Die Visualisierung eines dreidimensionalen gekrümmten Anflugs in Verbindung mit dessen Lärmemission

Sarah Pauksch

13. Oktober 2014

Masterarbeit

Die Visualisierung eines dreidimensionalen gekrümmten Anflugs in Verbindung mit dessen Lärmemission

---

13. Oktober 2014

IB-Nummer: 112-2014/31

Zugänglichkeit: C/II

Sarah Pauksch

Bachelor of Science

sarah.pauksch@st.ovgu.de

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Fakultät für Informatik

FAKULTÄT FÜR
INFORMATIK

Institut für
Flugführung

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Preim

Institut für Simulation und Grafik
Fakultät für Informatik
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg

Zweitprüfer:

Dr.-Ing. Robert Geister

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Flugführung
ATM-Simulation
Lilienthalplatz 7
38108 Braunschweig

Kurzbeschreibung

Für die Reduktion von Fluglärm werden gekrümmte Anflüge zur Verlagerung des Lärms auf weniger dicht besiedelte Gebiete durchgeführt. Um diesen Ansatz europaweit einzusetzen, müssen Forscher bei dem Entwurf einer Anflugroute für verschiedene Flughäfen visuell unterstützt werden.

Die Zielsetzung der Masterarbeit besteht in der Entwicklung einer Anwendung zur Visualisierung der Anflugpfaddaten auf Basis einer der drei Anflugarten 'Area Navigation', 'Required Performance Navigation' oder 'Ground Based Augmentation System'. Es werden zwei Verfahren vorgestellt, die einen vorgegeben Anflug sowie dessen Lärmemission in Google Earth präsentieren. Die Lärmberechnung erfolgt anhand vereinfachter Annahmen. Der Fokus der Visualisierungen liegt neben der korrekten Darstellung des Pfads, auf der Lage und Größe nahegelegener Siedlungen und deren Lärmbelastung durch die Anflüge.

Zum einen wurde eine Lärmkarte mit Hilfe des Marching Squares Algorithmus erstellt und zum anderen eine nach Schalldruckpegel farbkodierte Markierung der umliegenden Ortschaften. Bei einer Evaluation wurde deutlich, dass eine Kombination beider Methoden die jeweiligen Defizite ausgleicht.

Eidesstaatliche Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides durch meine Unterschrift, dass die vorliegende Arbeit von mir selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt worden ist. Inhalte und Passagen, die aus fremden Quellen stammen und direkt oder indirekt übernommen worden sind, wurden als solche kenntlich gemacht.
Ferner versichere ich, dass ich keine andere, außer der im Literaturverzeichnis angegebenen Literatur verwendet habe. Diese Versicherung bezieht sich sowohl auf Textinhalte sowie alle enthaltenden Abbildungen, Skizzen und Tabellen. Die Arbeit wurde bisher keiner Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Ort Datum Unterschrift Sarah Pauksch

Inhaltsverzeichnis

Kurzbeschreibung i

Inhaltsverzeichnis **v**

1 Einleitung **1**

1.1 Hintergrund 1

1.2 Motivation 3

1.3 Ziele der Arbeit 4

1.4 Aufbau der Arbeit 5

2 Grundlagen **7**

2.1 Gekrümmte Anflüge 7

2.2 Geographische Koordinaten 9

2.3 Satellitennavigation 11

2.4 Lärm 14

2.4.1 Fluglärm 15

3 Verwandte Arbeiten **16**

3.1 Gekrümmte Anflüge 16

3.2 Berechnung von Lärm 18

3.3 Die Visualisierung von Flugbahnen 19

3.4 Die Visualisierung der Lärmemission eines Anflugs 23

3.5 Vor- und Nachteile genannter Visualisierungen 25

4 Visualisierung gekrümmter Anflüge **28**

4.1 Aufgabenstellung 28

4.2 Benutzeroberfläche 29

4.3 Arbeitsablauf 32

4.4 Visualisierung Anflugpfad 34

4.5 Visualisierung Flughafen 36

5 Visualisierung Lärm **39**

5.1 Berechnung von Lärm 39

5.2 Darstellung von Lärm 44

5.2.1 Methode 1 - Zweidimensionale Lärmkarte 44

5.2.2 Methode 2 - Farbkodierte Städte 54

6 Evaluation **59**

6.1 Ziele 59

6.2 Aufbau und Ergebnisse 60

6.3 Fazit der Evaluation 64

7 Schlussbetrachtungen **67**

7.1 Fazit 67

7.2 Ausblick 69

7.2.1 Datenverarbeitung 70

7.2.2 Lärmberechnung 70

7.2.3 Visualisierung 71

Abbildungsverzeichnis **vi**

Tabellenverzeichnis **vii**

A Abkürzungen **viii**

A.1 Symbole x

B Ergebnisse der Evaluation **xi**

Referenzen **xvii**

Kapitel 1

Einleitung

Der Mensch braucht Stille, aber der Fortschritt gab ihm Lärm.
(Phil Bosmans, belgischer Ordenspriester und Schriftsteller, 1922 geboren [1])

