Beispiel erfolgt die Aktualisierung der willkürlich gewählten Gewitterpositionen alle 15 Minuten. Als ein Maß für die Flugzeugdichte in einem Sektor werden so genannte *occupancy counts* verwendet, welche die Anzahl der Flugzeuge die sich pro Minute in einem Sektor befinden, wiedergeben. Die occupancy counts werden alle 15 Sekunden berechnet. Ihr Wert wird in den folgenden Grafiken entsprechend den in Tabelle 4.9 beschriebenen Farbcodes dargestellt:

Tabelle 4.2: Farbkodierung der occupancy counts

grün < 6	niedrig
6 < gelb ≤ 10	moderat
10 ≤ rot	hoch.

Bei einem Grenzwert für occupancy counts von 10 wird in diesem Beispiel die Kapazitätsgrenze erreicht. Für die Prinzipstudie wird eine eingeschränkte Pilotensicht angenommen. Folglich werden die Ausweichrouten im Flugverlauf an die vom Sichtfeld erfassten Gewitterinformationen angepasst.

In der dargestellten Sektorbelastungsstudie wurden die folgenden occupancy counts beobachtet:

- Die Zunahme der occupancy counts von einem niedrigen, über einen moderaten auf einen hohen Wert erfolgt im Zeitraum zwischen 600 und 1800 Sekunden ab dem Zeitpunkt des Startes, exemplarisch anhand von drei Sektoren in Abbildung 4.10 dargestellt.
- Die höchste Anzahl von occupancy counts wird im Sektor 1 beobachtet, wie in Abbildung 4.10(a-b) zu sehen ist. Zum Zeitpunkt der höchsten Verkehrsdichte liegen sowohl im Sektor 1 als auch in den angrenzenden Sektoren 2 und 5 keine Gewitteraktivitäten vor.
- Die oberen Sektoren 2, 3 und 4 weisen im Vergleich zu den unteren Sektoren 1 und 5 einen geringeren Anstieg der occupancy counts auf.

Das Maximum der Anzahl der occupancy counts im Sektor 1 resultiert aus dem in DIVMET verwendeten Prinzip des freien Ausweichens, bei dem jede Ausweichroute direkt zum Zielpunkt geführt wird. Würde bei der Berechnung einer Ausweichroute die schnellste Rückkehr zur geplanten Route angestrebt werden, dann würde vermutlich an anderen Sektoren, die sich näher an Risikogebieten befinden, die Kapazitätsgrenze überschritten werden.

Die dargestellte Prinzipstudie zeigt wie komplex eine dynamische Entwicklung der Flugbewegung bei Gewitter sein kann. Die Simulationen liefern dabei eine Hilfestellung, in dem sie ein mögliches Entwicklungsszenario visualisieren und damit die Lotsen besser auf die entsprechenden Situationen vorbereiten. Für die Vorhersage der Zeiten mit Überschreitung der Kapazitätsgrenze mit DIVMET sind sowohl die Nowcast-Gewitterdaten als auch die geplanten Routen notwendig. Stehen diese bereit, könnten Simulationen mit DIVMET insbesondere im Kopplungsmodus mit NAVSIM zur Optimierung des Flugverkehrs und der Verhinderung der Kapazitätsüberschreitung in einzelnen Luftraumsektoren bei Gewitter genutzt werden.

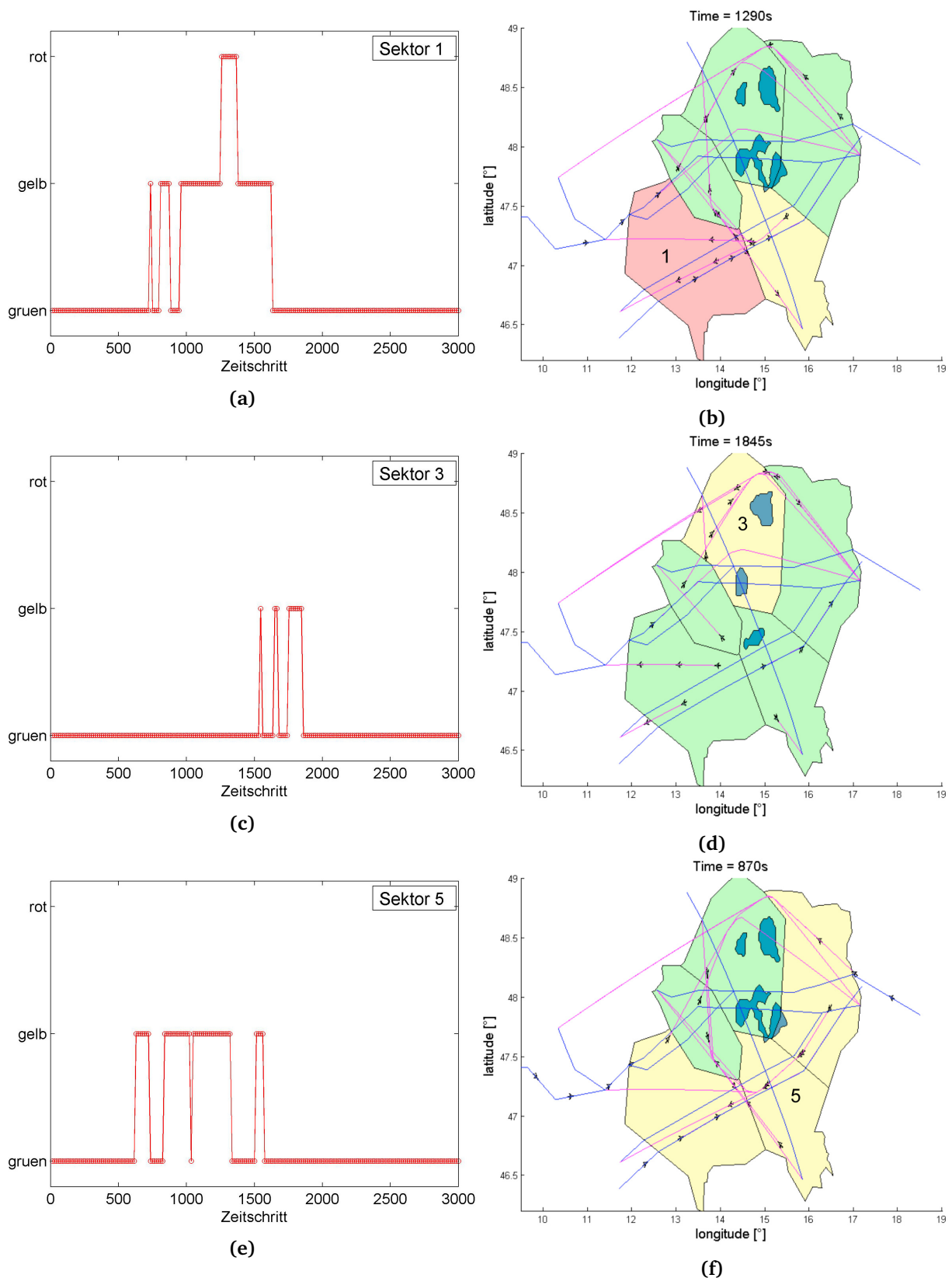


Abbildung 4.10: Zeitabhängige Darstellung der Anzahl der occupancy counts anhand der drei Sektoren 1, 3 und 5 (links) und Zeitpunkte der höchsten Anzahl der occupancy counts in den jeweiligen Sektoren mit farbigen Kodierungen (rechts) in einer Sektorbelastungsstudie über dem Luftraum von Österreich.

5

Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ein Modell zur Berechnung von Flugtrajektorien um eine beliebige Anzahl und Anordnung von Gewittern zu entwickeln. Das entwickelte Modell mit dem Namen DIVMET stellt eine neue Methode zur Generierung von Flugtrajektorien bei Gewitter dar. Die Routenfindung erfolgt auf Grundlage des aktuellen Gewitterinformati-
onsstandes, zu dem alle von einem sogenannten Sichtfeld erfaßten Wetterobjekte beitragen. Das Sichtfeld geht vom Flugzeug aus und simuliert daher den Kenntnisstand eines Piloten. Genau wie ein Pilot sich an vorangegangene Wetterobjekte erinnern kann, werden durch eine Gedächtnisfunktion alle zu früheren Zeitpunkten erfaßten Wetterobjekte bei der Rou-
tenfindung berücksichtigt. Die zweidimensionalen Wetterobjekte aus dem Sichtfeld werden in DIVMET zu sogenannten Risikogebieten umgerechnet. Für die Umrechnung werden die Wetterobjekte um einen festgelegten Sicherheitsabstand vergrößert und anschließend mit Hilfe einer konvexen Hülle vereinfacht. Die konvexen Hüllen stellen für den simulierten Flugverkehr undurchdringliche Hindernisse, die Risikogebiete, dar. Dieses Konzept bietet mehrere Vorteile: Einerseits wird die Sicherheit des Flugverlaufs entlang eines Risikogebietes durch Berücksichtigung des Sicherheitsabstandes zum Gewitter garantiert. Andererseits wird durch Verwendung von konvexen Hüllen unterbunden, dass Flugzeuge in der Simulation in Buchten von vergrößerten Wetterobjekten hineinfliegen. Damit wird auf einfache Weise das Verhalten von Flugzeugführern abgebildet, nicht in eine Gewitterbucht zu manövrieren. Der Verlauf einer Ausweichroute ist an die einstellbaren Simulationsparameter Sichtfeld und Sicherheitsabstand geknüpft. Auf diese Weise kann DIVMET sowohl für die Suche nach einem situationsabhängigen optimalen Sicherheitsabstand zu Gewittern als auch zur Ermittlung eines Mindestmaßes an Gewitterinformationen, welche dem Piloten im Cockpit verfügbar sein müssen, um eine sichere Route zu fliegen, eingesetzt werden. Was die Validierung des DIVMET-Modells betrifft, konnte durch einen Vergleich mit den

realen Anflugtrajektorien auf den Hong Kong International Airport (HKIA) bei Gewitter am 8. September 2010 gezeigt werden, dass im Enroute-Flugabschnitt der Trajektorien bei der Hälfte der untersuchten Beispiele die simulierten und die real geflogenen Trajektorien einen sehr ähnlichen Verlauf aufwiesen. Andererseits musste festgestellt werden, dass die Routenverläufe immer dann von einander abwichen, wenn für die Route einer der genannten Faktoren zutraf: (1) Es findet die Regulierungen des Anflugverfahrens von Seite der Lotsen statt, wie zum Beispiel die Einhaltung eines bestimmten Headings beim Anflug eines STAR-Wegpunktes, was bisher nicht in DIVMET implementiert ist; (2) ein Flugzeug befindet sich aufgrund der diskontinuierlichen Aktualisierung der Gewitterinformationen plötzlich innerhalb eines Wetterobjektes; (3) am Zielort befindet sich ein Gewitter. Die durchgeführte Validierung zeigt unter welchen Bedingungen DIVMET als Unterstützung für Lotsen zur Ermittlung einer sicheren Flugtrajektorie verwendet werden kann.