1.1 Hintergrund

Am 14. August 1901 hob Gustav Weißkopf als Erster mit einem motorisierten Flugzeug ab [2]. Seitdem steigt die Anzahl der Flieger stetig und Prognosen über die Menge der Flugbewegungen in den kommenden Jahren zeigen weiter wachsende Zahlen auf [3]. Mit der ständig steigenden Dichte an Luftverkehr wächst auch der resultierende Lärm. Anwohner eines Flughafens sind täglich hohen Schalldruckpegeln ausgesetzt und für ein Viertel der deutschen Bevölkerung stellt Fluglärm eine Belästigung im Alltag dar [4].
Trotz des vermehrten Flugverkehrs konnte der Fluglärm in den vergangenen 20 Jahren aufgrund technischer Fortschritte, besonders im Triebwerksbau, stark gesenkt werden. Die Umsetzung der damaligen Entwicklungen ist jedoch allmählich beendet. Das heißt, dass bei der wachsenden Anzahl an Flügen die Lärmbelastung zukünftig wieder steigen wird und neue Methoden zur Reduktion erforscht werden müssen [5].
Um eine Lärmminderung herbeizuführen existieren verschiedene Möglichkeiten hinsichtlich einer Neugestaltung bisheriger Verfahren:

- Veränderung Lärmquelle
- Optimierung operationeller Verfahren

- Verkehrspolitisch orientierte Steuerungsmaßnahmen
- Passiver Schallschutz.

Die Lärmquelle kann beispielsweise in Bezug auf deren Aufbau verändert werden, um hohe Schalldruckpegel zu reduzieren. Zudem kann eine Neugestaltung operationeller Vorgehensweisen vorgenommen werden, zum Beispiel durch eine Optimierung der Anflugverfahren oder die Minimierung des Lärms, der direkt am Flughafen entsteht. Dort bewirken normalerweise die Triebwerke die Fortbewegung am Boden. Elektrobetriebene Flugzeugschlepper können dieses Verfahren bezüglich der Lärmemission verbessern [6].
Als dritte Variante können verkehrspolitisch orientierte Steuerungsmaßnahmen, durch eine Auferlegung lärmabhängiger Landegebühren oder durch Nachtflugverbote, ebenfalls der Belastung entgegenwirken [7]. Zusätzlich verringert passiver Schallschutz in Form von baulichen Maßnahmen, wie schallgedämmten Dächern oder Schallschutzfenstern, die Belastung der Anwohner [6].
In dieser Arbeit wird die operationelle Veränderung des Anflugverfahrens in Form von gekrümmten Anflügen, insbesondere die Wirkung der Lärmentwicklung, näher betrachtet.

Gekrümmte Anflüge wurden ursprünglich mit der Zielsetzung entwickelt, Landungen im Gebirge bzw. bei anspruchsvollen Geländebedingungen zu unterstützen. In den letzten Jahren wurde dieser Ansatz genutzt, um mit derartigen Anflügen Fluglärm zu mindern sowie eine höhere Effizienz, beispielsweise durch kürzere Flugrouten, zu erreichen. Dabei werden dicht besiedelte Gebiete mit Hilfe von gekrümmten Pfadsegmenten umflogen. Zusätzlich können Anflüge mit einem steileren Sinkflug durchgeführt werden, um den Weg zu verkürzen, auf dem sich die Lärmquelle in Bodennähe befindet [8].
Durch die Navigation mit dem Global Positioning System (GPS) können Bögen um Siedlungen geflogen werden, um den Lärm zu verlagern. Als Beispiel ist in Abbildung 1.1 der Nürnberger Flughafen mit zwei möglichen Anflugpfaden abgebildet. Im Vergleich zu dem üblichen direkten Anflug (gerades Segment) kann mithilfe eines gekrümmten Segments ein großes Wohngebiet von hohen Schallpegeln verschont werden.

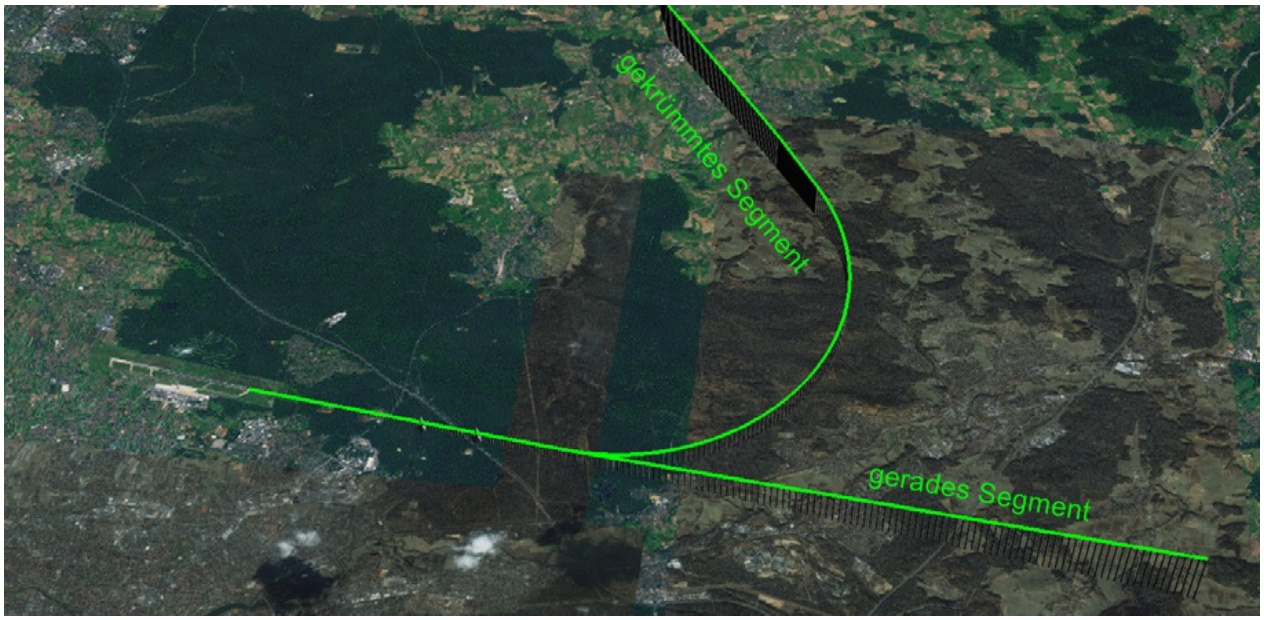

Abbildung 1.1: Zwei Anflugrouten an den Nürnberger Flughafen in Google Earth (GE) - durch das gekrümmte Segment kann ein großes Wohngebiet umflogen werden [8].

1.2 Motivation

Seit Jahrzehnten erheben Flughafen-Anwohner Proteste gegen den Lärm, dem sie ausgesetzt sind. Sechs Prozent der deutschen Bevölkerung fühlen sich durch Fluglärm gestört, fast ein Viertel Deutschlands fühlt sich „etwas“ belästigt. Die Grundlagen, auf die sie sich berufen, sind medizinische Studien sowie Gerichtsurteile – beispielsweise das Nachtflugverbot am Frankfurter Flughafen [4].

Eine Minderung der Lebensqualität durch Schlafstörungen oder Stress sowie gesundheitliche Beschwerden werden Fluglärm als Konsequenzen zugeschrieben [9]. Ein wissenschaftlicher Nachweis über den Zusammenhang von körperlichen Beeinträchtigungen und hohen Schalldruckpegeln ist umstritten, da ein Zusammenwirken vieler Faktoren gesundheitliche Beschwerden hervorrufen. Wissenschaftler diskutieren derzeit in verschiedenen Studien über Lärm als alleinige Ursache von beispielsweise Bluthochdruck oder Herz- und Kreislauferkrankungen. Doch nicht nur potentielle gesundheitliche Risiken, auch die Wertminderung von Immobilien oder die Beeinträchtigung kognitiver Leistungen von Schulkindern geben einen Anlass dafür, Lösungen gegen zu hohe Dauerschalldruckpegel zu finden [6].

Die Europäische Union investiert zusammen mit Flugzeugherstellern, der Luftverkehrswirt-

schaft, der Wissenschaft und der Politik viele Millionen Euro in Forschungen der Luftfahrt. Seit 1995 hat Deutschland diesbezüglich ein eigenes Forschungsprogramm. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) betreut die Forschungsprojekte im Auftrag des Bundeswirtschaftsministeriums. Zusammen mit den Mitteln der Bundesregierung und der Unternehmen der Luftfahrt sind die Forschungsvorhaben mit mehreren Milliarden Euro ausgestattet [6].
Mit einem Anteil dieser Forschungsgelder wird die Reduktion von Fluglärm näher untersucht. Dazu gehören auch operationelle Maßnahmen wie gekrümmte Flugbahnen bei Anflügen. In den letzten Jahrzehnten wurden dazu vielfältige Forschungen betrieben, deren Ergebnisse hohen Mehrwert für die Flughafen-Anwohner haben. Seit Februar 2011 werden nachts am Flughafen in Frankfurt am Main bei niedrigem Verkehrsaufkommen derartige Flugrouten geflogen. Dadurch ist in der circa 14 Kilometer entfernten Stadt Offenbach der Lärm um sechs bis acht dB(A) (A-bewerteter Schalldruckpegel, siehe Kapitel 2.4) gesenkt wurden [10].
Um diesen Erfolg auszubreiten, berechnen und optimieren aktuelle Forschungen des DLR gekrümmte Anflüge individuell für verschiedene Flughäfen [11]. Bei der Planung eines Anflugpfads ist eine visuelle Informationsdarstellung eine Unterstützung für die Forscher. Die Visualisierung von Anflügen auf Basis bestimmter Parametereingaben ist gegenwärtig nicht ausreichend entwickelt. Bisher wurden gekrümmte Anflugpfade nur für wenige Flughäfen nahezu manuell entworfen.
Da der Ansatz europaweit auf verschiedene Flughäfen erweitert werden soll, muss der aufwändige Vorgang der Visualisierung während der Entwurfsphase verbessert werden, um eine optimale Basis für die Entwicklung der Flugbahnen zu schaffen. Darüber hinaus sollen die Parameter aus dem Anflugentwurf durch Reduzierung der manuellen Eingaben stabil und fehlerunauffällig in die Boden- und Bordsysteme des DLR übertragen werden, um Flugversuche zu diesen operationellen Verfahren durchzuführen.