Um DIVMET als eigenständiges Werkzeug zur Untersuchung von Ausweichrouten verwenden zu können, wurde eine graphische Benutzeroberfläche implementiert. Mit dieser können sowohl die Eingangsgrößen der Simulation variiert, als auch die Simulationsergebnisse visualisiert und analysiert werden.

Der Einsatz als Unterstützungsprogramm für den Arrival Manager (AMAN) zur Bestimmung der voraussichtlichen Ankunftszeit von Flügen bei Gewitter erfordert die Kopplung von DIVMET an ein globales Flugverkehrssimulationsmodell NAVSIM. Die ersten Schritte zum Aufbau dieser Kopplung wurden im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Frage, ob das Flugverhalten bei Gewitter mit DIVMET modelliert werden kann, differenziert beantwortet werden muss. Einerseits werden mit DIVMET sichere Routen bei beliebiger Anordnung und Konstellation von Gewittern bestimmt. Andererseits beeinflussen eine Reihe von programmabhängigen Faktoren, wie zum Beispiel das individuelle Pilotenverhalten bei Gewitter oder die Regulationsmaßnahmen von Lotsen, maßgeblich den Routenverlauf. Somit kann die Komplexität des Flugverkehrs bei Gewitter nicht allein mit einem Modell wie DIVMET simuliert werden. Daher sollten die von DIVMET errechneten Flugtrajektorien primär als Routenvorschläge zur Unterstützung der Arbeit von Lotsen oder Piloten bei Gewitter betrachtet werden.

Eine Weiterführung der Untersuchungen wäre in mehrere Richtungen wünschenswert. Zum Einen sollten die hier dargestellte Weiterentwicklung von MET2ROUTE programmtechnisch umgesetzt und anhand verschiedener Szenarien erprobt werden. Anschließend könnte die NAVSIM-DIVMET-Kopplung weiter ausgebaut werden, was teilweise durch nachfolgende Arbeit von Patrick Hupe [83] umgesetzt wurde. Andererseits wäre es sinnvoll das Aufgabenspektrum von DIVMET mit weiteren Elemente zur Regulation des Flugverlaufs wie

Holding und Staffelung, sowie mit der Erkennung von Flugzeug-Flugzeug-Konflikten zu erweitern. Mit DIVMET als Werkzeug könnten weitere Untersuchungen zur Risikoanalyse von wetterbeeinflussten Flugrouten durchgeführt werden. Neue Erkenntnisse zu diesem Thema wurden in der nachfolgenden Arbeit von Henrike Gümmer [72] gewonnen. Die nachfolgende Arbeit von Manuela Sauer [84] beschäftigte sich mit den Unsicherheiten der Gewitter-Kurzfristvorhersagen und verwendete DIVMET zur Simulation verschiedener Ausweichtaktiken.

Anhang

6.1 Berechnung von Positionen auf Kreisbögen

Um die Flexibilität der Funktion zur Vergrößerung der Polygone zu erhöhen wurde in DIVMET die Anzahl der Eckpunkte, mit denen ein Kreisbogen angenähert werden soll, parametrisiert (siehe Parameter n in Gleichung (3.6)). Entsprechend der Aufgabenstellung kann diese vom Anwender direkt angepasst werden. Im Folgenden wird die Methodik zur Berechnung der Positionen auf einem Kreissegment mit dem Radius s erläutert.

Für die Erzeugung von $n \in \mathbb{N}$ Positionen auf einem Kreissegment werden zunächst die beiden Berührungspunkte als Anfangspunkt \mathbf{x}_a und Endpunkt \mathbf{x}_e definiert und in Vektorform gebracht:

$$\begin{pmatrix} x_a \\ y_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} + s \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

$$\begin{pmatrix} x_e \\ y_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} + s \begin{pmatrix} \cos(\alpha + \phi) \\ \sin(\alpha + \phi) \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

Die Winkel α und ϕ lassen sich aus den Koordinaten der Berührungspunkte berechnen:

$$\alpha = \arcsin \frac{y_a - y_0}{s} \quad (6.3)$$

$$\phi = \arcsin \frac{y_e - y_0}{s} - \alpha \quad (6.4)$$

Die n Positionen auf dem Kreissegment, bezeichnet mit \mathbf{x}_n mit $n \in \mathbb{N}$, werden in äquidistanten Abständen von k mit $k \in \mathbb{N}$ erzeugt. Ihre Koordinaten lauten:

$$\begin{pmatrix} x_n \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} + s \begin{pmatrix} \cos(\alpha + \frac{n\phi}{k}) \\ \sin(\alpha + \frac{n\phi}{k}) \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

Die Abfolge von Berührungspunkten zusammen mit den zugehörigen Positionen auf den einzelnen Kreissegmenten stellt das gesuchte um den Sicherheitsabstand s nach außen vergrößerte Polygon dar.

6.2 Algorithmus *Graham's Scan*

Das Prinzip des Algorithmus *Graham's Scan* wird im Folgenden an einem Beispiel erläutert. Für die Berechnung einer konvexen Hülle um ein Polygon beginnt *Graham's Scan* mit der Suche eines geeigneten Startpunktes. In der Regel weist ein Startpunkt, der als Anchorpunkt benannt wird und in Abbildung 6.1(a) durch einen Kreis markiert ist, die kleinste Ordinate bzw. im Fall einer Doppelbelegung auch die kleinste Abszisse auf. Im Anchorpunkt beginnt und endet jede konvexe Hülle, die damit ein geschlossenes Polygon darstellt. Alle weiteren Punkte der konvexen Hülle bestimmt der Algorithmus durch die Analyse der Polygoneckpunkte bezüglich ihrer relativen Position zu den Nachbarpunkten. Die Analyse beginnt mit der Wahl der Orientierungsrichtung im oder gegen den Uhrzeigersinn. Im dargestellten Beispiel wurde die Richtung gegen den Uhrzeigersinn willkürlich festgelegt. Ausgehend vom Anchorpunkt sucht der Algorithmus den ersten Nachbareckpunkt in gewählter Richtung. Für diesen Eckpunkt mit der Bezeichnung c (*current*) ist der Anchorpunkt der vorherige Eckpunkt p (*previous*). Der nächste Eckpunkt wird mit n für *next* markiert, verdeutlicht in Abbildung 6.1(b). Die Eckpunktpaare p und c sowie p und n werden miteinander verbunden. Der Algorithmus bestimmt anschließend die Drehrichtung, welche die Verbindungsstrecke pc vollziehen muss um sich mit der Verbindungsstrecke pn zu überlagern. Die resultierende Drehrichtung wird dann mit der gewählten Orientierungsrichtung, in diesem Fall gegen den Uhrzeigersinn, verglichen. Konkret bedeutet das für den Fall in Abbildung 6.1(b), dass der Punkt c zur Menge der konvexen Hülle hinzugefügt werden kann, da die zugehörige

Drehrichtung der gewählten Orientierungsrichtung entspricht. Im weiteren Verlauf wird die Analyse gleichermaßen fortgesetzt und die Markierungen p , c und n werden entsprechend gegen den Uhrzeigersinn jeweils um eine Position verschoben. Die Drehrichtung der Verbindungsstrecken pc zu pn entspricht in Abbildung 6.1(c) nicht der gewählten Orientierungsrichtung. Der Eckpunkt c trägt nicht zur konvexen Hülle bei und die Eckpunkte p und n können direkt miteinander verbunden werden. Auch im nächsten Schritt, dargestellt in Abbildung 6.1(d), werden die Eckpunkte p und n direkt verbunden. Beim Erreichen des Anchorpunktes ist die konvexe Hülle bestimmt. Für die Anwendung in DIVMET bedeutet dies, dass das kleinste konvexe Polygon, welches das vergrößerte detektierte Polygon enthält, gefunden ist.

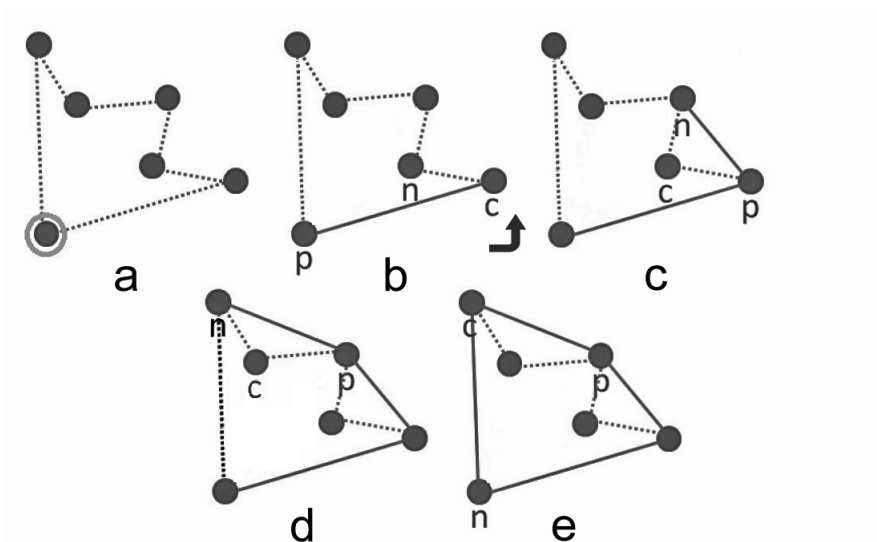


Abbildung 6.1: Berechnung einer konvexen Hülle für ein Polygon mit dem Graham's Scan Algorithmus.