1.3 Ziele der Arbeit

Im Rahmen der Masterarbeit soll das Tool FlightPathNoiseVisualizer (FPNV) entwickelt werden, das den Anwender dabei unterstützt, den gewünschten Anflugpfad zu entwerfen. Zu Beginn wird dafür eine klar strukturierte Benutzeroberfläche konstruiert, welche die Eingabe aller

notwendigen Parameter erleichtert, diese speichert und den Darstellungsprozess startet.
Die Visualisierung soll eine korrekte, effiziente und umfassende Erkennung der Datenmuster ermöglichen. Dazu wird der Flugpfad dreidimensional visualisiert und die Parameter der Anflüge, wie beispielsweise Wegpunkte, werden nach den Standards der Luftfahrt bereitgestellt. Einen Fortschritt bezüglich der bisherigen Arbeiten stellt die Erweiterung durch die Visualisierung der resultierenden Lärmbelastung auf anliegende Städte dar. Es soll unmittelbar ersichtlich sein, wo Wohngebiete liegen und wie hoch deren Schalldruckpegel durch den angegebenen Anflug ist. Für die Lokalisation nächstgelegener Siedlungen wird eine Datenbank deutscher Städte [12] genutzt. Aufbauend auf deren Koordinaten sollen diese nach Größe und Nähe visuell hervorgehoben werden. Alle Ergebnisse müssen reproduzierbar sein.
Nach Abschluss der Entwicklung und Implementation zweier Methoden zur Visualisierung von Lärm, soll ein Vergleich hinsichtlich Vor- und Nachteile der Varianten sowie eine Evaluation der Anwendung die Ergebnisse validieren.
Für die Implementation des entwickelten Konzepts steht die C++ -Bibliothek Qt und das Tool Qt Creator in Verbindung mit Google Earth (GE) zur Verfügung.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. Nach der Einleitung umfasst Kapitel zwei die Grundlagen, die für das Verstehen der Thematik erforderlich sind. Darin wird sich mit gekrümmten Anflügen, die dafür notwendige Satellitennavigation, geographischen Koordinaten sowie Lärm auseinandergesetzt.
Im dritten Abschnitt werden verwandte Arbeiten vorgestellt, die in Bezug auf gekrümmte Anflüge, Lärmberechnung, Flugbahnvisualisierung sowie der Visualisierung der Lärmemission von Flugzeugen, den aktuellen Stand der Forschung widerspiegeln.
Die Kapitel vier und fünf umfassen den Hauptteil der Arbeit und beschreiben das entwickelte Tool FlightPathNoiseVisualizer zur Darstellung des resultierenden Lärms eines Anflugpfades. Kapitel vier legt die genaue Aufgabenstellung dar und erläutert den Arbeitsablauf des FPNV sowie die Visualisierung eines Flugpfades einschließlich Flughafen näher.
Das fünfte Kapitel erklärt die Lärmberechnung, die der Anwendung zugrunde liegt. Zudem

werden zwei Varianten zur Visualisierung der Lärmemission eines Anflugpfades in Verbindung mit betroffenen Siedlungen beschrieben.
Für die Einschätzung der Ergebnisse bei einer zukünftigen Verwendung der Software, wurde eine Evaluation durchgeführt, deren Ergebnisse in Abschnitt sechs diskutiert werden. Zum Abschluss fassen ein Fazit und ein Ausblick die Arbeit in Kapitel sieben zusammen.

Kapitel 2

Grundlagen

In diesem Abschnitt werden die Themengebiete gekrümmte Anflüge sowie die dafür notwendige Satellitennavigation, geographische Koordinaten und Lärm näher erläutert, um das Verständnis der folgenden Kapitel zu erleichtern.

2.1 Gekrümmte Anflüge

Gekrümmte Anflüge bestehen aus einer Kombination einfacher Segmente, sogenannter „Legs“. Aus diesem Grund wird häufig von segmentierten Anflügen gesprochen. In dieser Arbeit werden drei verschiedene Leg-Typen betrachtet – ‘Initial Fix’ (IF), ‘Track-to-Fix’ (TF) und ‘Radius-to-Fix’ (RF).

Den Startpunkt eines jeden Anflugs ist der IF, der in der Luftfahrt mit einem vierzackigen Stern gekennzeichnet und dessen Position durch einen Wegpunkt definiert wird. Wegpunkte besitzen eine geographische Koordinate (bestehend aus einem Latitude-, Longitude- und Altitudewert - siehe Kapitel 2.2) und als Identifikator einen frei wählbaren Code aus vier bis fünf Buchstaben, wahlweise in Verbindung mit Zahlen (Beispiel siehe Abbildung 2.1).

Nach einem IF können beliebig viele TF und/oder RF-Legs folgen. Bei einem TF handelt es sich um ein gerades Segment zwischen zwei Wegpunkten. Dazu werden diese direkt durch eine Strecke verbunden (siehe Abbildung 2.2). Ein RF ist ein Kreisbogen mit konstantem Radius und jeweils einem Start- und Endpunkt als Wegpunkt, dessen Drehzentrum die Krümmung des Pfadabschnitts bestimmt (siehe Abbildung 2.3). Bei der Eingabe der Parameter wird nur der

Endpunkt des jeweiligen Legs angegeben. Der Startpunkt eines Segments ist der Endpunkt des vorhergehenden Segments bzw. der IF [8].

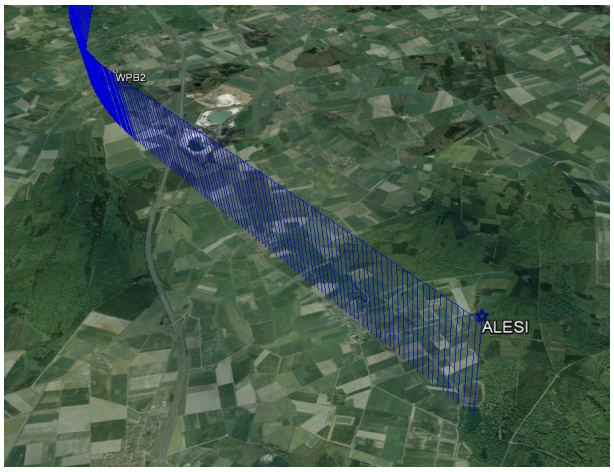

Abbildung 2.1: Initial Fix am Wegpunkt „ALESI“ mit ultramarinblauem Stern in GE.

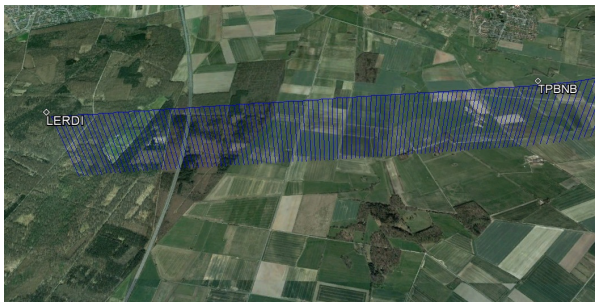

Abbildung 2.2: Track-To-Fix von Wegpunkt „TPBNB“ zu „LERDI“ in GE, beide markiert mit weißem Diamant.

Abbildung 2.3: Radius-To-Fix von Wegpunkt „TPBNA“ zu „TPBNB“ mit gekennzeichnetem Drehzentrum in GE.

Die Sequenz der Wegpunkte legt den genauen Verlauf des Flugpfades fest. Dieser endet an der Landebahn des Flughafens.

2.2 Geographische Koordinaten

Alle Berechnungen des FPNV basieren auf geographischen Koordinaten. Jeder Anflugpfad wird anhand dieser definiert, ebenso wie die Zentren der umliegenden Städte. Für die Darstellung aller Daten benötigt GE geographische Koordinaten, um diese in der dreidimensionalen Welt abzubilden.

Eine geographische Position kann mit Hilfe verschiedener Koordinatensysteme angegeben werden. Das am häufigsten verwendete System in der Luftfahrt (World Geodetic System von 1984) beruht auf den geographischen Koordinaten Latitude, Longitude und Altitude (Breitengrad, Längengrad, Höhe). Die Erde ist in 360 Längengrade und 180 Breitengrade aufgeteilt. Der Äquator bildet die Ebene mit einem Wert von 0° geographischer Breite. Die Breitengrade erstrecken sich bis zum Nord- bzw. Südpol bei +/-90°. Der Nullmeridian (0° Längengrad) verläuft durch die Londoner Sternwarte Greenwich. Die Längengrade erstrecken sich in Richtung Ost und West bis +/- 180° [13].

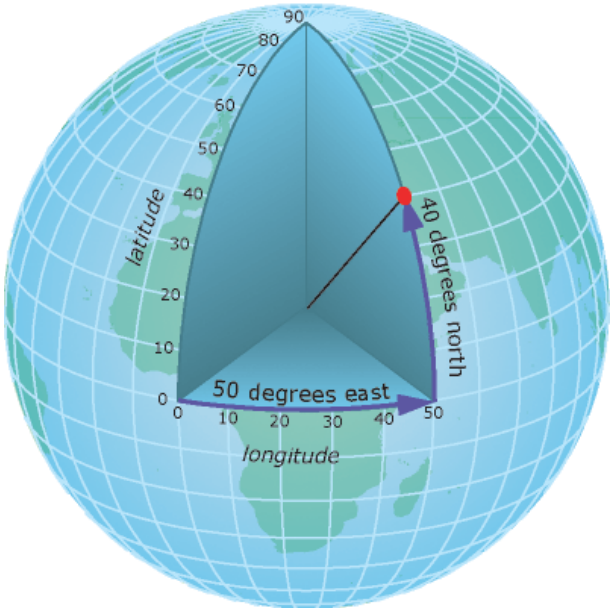

Abbildung 2.4: Bestimmung der Längen- und Breitengrade, roter Punkt: 40° Nord, 50° Ost [14].