6.3 Standardkurvenflug

Jede aktuelle Route in DIVMET stellt eine Abfolge von Positionen im zweidimensionalen Raum dar. Die Simulation einer Flugbewegung auf dieser Route erfolgt kinematisch, von einer Routenposition zur nächsten. Das Flugverhalten bleibt dabei unberücksichtigt. Eine Option, die in DIVMET aktiviert werden kann, ist die Berücksichtigung des Standardkurvenfluges bei der Berechnung einer Ausweichroute. Dafür wird zunächst der Radius eines Standardkurvenfluges bestimmt. Dieser errechnet sich mit der Gleichung

$$r = \frac{v \cdot t}{2\pi}$$

und beträgt circa eine Nautische Meile, wenn ein Flugzeug in zwei Minuten einen kompletten Kreisumfang 2π dreht und dabei eine Fluggeschwindigkeit von 200 kt ($102,89 \text{ m s}^{-1}$) aufweist.

Für die Realisierung eines Standardkurvenfluges in DIVMET werden bezüglich der aktuellen Flugzeugposition links und rechts zwei Kreise konstruiert, deren Radien dem Standardkurvenflugradius entsprechen. Verdeutlicht wird dies in Abbildung 6.2 für die Berechnung einer Ausweichroute um ein Risikogebiet auf einer Route von A nach B. Nach Festlegung der Ausweichrichtung wird in diesem Beispiel der Kreis rechts von der aktuellen Position für die Konstruktion der Ausweichroute herangezogen. An MET2ROUTE werden von DIVMET folglich zwei Hindernisse übergeben: Das aktuelle Risikogebiet und der ausgewählte Standardkurvenflugkreis. Die resultierende Ausweichroute entspricht in der Folge eher einem in der Realität beobachteten Verlauf einer Ausweichroute.

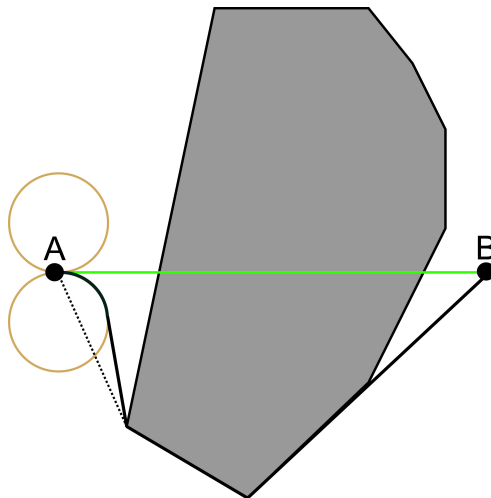


Abbildung 6.2: Realisierung eines Standardkurvenfluges durch die Konstruktion von zwei Kreisen links und rechts bezüglich der aktuellen Flugzeugposition A mit Radien, die dem erforderlichen Standardkurvenflugradius entsprechen. Nach Festlegung der Ausweichrichtung, in diesem Fall rechts, wird nur der rechte Standardkurvenflugkreis zusammen mit dem Risikogebiet bei der Konstruktion einer Ausweichroute in MET2ROUTE berücksichtigt. Die resultierende Ausweichroute (schwarze durchgezogene Linie) entspricht eher einem realen Ausweichverhalten als die gepunktete Route ohne Konstruktion eines Standardkurvenflugkreises.

6.4 DIVMET-NAVSIM Datentransfer

Der Datentransfer von NAVSIM in Salzburg zu DIVMET in Hannover und zurück erfolgt über die Internetprotokolle TCP/IP. Jede Transfer-Mitteilung besteht aus einzelnen XML-Nachrichten mit festgelegter Struktur, die von einer Seite gesendet und von der anderen

empfangen werden. So sendet NAVSIM zum Beispiel alle 3 Sekunden XML-Daten mit folgendem Inhalt: Uhrzeit, Flugzeugkennung (AC-id), aktuelle Flugzeugposition und die weiteren Wegpunkte der geplanten Route. DIVMET empfängt die XML-Daten und konstruiert aus den Wegpunkten eine aktuelle Route, die es auf Konflikte mit aktuellen Risikogebieten überprüft. Im konfliktfreien Fall sendet DIVMET keine Nachricht und wartet weitere Daten von NAVSIM ab. Liegt ein Konflikt vor, initiiert DIVMET die Berechnung einer Ausweichroute und kommuniziert das Ergebnis mit NAVSIM erneut in Form von XML-Nachricht. Die gesendete

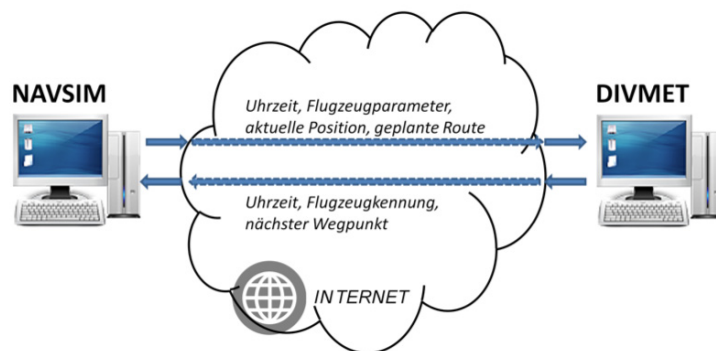


Abbildung 6.3: Kommunikation zwischen DIVMET und NAVSIM.

Handlungsvorschrift von DIVMET an NAVSIM könnte eine der folgenden Informationen enthalten:

- Verändere das aktuelle Flugheading des Flugzeuges mit genannten AC-id. Beispielsweise könnte der Befehl - „TR210“ - für „drehe nach rechts (turn right) auf 210 Grad“ stehen.
- Ein Flugzeug mit der genannten AC-id soll direkt den Wegpunkt mit einem bestimmten Namen bzw. mit bestimmten Koordinaten ansteuern.
- Ersetze die geplante Flugroute vom Flugzeug mit der genannten AC-id durch eine Ausweichroute von DIVMET.

In der aktuellen Kommunikation ist die letzte Handlungsvorschrift implementiert. Jede von DIVMET vorgeschlagene Ausweichroute ersetzt die entsprechende Trajektorie im Flugplan von NAVSIM. Damit setzt das zugehörige Flugzeug die Flugbewegung unter Berücksichtigung der flugzeugspezifischen Flugdurchführung auf der von DIVMET vorgeschlagenen Ausweichroute fort.

6.5 Tunnelflug

Wie bereits im Abschnitt 3.1.4 erwähnt wurde, gibt es Situationen bei denen das Platzieren einer konvexen Hülle um die vergrößerten Wetterobjekte mit Nachteilen für die Ausweichroutenfindung verbunden ist. Insbesondere bei großräumigen Gewitterzellen, die sich linienförmig wie bei einer squall line anordnen und ineinander greifen, führt es zur Eliminierung der Möglichkeit zum Manövrieren zwischen den Wetterobjekten. In DIVMET wird dieser Fall deshalb gesondert betrachtet und als Tunnelflug bezeichnet. Ein Tunnelflug liegt vor, wenn für zwei ineinander greifenden Risikogebiete gilt:

- Die konvexen Hüllen der Risikogebiete überschneiden sich.
- Die vergrößerten Wetterobjekte weisen jedoch keine Überschneidung auf.

Wenn beide Bedingungen erfüllt sind, wird in DIVMET eine zusätzliche Funktion zur Anpassung der Risikogebiete zur Realisierung eines Tunnelfluges aufgerufen. In mehreren Schritten erfolgt eine lokale Aufhebung der entsprechenden konvexen Hüllen, damit ein Tunnelflug ermöglicht werden kann. In Abbildung 6.4(a) wird ein Tunnelflug erkannt, denn die beiden vergrößerten Wetterobjekte (in Grau) zeigen keine Überschneidung im Gegensatz zu den zugehörigen konvexen Hüllen (gestrichelte Linien). Solche konvexen Hüllen werden von DIVMET aufgrund ihrer Überschneidung standardmäßig zu einem Risikogebiet zusammengefasst. Diese Schritte müssen folglich beim aktivierten Tunnelflug rückgängig gemacht werden. Als Erstes wird die äußere konvexe Hülle entfernt und es entstehen wieder zwei separate Risikogebiete. Im nächsten Schritt werden alle vorhandenen Buchten beider Risikogebiete identifiziert und auf Überschneidungen mit dem Opponenten-Risikogebiet untersucht. Die Buchten werden durch die Subtraktion des vergrößerten Gewitterpolygons vom zugehörigen Polygon der konvexen Hülle bestimmt. Wenn sich in einer Bucht mindestens ein Eckpunkt des Opponenten-Risikogebietes befindet, wird diese als Tunnelbucht markiert. Weitere Buchten fernab des Tunnels, sofern vorhanden, werden wieder auf das entsprechende vergrößerte Wetterobjekt aufaddiert und bleiben somit weiterhin durch die jeweilige konvexe Hülle geschlossen. Wenn der Tunnel durchgehend geöffnet ist, dann kann auch ein Tunnelflug in der Simulation realisiert werden. Es zeigte sich jedoch, dass die für einen Tunnel berechnete Ausweichroute direkt entlang eines Risikogebietes verläuft, als wäre nur ein Routenhindernis detektiert worden. Der resultierende Routenverlauf, wie er in Abbildung 6.4(b) zu sehen ist, entspricht nicht dem zu erwartenden Ausweichverhalten. Folglich wurden zur Realisierung des Tunnelfluges weitere Anpassungen der Risikogebiete eingeführt: Die beiden Risikogebiete werden jeweils in kleinere Polygone unterteilt. Aus

einem Risikogebiet mit n Tunnelbuchten mit $n \in \mathbb{N}$ werden $n + 1$ neue erzeugt. Zur Unterteilung werden der Schwerpunkt des ungeteilten Risikogebietes sowie die Tunnelbuchten herangezogen. Im Beispiel aus Abbildung 6.4(c) werden insgesamt fünf neue Risikogebiete erzeugt. Damit ist die Anpassung der Risikogebiete für einen Tunnelflug in DIVMET abgeschlossen und die erzeugten Polygone werden zur Berechnung der Ausweichroute an MET2ROUTE übergeben.