Die Höhenangabe erfolgt üblicherweise in Meter. Latitude und Longitude werden normalerweise in Grad, Minute und Sekunde zusammen mit der Himmelsrichtung aufgeführt (Beispiel: 50° 47’ 29.8428“ N, 12° 49’ 55.7868“ E). Diese Werte können mit folgender Formel in ein Dezimal-

system überführt werden:

$$\text{Dezimalgrad} = \text{Grad} + \text{Minuten}/60 + \text{Sekunden}/3600 \tag{2.1}$$

[13]

Beispiel:

Latitude: $50 + 47/60 + 29.8428/3600 = 50.791623°$
Longitude: $12 + 49/60 + 55.7868/3600 = 12.832163°$

Da die Abstände der Längengrade mit zunehmender Nähe zu den Polen sinken, sind Rechnungen mit geographischen Koordinaten kompliziert. Ohne zusätzliche Funktion, beispielsweise bei der Berechnung eines Quadrats um einen Punkt, würden die waagerechten Kanten gestaucht oder verzerrt werden (siehe Abbildung 2.5). Aus diesem Grund werden die Daten zur Vereinfachung in ein lokales kartesisches Koordinatensystem mit der Maßeinheit Meter überführt, um darin die Kalkulationen durchzuführen und anschließend die Ergebnisse wieder zurück zu transformieren.
Das zugrunde liegende kartesische Koordinatensystem hat, im Vergleich zum Geozentrischen, konstante Winkel und Längen. Die X- und Y-Achsen repräsentieren die Ost/West- bzw. Süd/Nord-Ausrichtung und die Z-Achse die Höhe [14].
Ein Beispiel:
Für die Definition eines Legs in einer Flugroute gibt es neben den geographischen Koordinaten die Möglichkeit, den Zielpunkt in Distanz, Richtung und Gleitpfadwinkel (GPA – der Winkel des Sinkfluges) anzugeben. Um die Koordinaten des nächsten Wegpunktes zu berechnen, wird der Ausgangspunkt in den Ursprung eines lokalen Systems gesetzt. Die Orientierung der Y-Achse wird entsprechend des Richtungs-Werts positioniert. Nun kann ein rechtwinkliges Dreieck zwischen der Y- und Z-Achse aufgespannt werden, um die neuen Koordinaten zu ermitteln. Grafik 2.6 zeigt die bekannten Größen, die Länge der Hypotenuse sowie der GPA .

Mit Hilfe der Winkelfunktion

$$sin(\text{GPA}) = \frac{a}{c} \quad \text{(in Gradmaß)} \tag{2.2}$$

können die beiden Ankatheten berechnet werden.

$$\text{b} = \sqrt{\text{c}^2 \text{ - } \text{a}^2} \tag{2.3}$$

Der Betrag von b wird auf den Y-Wert addiert und der Wert von a auf den Z-Wert des Ausgangspunktes. Abschließend ergibt die Rücktransformation in das geozentrische Koordinatensystem den gesuchten Punkt.

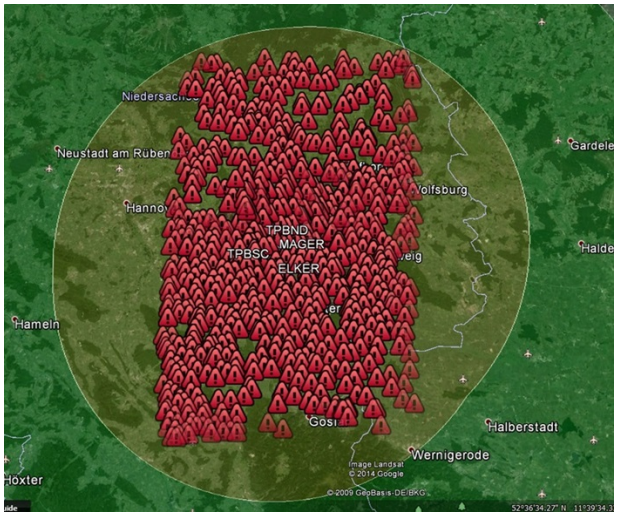

Abbildung 2.5: Schwierigkeit geozentrischer Koordinaten: ohne zusätzliche Funktion Stauchung der waagerechten Kanten des Quadrats in GE.

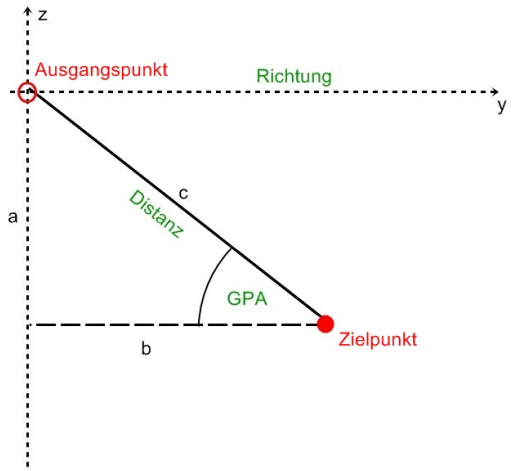

Abbildung 2.6: Berechnung Wegpunkt anhand Distanz, Richtung und Gleitpfadwinkel in lokalem Koordinatensystem.

2.3 Satellitennavigation

Globale Satellitennavigationssysteme werden zur Ermittlung der aktuellen Position eines Flugzeugs genutzt, um diese mit dem vorgegebenen Anflugpfad abzugleichen und möglichst präzise nachzufliegen.

In dieser Arbeit wird sich auf drei Anflugarten basierend auf den Navigationsverfahren Flä-

chennavigation (Area Navigation - RNAV), Performancebasierte Navigation (RNP) und Bodengestütztes Augmentationssystem (GBAS) konzentriert. Diese Systeme führen Flugzeuge über eine vorgegebene Sequenz an Wegpunkten zum Zielflughafen.

Ohne die Hilfe von Satellitennavigation müssen Flugrouten über bodenbasierte Navigationshilfen führen. Die Genauigkeit bei dem Abfliegen des Sollflugwegs hängt dabei von den Signalmessungen dieser ab und kann mit zunehmender Entfernung relativ ungenau sein (siehe Abbildung 2.7). Heute ist es Dank satellitenbasierter Navigation möglich, Flugrouten unabhängig von terrestrischen Navigationshilfen frei zu definieren (siehe Abbildung 2.8) [15].

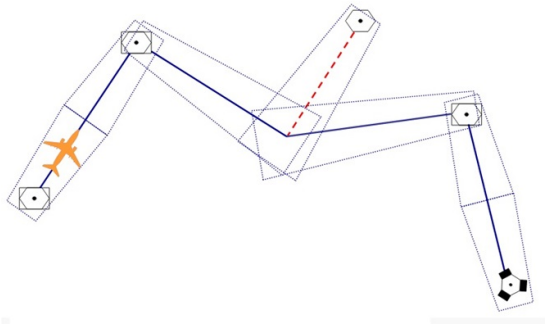

Abbildung 2.7: Flugroute basierend auf konventioneller Navigation [15].

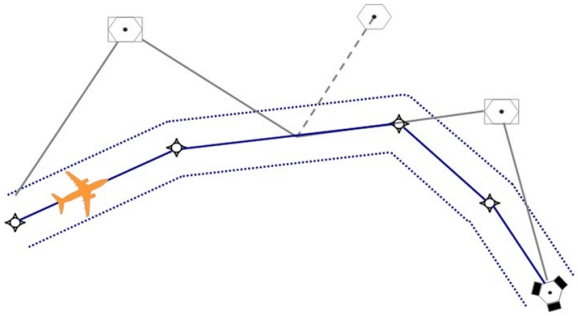

Abbildung 2.8: Flugroute anhand satellitenbasierter Navigation [15].

Dazu werden Wegpunkte bestimmt, die überflogen (Fly-Over) oder umflogen (Fly-By) werden (siehe Abbildungen 2.9 und 2.10).

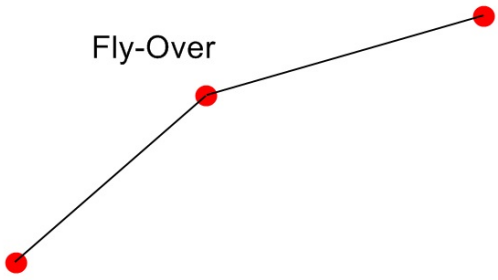

Abbildung 2.9: Fly-Over Waypoint: Wegpunkt muss überflogen werden.

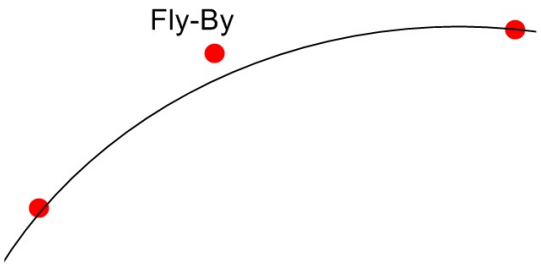

Abbildung 2.10: Fly-By Waypoint: Wegpunkt muss nicht überflogen werden.

Bei dem Ansatz RNAV können nur gerade Legs als Routensegment angegeben werden. Durch Fly-By Wegpunkte werden zwar Kurven ermöglicht, diese sind jedoch nicht genau definiert. Bei RNP gibt es zusätzlich RF-Legs die präzise Kurvenflüge in der Endphase eines Flugs definieren.