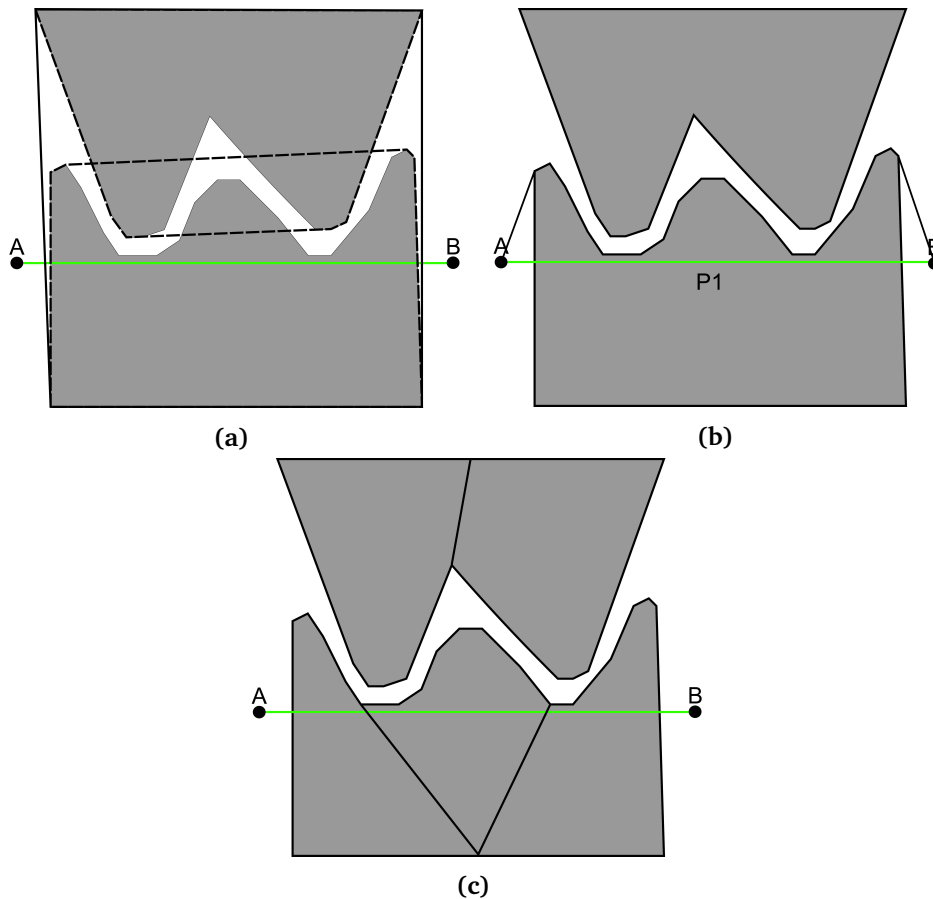


Abbildung 6.4: Die Modifikation der Risikogebiete beim Tunnelflug beginnt mit der Entfernung der äußeren konvexen Hülle, welche beide Risikogebiete zu einem Risikogebiet verbindet. Anschließend erfolgt die Freilegung der Buchten (a). Weitere Anpassungen sind erforderlich, weil eine entlang des Risikogebietes P1 verlaufende Ausweichroute ansonsten realitätsfern wäre (b). Durch Unterteilung der beiden Risikogebiete in einzelne neue Risikogebiete (c) wird erreicht, dass die dann berechnete Ausweichroute, welche im darauffolgenden Kapitel präsentiert wird, eher einer realen Ausweichroute entspricht.

Im folgenden Kapitel werden die Berechnung der Ausweichroute für diesen Tunnelfall sowie weitere Beispiele zur Berechnung einer Ausweichroute mit MET2ROUTE₂ präsentiert.

6.6 Beispiele für Berechnungen einer Ausweichroute mit MET2ROUTE₂

Anhand der folgenden vier Beispiele werden die Berechnungen von Ausweichrouten mit MET2ROUTE₂ für unterschiedliche Hindernisse vorgestellt. Neben den Ausweichrouten, die als durchgezogene schwarze Linien dargestellt sind, werden auch die entsprechenden geplanten Routen als grüne Linien mit abgebildet. Darüberhinaus werden Tangentenabschnitte, welche in den einzelnen MET2ROUTE₂-Durchläufen bestimmt werden und die nicht zum Satz der konfliktfreien Tangentenabschnitte beitragen durch gepunktete schwarze Linien gezeigt. Die Ergebnisse am Ende eines MET2ROUTE₂-Durchlaufes werden in Tabellen zusammengefasst. Schließlich sind für jedes Beispiel die gesuchten Polygonzüge der Ausweichrouten gelistet.

Tunnelflug

Im dargestellten Tunnelflug aus Abbildung 6.4(c) verläuft die geplante Route durch drei Risikogebiete, welche ursprünglich zu einem Wetterobjekt gehörten. Fünf MET2ROUTE₂-Durchläufe, welche in Tabelle 6.1 und in Abbildung 6.5 zusammengefasst sind, sind erforderlich, um einen Satz von konfliktfreien Tangentenabschnitten zwischen *A* und *B* zu bestimmen.

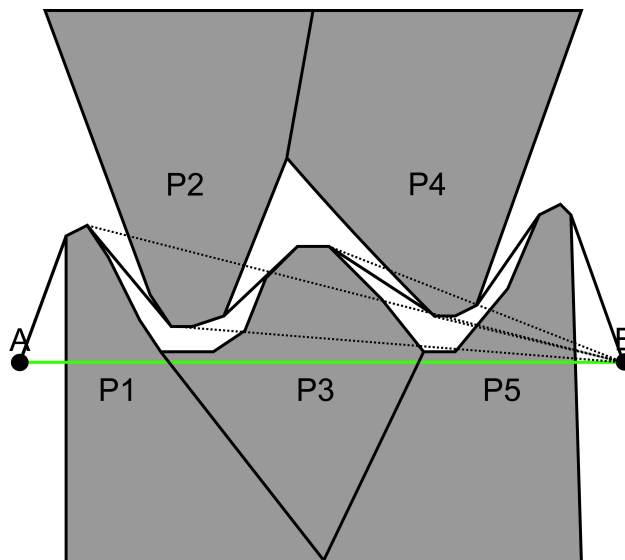


Abbildung 6.5: Berechnung einer Ausweichroute mit MET2ROUTE₂ für das Beispiel Tunnelflug.

Der Polygonzug der Ausweichroute besteht aus Abschnitten der konvexen Hüllen von fünf

Tabelle 6.1: Tabellarischer Ablauf von MET2ROUTE₂ für das Beispiel Tunnelflug aus Abbildung 6.5.

Schritt:	Objekt:			Konfliktfall	\overline{TA} W-Liste	Konfliktfreie \overline{TA}
	i	j	k			
1	A	P1	B	2	–	$\overline{TA}(A \rightarrow P1)$
2	P1	P2	B	2	–	$\overline{TA}(P1 \rightarrow P2)$
3	P2	P3	B	2	–	$\overline{TA}(P2 \rightarrow P3)$
4	P3	P4	B	2	–	$\overline{TA}(P3 \rightarrow P4)$
5	P4	P5	B	–	–	$\overline{TA}(P4 \rightarrow P5), \overline{TA}(P5 \rightarrow B)$

Risikogebieten und enthält keine Schnittpunkte der Tangentenabschnitte.

$$\text{Polygonzug} = A, EP_1, \text{Conv}_{P_1}, XP_1, EP_2, \text{Conv}_{P_2}, XP_2, EP_3, \text{Conv}_{P_3}, XP_3, \\ EP_4, \text{Conv}_{P_4}, XP_4, EP_5, \text{Conv}_{P_5}, XP_5, B.$$

Beispiel A

Im folgenden Beispiel aus Abbildung 6.6 und Tabelle 6.2 besteht der Polygonzug der Ausweichroute aus mehreren Schnittpunkten. Der erste Schnittpunkt *SP1* befindet sich außerhalb des Polygons *P1*, an das die ersten konfliktfreien Tangentenabschnitte angelehnt sind. Diese Situation wird vom Algorithmus als eine mögliche Optimierung bewertet. Die Konfliktüberprüfung der möglichen Verbindungslinie zwischen dem Startpunkt *A* und dem Risikogebiet *P2* wäre nicht konfliktfrei. Deshalb tragen der Schnittpunkt *SP1* sowie der Schnittpunkt *SP2* auf der konvexen Hülle des zweiten Risikogebietes *P2* zum Polygonzug der Ausweichroute bei. Schließlich folgt ein Abschnitt der konvexen Hülle des Risikogebietes *P3*.

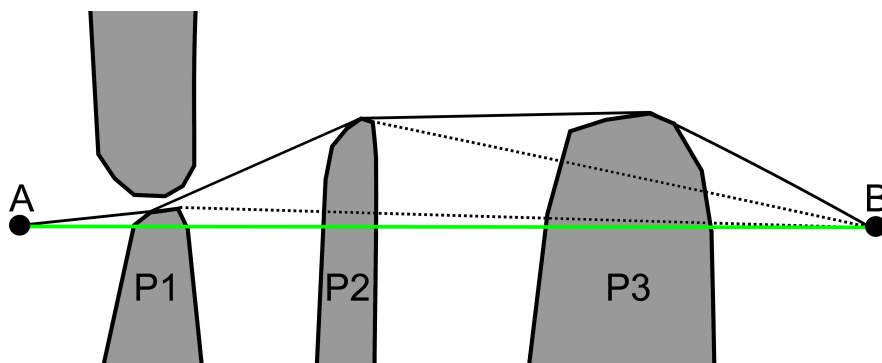


Abbildung 6.6: Berechnung einer Ausweichroute mit MET2ROUTE₂ für das Beispiel A.

Tabelle 6.2: Tabellarischer Ablauf der ersten Etappe von MET2ROUTE₂ für das Beispiel A aus Abbildung 6.6.

Schritt:	Objekt:	i	j	k	Konfliktfall	\overline{TA} W-Liste	Konfliktfreie \overline{TA}
1		A	P1	B	2	–	$\overline{TA}(A \rightarrow P1)$
2		P1	P2	B	2	–	$\overline{TA}(P1 \rightarrow P2)$
3		P2	P3	B	–	–	$\overline{TA}(P2 \rightarrow P3), \overline{TA}(P3 \rightarrow B)$

Der Polygonzug der Ausweichroute lautet:

$$\text{Polygonzug} = A, SP_1, SP_2, EP_3, \text{Conv}_{P_3}, XP_3, B.$$

Beispiel B

Wenn sich lang ausgedehnte Risikogebiete zu beiden Seiten einer geplanten Route befinden, ist das Flugzeug gezwungen zwischen den Risikogebieten zu fliegen. Auch in diesem Beispiel, dargestellt in Abbildung 6.7 und beschrieben in Tabelle 6.3, findet MET2ROUTE₂ eine sichere und kurze Ausweichroute.

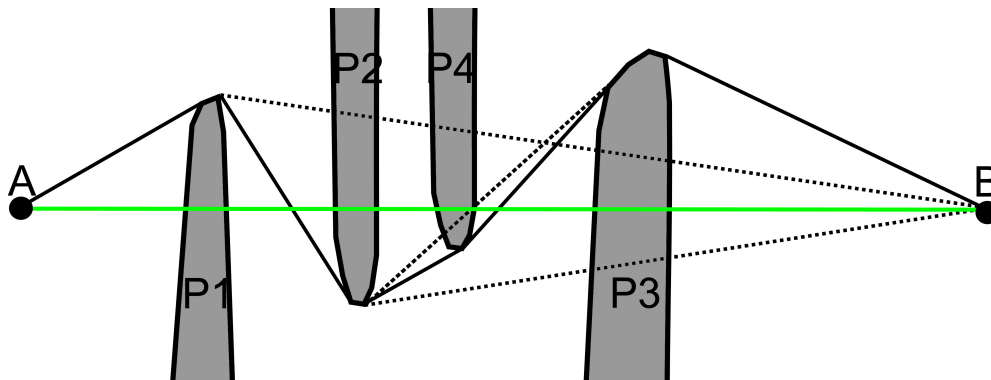


Abbildung 6.7: Berechnung einer Ausweichroute mit MET2ROUTE₂ für das Beispiel B.

Tabelle 6.3: Tabellarischer Ablauf der ersten Etappe von MET2ROUTE₂ für das Beispiel B aus Abbildung 6.7.

Schritt:	Objekt:	i	j	k	Konfliktfall	\overline{TA} W-Liste	Konfliktfreie \overline{TA}
1		A	P1	B	2	–	$\overline{TA}(A \rightarrow P1)$
2		P1	P2	B	2	–	$\overline{TA}(P1 \rightarrow P2)$
3		P2	P3	B	1	$\overline{TA}(P3 \rightarrow B)$	–
4		P2	P4	P3	–	–	$\overline{TA}(P2 \rightarrow P4), \overline{TA}(P4 \rightarrow P3),$ $\overline{TA}(P3 \rightarrow B)$

Der Polygonzug der Ausweichroute lautet:

$$\text{Polygonzug} = A, SP_1, EP_2, \text{Conv}_{P_2}, XP_2, SP_4, EP_3, \text{Conv}_{P_3}, XP_3, B.$$

Beispiel C

Wenn mehrere Risikogebiete ein Flugzeug zu einem immer weiteren Ausweichen von der selben Richtung aus zwingen, kann die mit MET2ROUTE₂ berechnete Ausweichroute keinen optimalen Verlauf aufweisen. In solchen Fällen, wie in Abbildung 6.8 dargestellt und Tabelle 6.4 dokumentiert, werden die Risikogebiete nacheinander angefliegen, anstatt eine direkte Ausweichroute um das am längsten ausgedehnte Risikogebiet P4 zu bestimmen. Die Implementierung einer Abfrage in DIVMET, ob eine Abkürzung möglich ist, wäre eine weitere Option zur Optimierung des Algorithmus.

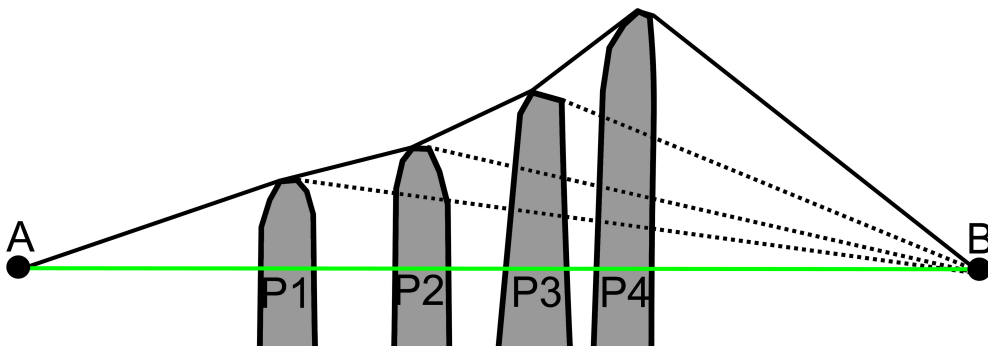


Abbildung 6.8: Berechnung einer Ausweichroute mit MET2ROUTE₂ für das Beispiel C.

Tabelle 6.4: Tabellarischer Ablauf der ersten Etappe von MET2ROUTE₂ für das Beispiel C aus Abbildung 6.8.

Schritt:	Objekt:	i	j	k	Konfliktfall	\overline{TA} W-Liste	Konfliktfreie \overline{TA}
1		A	P1	B	2	–	$\overline{TA}(A \rightarrow P1)$
2		P1	P2	B	2	–	$\overline{TA}(P1 \rightarrow P2)$
3		P2	P3	B	2	–	$\overline{TA}(P2 \rightarrow P3)$
4		P3	P4	B	–	–	$\overline{TA}(P3 \rightarrow P4), \overline{TA}(P4 \rightarrow B)$

Der Polygonzug der Ausweichroute lautet:

$$\text{Polygonzug} = A, SP_1, SP_2, SP_3, EP_4, \text{Conv}_{P_4}, XP_4, B.$$

6.7 Programmablaufplan von MET2ROUTE

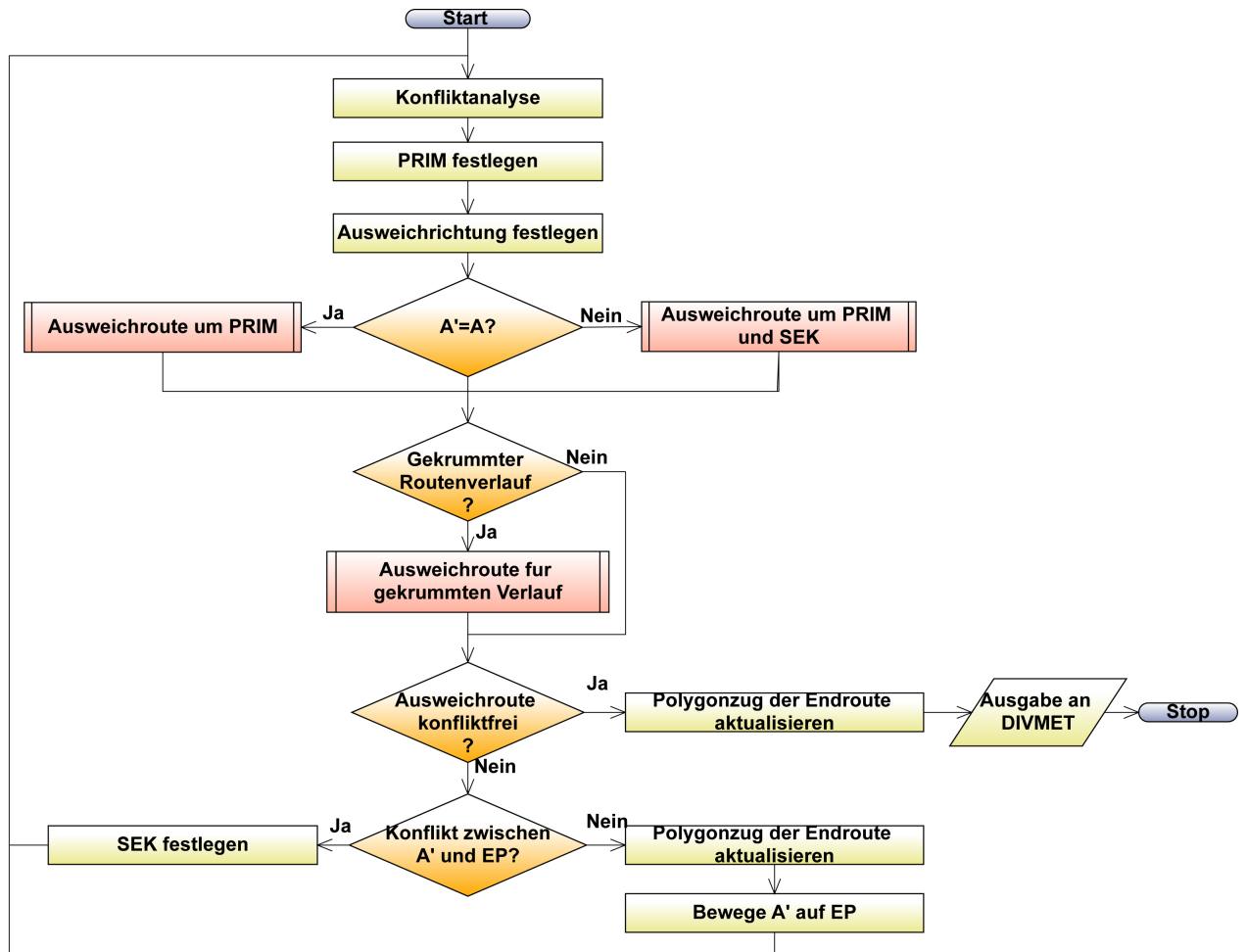


Abbildung 6.9: Programmablaufplan von MET2ROUTE.

6.8 Programmablaufplan von MET2ROUTE₂

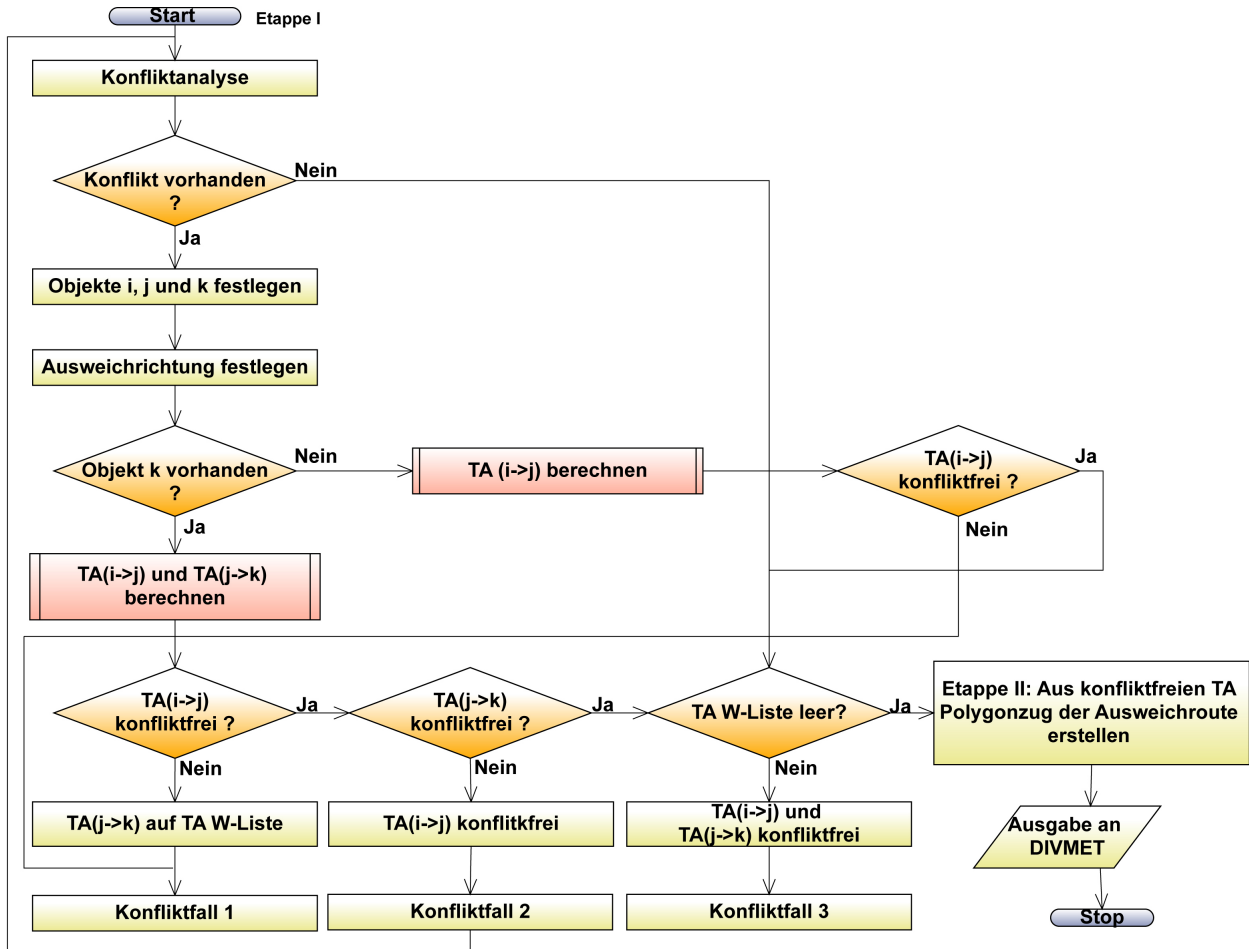


Abbildung 6.10: Programmablaufplan von MET2ROUTE₂.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Echointensität einer Einzelzelle in drei Entwicklungsstadien	8
2.2	Hydrometeore, Blitze, Turbulenzen sowie Auf- und Abwinde einer Einzelzelle	10
2.3	Vertikalschnitt einer Multizelle	11
2.4	Flugbewegung in der Abwindzone eines Gewitters	12
2.5	Squall line	14
2.6	Vertikalschnitt einer Superzelle	15
2.7	Gefahrenbereiche einer Gewitterzelle berechnet mit den Algorithmen Cb- TRAM und Rad-TRAM	18
2.8	Blitze auf dem Monitor des Strike Finders	19
2.9	Cockpit einer Boeing 737-8Z9	20
2.10	Kurs- bzw. Richtungsangaben in der Flugnavigation	24
2.11	Vertikale Darstellung der Luftraumstruktur über Deutschland	26
2.12	MetFROG-Monitor der DFS	27
2.13	Durchschnittliche tägliche Flugzahl in Europa für die Jahre 2010 bis 2014 . .	31
2.14	Ursachen für Verspätungen im Enroute-Flugabschnitt	32
2.15	Zehn Kontrollzentren mit den meisten Verspätungen im Enroute-Flugabschnitt	33
2.16	Anzahl der weltweit jährlich beförderten Passagiere zwischen 2005 und 2025	33
2.17	WAF-Gefahrengebiete um Gewitterzellen	36
2.18	Berechnung einer Ausweichroute im Automatisierungssystem DWR	37
2.19	Konstruktion einer Ausweichroute um WAF-Objekte	38
2.20	Benachbarte Knoten im Dijkstra-Algorithmus	39
2.21	Reduzierung eines Roboters auf einen Punkt	40
2.22	Trapez-Zerlegung und kollisionsfreie Wege auf einer Straßenkarte	41
2.23	Ausweichtrajektorie im Lichtausbreitungsalgorithmus LPA	42
3.1	Programmablaufplan vom DIVMET-Modell	45
3.2	Wetterobjekt	46
3.3	Gewitter aus dem Cockpitfenster	47
3.4	Simulationsparameter Sichtfeld	49
3.5	Simulationsparameter Sicherheitsabstand	51
3.6	Einstellung des Sicherheitsabstandes	52
3.7	Simulationsparameterstudie I	54
3.8	Einstellung der Sichtreichweite	55
3.9	Von Wetterobjekten zu Risikogebieten	57
3.10	Identifikation von Wetterobjekten im Sichtfeld	58
3.11	Vergrößerung eines einfachen Polygons	58
3.12	Konvexe Hülle	60
3.13	Gewitter am oder in der Nähe des Zielortes	61

3.14	Gedächtnisfunktion	62
3.15	Konflikterkennung mit eingeschränktem Sichtfeld	64
3.16	Drei Kriterien für die Wahl der Ausweichrichtung (Beispiel 1)	67
3.17	Drei Kriterien für die Wahl der Ausweichrichtung (Beispiel 2)	67
3.18	Abschnitt der konvexen Hülle als Teil der Ausweichroute	68
3.19	Bestimmung der Positionen EP und XP auf der konvexen Hülle	69
3.20	Konfliktfälle in MET2ROUTE	70
3.21	Konfliktfreie Ausweichroute	72
3.22	Konflikt mit dem sekundären Objekt	73
3.23	Erneuter Konflikt mit dem primären Objekt	74
3.24	Konstruktion einer Ausweichroute beim gekrümmten Routenverlauf	75
3.25	Hindernis vor dem primären Objekt	77
3.26	Drei Objekte im MET2ROUTE ₂ -Algorithmus	79
3.27	Auswahl der Tangentenabschnitte bei drei Objekten	80
3.28	Aktivierung vom Konfliktfall 1 in MET2ROUTE ₂	82
3.29	Aktivierung vom Konfliktfall 2 in MET2ROUTE ₂	84
3.30	Aktivierung vom Konfliktfall 3 in MET2ROUTE ₂	86
4.1	Sechs Anflugtrajektorien auf HKIA am 8. September 2010	91
4.2	Validierung der Ausweichrouten - Beispiel 1	93
4.3	Validierung der Ausweichrouten - Beispiel 2	94
4.4	Validierung der Ausweichrouten - Beispiel 3	96
4.5	Validierung der Ausweichrouten - Beispiel 4	97
4.6	Validierung der Ausweichrouten - Beispiel 5	98
4.7	Validierung der Ausweichrouten - Beispiel 6	99
4.8	NAVSIM	101
4.9	Simulationsumgebung für eine Sektorbelastungsstudie	102
4.10	Occupancy counts von drei Sektoren	104
6.1	Berechnung einer konvexen Hülle mit dem Graham's Scan-Algorithmus	111
6.2	Berücksichtigung eines Standardkurvenfluges in DIVMET	112
6.3	Kommunikation zwischen DIVMET und NAVSIM	113
6.4	Tunnelflug	115
6.5	Ausweichroute mit MET2ROUTE ₂ für das Beispiel Tunnelflug	116
6.6	Ausweichroute mit MET2ROUTE ₂ für das Beispiel A	117
6.7	Ausweichroute mit MET2ROUTE ₂ für das Beispiel B	118
6.8	Ausweichroute mit MET2ROUTE ₂ für das Beispiel C	119
6.9	Programmablaufplan von MET2ROUTE	120
6.10	Programmablaufplan von MET2ROUTE ₂	121

Tabellenverzeichnis

3.1	Festlegung der drei Objekte i, j und k bei <i>Konfliktfall 1</i> für zwei aufeinanderfolgende Algorithmusdurchläufe	81
3.2	Tabellarischer Ablauf der ersten Etappe von MET2ROUTE ₂ für das Beispiel aus Abbildung 3.28	83
3.3	Festlegung der drei Objekte i, j und k bei <i>Konfliktfall 2</i> für zwei aufeinanderfolgende Algorithmusdurchläufe	83
3.4	Tabellarischer Ablauf der ersten Etappe von MET2ROUTE ₂ für das Beispiel aus Abbildung 3.29	85
3.5	Tabellarischer Ablauf der ersten Etappe von MET2ROUTE ₂ für das Beispiel aus Abbildung 3.30	86
4.1	Routenparameter der ausgewählten real geflogenen Trajektorien im Anflug auf HKIA am 8. September 2010.	92
4.2	Farbkodierung der occupancy counts	102
6.1	Tabellarischer Ablauf von MET2ROUTE ₂ für das Beispiel Tunnelflug aus Abbildung 6.5	117
6.2	Tabellarischer Ablauf der ersten Etappe von MET2ROUTE ₂ für das Beispiel A aus Abbildung 6.6	118
6.3	Tabellarischer Ablauf der ersten Etappe von MET2ROUTE ₂ für das Beispiel B aus Abbildung 6.7	118
6.4	Tabellarischer Ablauf der ersten Etappe von MET2ROUTE ₂ für das Beispiel C aus Abbildung 6.8	119

Literaturverzeichnis

- [1] FAA: Advisory Circular, Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation. AC No: 00-24c (2013)
- [2] EVANS, James E. ; DUCOT, Elizabeth R.: The integrated terminal weather system (ITWS). In: *The Lincoln Laboratory Journal* 7 (1994), Nr. 2, S. 449–474
- [3] FORSTER, Caroline ; TAFFERNER, Arnold ; ZINNER, Tobias ; KEIL, Christian: Validation of severe weather forecasts based on synthetic satellite data as part of an integrated thunderstorm forecast system for air traffic. In: *Proc. 2008 EUMETSAT Meteor. Sat. Conf., Darmstadt, Germany, 2008*, S. 8–12
- [4] TAFFERNER, Arnold ; FORSTER, Caroline ; SÉNÉSI, Stéphane ; GUILLOU, Yann ; TABARY, P ; LAROCHE, P ; DELANNOY, A ; LUNNON, B ; TURP, D ; HAUF, T u. a.: Nowcasting thunderstorm hazards for flight operations: the CB WIMS approach in FLYSAFE. In: *26th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Anchorage, AK (USA), 2008*, S. 1–10
- [5] DELAURA, Rich ; ROBINSON, Mike ; PAWLAK, Margo ; EVANS, Jim: Modeling convective weather avoidance in enroute airspace. In: *13th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, AMS, New Orleans, LA, 2008*
- [6] HKIA: *Flugwetter*. <http://www.hongkongairport.com/eng/business/about-the-airport/welcome.html>. Version: August 2015
- [7] HKO: *Homepage des Hong Kong Observatory. Statistics*. <http://www.hko.gov.hk/informtc/tcStatistic.htm>. Version: Juli 2014
- [8] SZETO, KC ; CHAN, PW: Numerical simulation of a severe squall event in Hong Kong. In: *23rd Conference on Severe Local Storms, St. Louis, MO, 2006*
- [9] TSE, Mei S.: persönliche Mitteilung. Hong Kong Observatory Observatory (2013)
- [10] QUON, Leighton: Modeling and simulation needs for next generation air transportation system research. In: *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, 2006*, S. 21–24
- [11] EUROCONTROL: Trends in Air Traffic, Volume 2, A Matter of Time: Air Traffic Delay in Europe. In: *EATM CODA, 2007*
- [12] BYERS, Horace R. ; BRAHAM JR, Roscoe R.: Thunderstorm structure and circulation. In: *Journal of Atmospheric Sciences* 5 (1948), S. 71–86

- [13] WILK, Kenneth E. ; DOOLEY, JT: FAA radars and their display of severe weather (thunderstorm). In: *Final Report National Oceanic and Atmospheric Administration, Norman, OK. National Severe Storms Lab.* 1 (1980)
- [14] HAUF, Thomas ; LEYKAUF, Herbert ; SCHUMANN, Ulrich: *Luftverkehr und Wetter: Statuspapier.* Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2004
- [15] AIRBUS: Adverse weather operations. Optimum use of the weather radar. In: *Flight Operations Briefing Notes* 1
- [16] HEER, Ing O.: Flugsicherungsbetriebsdienste. In: *Flugsicherung.* Springer, 1975, S. 83–114
- [17] GASKELL, W ; ILLINGWORTH, AJ: Charge transfer accompanying individual collisions between ice particles and its role in thunderstorm electrification. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 106 (1980), Nr. 450, S. 841–854
- [18] BÜRGESESSER, RE ; PEREYRA, RG ; AVILA, EE: Charge separation in updraft of convective regions of thunderstorm. In: *Geophysical research letters* 33 (2006), Nr. 3
- [19] WALLACE, John M. ; HOBBS, Peter V.: *Atmospheric science: an introductory survey.* Bd. 92. Academic press, 2006
- [20] BYERS, Horace R. ; BRAHAM, Roscoe R.: *The thunderstorm: report of the Thunderstorm Project.* US Government Printing Office, 1949
- [21] RAIMARS iWEB: *Gewitter.* <http://www.raimaronline.de/bilder/gewitterg.jpg>. Version: Juli 2014
- [22] WELT DER SYNOPTIK: *Multizellen.* <http://www.synoptische-meteorologie.de/gewitter-1/multizellen/>. Version: Juli 2014
- [23] FUJITA, T: Downbursts: meteorological features and wind field characteristics. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 36 (1990), S. 75–86
- [24] ELMORE, Kim L. ; MCCARTHY, J ; FROST, Walter ; CHANG, HP: A high resolution spatial and temporal multiple Doppler analysis of a microburst and its application to aircraft flight simulation. In: *Journal of climate and applied meteorology* 25 (1986), Nr. 10, S. 1398–1425
- [25] PERISTERI, Maria: *Entwicklung von Squall-lines im Alpenvorland,* Ludwig-Maximilians-Universität München, Diss., 1999
- [26] WELT DER SYNOPTIK: *Squall Line.* <http://www.synoptische-meteorologie.de/gewitter-1/multizellen/squall-line/>. Version: Juli 2014
- [27] MICHAEL F. H. KRUTINA: *Gewitter.* <http://www.wolkenschnueffler.de>. Version: Juli 2014
- [28] DWD: *Radiosonde.* <http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=R&DAT=Radiosonde>. Version: Juli 2014

- [29] SCHMETZ, Johannes ; PILI, Paolo ; TJEMKES, Stephen ; JUST, Dieter ; KERKMANN, Jochen ; ROTA, Sergio ; RATIER, Alain: An introduction to Meteosat second generation (MSG). In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 83 (2002), Nr. 7, S. 977–992
- [30] ZINNER, T ; MANNSTEIN, H ; TAFFERNER, Arnold: Cb-TRAM: Tracking and monitoring severe convection from onset over rapid development to mature phase using multi-channel Meteosat-8 SEVIRI data. In: *Meteorology and Atmospheric Physics* 101 (2008), Nr. 3-4, S. 191–210
- [31] SELTMANN, J: Radarforschung im DWD: Vom Scan zum Produkt. In: *Promet* 26 (1997), S. 32–42
- [32] TAFFERNER, A ; FORSTER, C ; HAGEN, Martin ; HAUF, T ; LUNNON, B ; MIRZA, A ; GUILLOU, Y ; ZINNER, T: Improved thunderstorm weather information for pilots through ground and satellite based observing systems. In: *14th conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology (ARAM), 90th AMS Annual Meeting, Atlanta, 2010*, S. 17–21
- [33] CONNES, K.: Insight Avionics Inc. Strike Finder Pilot's Guide. Pinpoint Lightning Strikes with Digital Accuracy. In: *Avionics News* (1990)
- [34] WWW.LUFTFAHRT.NET: *Cockpit von Lauda Air Boeing 737-8Z9*. <http://www.luftfahrt.net/galerie/showpix.php?id=7034>. Version: Juli 2015
- [35] AVWEB: *Spotting Trouble*. <http://www.avweb.com/news/avionics/181954-1.html?redirected=1>. Version: Juli 2014
- [36] GIGERENZER, Gerd: *Risiko*. Bd. 4. C. Bertelsmann, 2013 ISMN978-3-570-10103-2
- [37] FAA: InFO Information for Operators, Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation. 2/7/08 (2008)
- [38] LUFTHANSA, Deutsche: Vordenker. Der Job eines Flugdienstberaters bei Lufthansa. In: *Newslink, operationlink* 60 (2013)
- [39] SCHMID, Ronald: *Rechte und Pflichten des Piloten: [die Rechtsstellung des Luftfahrzeugführers]; ein Kommentar zu den wichtigsten Bestimmungen aus LuftVG, LuftVO, LuftVZO und LuftBO (einschl. 2. DV LuftBO)*. Kommentator-Verlag im Luchterhand-Verlag, 1996
- [40] DWD: *Flugwetter*. <http://www.flugwetter.de>. Version: Juli 2014
- [41] MENSEN, Heinrich: Innovative Luftverkehrsinfrastruktur und Flugzeugkonzepte. In: *Handbuch der Luftfahrt*. Springer, 2013, S. 343–364
- [42] DFS: *DFS Fluglotse*. http://www.dfs.de/dfs_karriereportal/de/Karriere/Schüler/Ausbildung/Fluglotse. Version: Juli 2014
- [43] ÖZDEMİR, Timur: Visualization and use of Rad-TRAM data at the German Air Navigation Service Provider (DFS), DFS Deutsche Flugsicherung, 2012
- [44] FAA: *Thunderstorms*. US Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2013 (0-24C)

- [45] RHODA, Dale A. ; PAWLAK, ML: An assessment of thunderstorm penetrations and deviations by commercial aircraft in the terminal area. In: *Massachusetts Institute of Technology, Lincoln Laboratory, Project Report NASA/A-2 3* (1999)
- [46] AVJIAN, Robert M. ; DEHN, Jon ; STOBIE, Jim: NextGen Trajectory-Based Integration of Grid-Based Weather Avoidance Fields. In: *91st American Meteorological Society Annual Meeting, Second Aviation, Range and Aerospace Meteorology Special Symposium on Weather-Air Traffic Management Integration*, 2011
- [47] RHODA, D ; KOCAB, E ; PAWLAK, M: Aircraft Encounters with Thunderstorms in Enroute vs. Terminal Airspace above Memphis, Tennessee. In: *10th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, 2002
- [48] THALES: Thales Avionics, FLYSAFE WP 6.7.3 D6.7-3 Public - Final Publishable Report. (2010)
- [49] RÖHNER, Peer: *Modelling of punctuality at Frankfurt Airport*, Institut für Meteorologie und Klimatologie, Leibniz Universität Hannover, Dissertation, 2009
- [50] FAA: Aviation Capacity Enhancement Plan, Federal Aviation Administration. 200
- [51] SCHUMER, C ; MALONEY, Carolyn B.: Your flight has been delayed again: flight delays cost passengers, airlines, and the US economy billions. In: *The US Senate Joint Economic Committee* (2008)
- [52] EUROCONTROL: Monthly Network Operations Report, Analysis - November 2014. In: *Network Manager 1*
- [53] EUROCONTROL: *ATFM delay*. http://www.eurocontrol.int/lexicon/lexicon/en/index.php/ATFM_delay. Version: August 2014
- [54] EUROCONTROL: Monthly Network Operations Report, Analysis - July 2014. In: *Network Manager 1*
- [55] ACI: World Airport Traffic Report 2014 / Airports Council International. 2015. – Forschungsbericht
- [56] EUROCONTROL: *Network Operation Plan*. <https://www.public.cfm.eurocontrol.int/PUBPORTAL/gateway/spec/index.html>. Version: Juli 2014
- [57] McNALLY, David ; SHETH, Kapil ; GONG, Chester ; LOVE, John ; LEE, Chu H. ; SAHLMAN, Scott ; CHENG, Jinn-Hwei: Dynamic Weather Routes: A Weather Avoidance System for Near-Term Trajectory-Based Operations. In: *28th International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS), Brisbane, Australia*, 2012, S. 23–28
- [58] McNALLY, Dave ; SHETH, Kapil ; GONG, Chester ; LOVE, John: A Weather Reroute Tool for En Route Center Operations, Presentation for Data Comm Implementation Team, April 19, 2012

- [59] ERZBERGER, Heinz ; LAUDERDALE, T ; CHU, Y: Automated conflict resolution, arrival management and weather avoidance for ATM. In: *27th International Congress of the Aeronautical Sciences, Nice, France, 2010*
- [60] SANFORD, Beverly D. ; HARWOOD, Kelly ; NOWLIN, Sarah ; BERGERON, Hugh ; HEINRICH, Harold: Center/tracon automation system: Development and evaluation in the field. In: *In 38th Annual Air Traffic Control Association Conference Proceedings Citeseer, 1993*
- [61] ERZBERGER, Heinz: Transforming the NAS: The next generation air traffic control system. In: *24th International Congress of the Aeronautical Sciences, Yokohama, Japan, 2004*
- [62] McNALLY, David ; SHETH, Kapil ; GONG, Chester ; BORCHERS, Paul ; OSBORNE, Jeff ; DESMOND KEANY, Brennan S. ; SMITH, Steve ; SAHLMAN, Scott ; LEE, Chuhan ; CHENG, Jinn-Hwei: Operational Evaluation of Dynamic Weather Routes at American Airlines. In: *10th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, 2013*
- [63] DIJKSTRA, Edsger W. ; DIJKSTRA, Edsger W. ; DIJKSTRA, Edsger W.: *Notes on structured programming*. 1970
- [64] RIPPEL, Eran ; BAR-GILL, Aharon ; SHIMKIN, Nahum: Fast graph-search algorithms for general-aviation flight trajectory generation. In: *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 28 (2005), Nr. 4, S. 801–811
- [65] LOZANO-PÉREZ, Tomás ; WESLEY, Michael A.: An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles. In: *Communications of the ACM* 22 (1979), Nr. 10, S. 560–570
- [66] GUTMANN, Jens-Steffen ; FUKUCHI, Masaki ; FUJITA, Masahiro: Real-time path planning for humanoid robot navigation. In: *International joint conference on artificial intelligence* Bd. 19, 2005, S. 1232
- [67] TOKUTA, Alade: *Extending the VGRAPH algorithm for robot path planning*. 2007
- [68] HART, Peter E. ; NILSSON, Nils J. ; RAPHAEL, Bertram: A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. In: *Systems Science and Cybernetics, IEEE Transactions on* 4 (1968), Nr. 2, S. 100–107
- [69] SCHILKE, Christina ; HECKER, Peter: Dynamic Route Optimization Based on Adverse Weather Data.
- [70] DOUGUI, Nour E. ; DELAHAYE, Daniel ; PUECHMOREL, Stéphane ; MONGEAU, Marcel: Light propagation algorithm for aircraft trajectory planning. In: *Proceedings of the 2011 American Control Conference, San Francisco, 2011*
- [71] DLR: *Wie stark sind Gewitter fuer Ozonbildung verantwortlich*
- [72] GÜMMER, Henrike: *Risikoanalyse einer wetterbeeinflussten Flugroute*, Leibniz Universität Hannover, Diplomarbeit, 2016

- [73] SIEDLER, Jasmin: *Flugroutensimulation in postfrontalen Schauern*, Leibniz Universität Hannover, Bachelorarbeit, 2012
- [74] GOEL, Vikram: *Application of mid-latitude postfrontal shower characteristics to adverse weather avoidance model in aviation*, Leibniz Universität Hannover, Masterarbeit, 2013
- [75] SAUER, Manuela ; SAKIEW, Ludmila ; HAUF, Thomas ; HUPE, Patrick: Poster 8.6 Some applications of the adverse weather diversion model divmet. In: *93th AMS Annual Meeting, 16th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Austin, TX* (2013)
- [76] ADMINISTRATION, Federal A.: *Instrument Procedures Handbook, Appendix A: Emergency Procedures*. Bd. FAA-H-8083-16. U.S. Department of Transportation, 2013 http://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/instrument_procedures_handbook/media/FAA-H-8083-16.pdf
- [77] VATTI, Bala R.: A generic solution to polygon clipping. In: *Communications of the ACM* 35 (1992), Nr. 7, S. 56–63
- [78] PREPARATA, Franco P ; SHAMOS, Michael I.: *Computational geometry: an introduction*, 1985
- [79] GRAHAM, Ronald L.: An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set. In: *Information processing letters* 1 (1972), Nr. 4, S. 132–133
- [80] FIEHN, Alina: *Coupling of the Adverse Weather Diversion Model DIVMET with the Air Traffic Model NAVSIM*, Institut für Meteorologie und Klimatologie, Leibniz Universität Hannover, Masterarbeit, 2014
- [81] HASEVOETS, N ; CONROY, P: Arrival Manager: Implementation guidelines and lessons learned. In: *Edition 0.1, Brussels: EUROCONTROL* (2011)
- [82] HUPE, Patrick: *Untersuchung des Wettereinflusses auf Sektorbelastungen in der Flugsicherung*, Leibniz Universität Hannover, Bachelorarbeit, 2012
- [83] HUPE, Patrick: *Simulation und Analyse des Flugverkehrs im Fall eines Squall-Line-Ereignisses über Österreich*, Leibniz Universität Hannover, Masterarbeit, 2015
- [84] SAUER, Manuela ; THOMAS, HAUF ; SAKIEW, Ludmila ; PAK WAI, CHAN ; SHUK-MEI, TSE ; PATRICK, HUPE: On the Identification of Weather Avoidance Routes in the TMA of Hong Kong International Airport. In: *Journal of Zhejiang University Science* 1 (2015)
- [85] HUPE, Patrick ; HAUF, Thomas ; ROKITANSKY, Carl-Herbert: Case Study of Adverse Weather Avoidance Modelling.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei denjenigen bedanken, die zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr. Thomas Hauf danke ich für die Möglichkeit, diese Arbeit mit der Interessanten Themenstellung am Institut für Meteorologie und Klimatologie in Hannover durchführen zu können. Seit Beginn meiner Promotion hat er mich intensiv und engagiert begleitet sowie durch die anregenden fachlichen Diskussionen unterstützt.

Für die freundliche Übernahme des Korreferats danke ich Herrn Prof. Dr. Dieter Etling.

Den Kolleginnen und Kollegen am Institut für Meteorologie und Klimatologie, insbesondere der Arbeitsgruppe Allgemeine Meteorologie und Verkehrsmeteorologie, die auf vielfältige Weise zum Gelingen dieser Arbeit und zur guten Atmosphäre beigetragen haben, möchte ich herzlich danken.

Zudem gilt mein Dank an die Kollegin Manuela Sauer für die gute Zusammenarbeit und die Durchsicht des Manuskripts.

Meiner im Lauf der Entstehung dieser Arbeit deutlich gewachsenen Familie sage ich schlicht: Danke!

Lebenslauf

Ludmila Sakiew geb. Anufrieva

Geboren am: 18. Juli 1983
Ort: Sankt Petersburg
Familienstand: Verheiratet, zwei Töchter

Beruflicher Werdegang

2009 – 2012 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am
Institut für Meteorologie und Klimatologie
ab 2009 Promotionsstudentin am
Institut für Meteorologie und Klimatologie

Schule & Studium

2004 – 2009 Studium der Meteorologie, Leibniz Universität Hannover,
Nebenfächer: Biophysik, Physik Optik
Diplomarbeitsthema:
*Entwicklung eines Diffusors und Messen der
nahen Infrarotstrahlung mit Polychromix DTS1700*
Note: 1,65 gut
2003 – 2004 Studium der Experimentellen Physik,
Georg-August-Universität in Göttingen
1999 – 2003 Abitur in Göttingen,
Leistungskurse: Mathematik, Physik

Veröffentlichungen

- M. Sauer, T. Hauf, L. Sakiew, P.W. Chan, S.-M. Tse, P. Hupe,** *On the Identification of Weather Avoidance Routes in the TMA of Hong Kong International Airport*, Journal of Zhejiang University - Science A, 2015
- T. Hauf, L. Sakiew, M. Sauer,** *Adverse weather diversion model DIVMET*, Journal of Aerospace Operation, 2013, DOI: 10.3233/AOP-130037
- L. Sakiew, C.H. Rokitansky, M. Sauer, P. Hupe and T. Hauf,** Vortrag und Poster *Sector Occupancy Analysis with the Adverse Weather Diversion Model DIVMET*, American Meteorological Society, Austin (Texas), 2013
- L. Sakiew, T. Hauf, and C.H. Rokitansky,** Vortrag *DIVMET - Modellierung der Flugrouten bei Gewitter*, Nutzerkonferenz Deutsche Flugsicherung GmbH, Langen, 2012
- L. Sakiew, T. Hauf, and C.H. Rokitansky,** Vortrag *Modeling aircraft routes in thunderstorm conditions*, European Meteorological Society, Berlin, 2011