Die dadurch gewonnene Flexibilität des Routenverlaufs bringt Vorteile bei der Fortbewegung in schwierigem Terrain oder bei der Reduktion von Fluglärm. Bei den zwei genannten Anflugarten handelt es sich normalerweise um Nicht-Präzisionsanflüge, da sie nur lateral geführt werden. Besitzt ein Anflug zusätzlich eine vertikale Führung, beispielsweise mit Hilfe eines Mikrowellen-Landesystems, ist es ein Präzisionsanflug. RNAV und RNP können als solcher durchgeführt werden [8] [16].
Der Ansatz „Ground Based Augmentation System“ (GBAS) ist durch die Angabe eines Gleitpfadwinkels, der den vertikalen Verlauf der Flugbahn beschreibt, als Präzisionsanflug definiert. Dabei wird die Satellitennavigation zusammen mit einem bodengestützten Augmentationssystem eingesetzt. GPS-Signale werden von dem Flugzeug und von einer Bodenstation am Flughafen empfangen. Die Station bestimmt die Differenzen zwischen gemessenen und wahren Abständen zu den einzelnen Satelliten. Diese Daten schickt sie zusammen mit dem Referenzflugpfad an das Flugzeug. An Bord wird dann mit den Korrekturen der Laufzeitmessung die eigene Position augmentiert und die Abweichungen vom Sollflugpfad berechnet [17].
Dadurch kann die Maschine auch bei schlechten Sichtbedingungen mit einer Exaktheit von zwei Metern im Mittel navigiert werden (Es sind Genauigkeiten bis in den Dezimeterbereich möglich) [11]. Durch die erhöhte Genauigkeit werden Präzisionsanflüge zur Umsetzung von Lärmschutzmaßnahmen eingesetzt. Außerdem sollen dadurch Sicherheit und Flexibilität des Luftverkehrs gesteigert werden. Derzeit können jedoch nur wenige Flugzeuge diesen Ansatz nutzen, da eine spezielle Ausstattung an Bord erforderlich ist (bspw. angepasste Anzeigen, Empfänger für die Daten der Bodenstation) [8]. Zudem muss der angeflogene Flughafen über eine GBAS–Bodenstation verfügen [18].

Ein Anflug auf der Grundlage von GBAS wird in zwei Abschnitte geteilt – Terminal Area Path (TAP) und Final Approach Segment (FAS). Bei einem TAP-Block handelt es sich um einen Wegpunkt-basierten Flugpfad, bestehend aus mehreren geraden oder gekrümmten Legs. Dieser endet jedoch nicht direkt an der Landebahn, sondern in einem FAS-Block.

Der FAS-Block ist die Landegerade und erstreckt sich nach der Spezifikation von GBAS mindestens 23 nautische Meilen[1] von dem Startpunkt der Landebahn in die entgegengesetzte Ausrichtung dieser. Der TAP sollte mindestens 3nm vor dem Startpunkt der Landebahn in das FAS übergehen. Der Gleitpfadwinkel sowie der Start- und Endpunkt der Landebahn sind variabel (Startpunkt „Landing/Fictious Threshold Point“ (LTP/FTP) und Endpunkt „Flight Path Alignment Path“ (FPAP) werden bei GBAS Anflügen zusätzlich angegeben). Durch die Ausstrahlung mehrerer Referenzanflüge von einer GBAS Bodenstation kann je nach Anfluggeschwindigkeit, Zulassung und Wind der passende Anflug ausgewählt werden [8] [17].

2.4 Lärm

Töne entstehen durch eine Luftdruckschwankung, die wiederum durch Schwingungen einer Schallquelle verursacht werden. Bei der Wahrnehmung der Schallwellen bilden der Schalldruck und die Frequenz der Luftschwankungen das Geräusch [6]. Die Maßeinheit für den Schalldruckpegel ist Dezibel. Als Referenzpunkt dient der niedrigste Schalldruck, den das menschliche Ohr wahrnehmen kann, dieser liegt somit bei null Dezibel [19]. Die Wahrnehmung von Lautstärke und Schalldruckpegel sind nicht identisch. Geräusche mit gleichem Schalldruck aber anderen Frequenzen werden unterschiedlich laut wahrgenommen. Besonders tiefe und hohe Töne werden vom menschlichen Gehör als leiser empfunden [19]. Um diesen Effekt zu kompensieren, wird in Messgeräten ein genormter, sogenannter A-Filter eingeschaltet. Die Maßeinheit wird dementsprechend Dezibel mit A-Filter (dB(A)) genannt [20]. Aufgrund der logarithmischen Skala wird eine Erhöhung von 10 dB(A) als doppelt so hohe Lautstärke in Bezug auf den Ausgangston wahrgenommen.
Lärm wird definiert durch jede Art von Schall, der als störend, lästig oder schmerzhaft empfunden wird [20]. Das Hörempfinden unterscheidet sich von Mensch zu Mensch und ist ein stark subjektiver Prozess. Somit kann Lärm, der von einem als störend empfunden wird, von anderen als erträglich eingestuft werden [6]. Straßen- und Luftverkehr sind die Hauptquellen des Lärms, der bei 65 bis 90 dB(A) liegt [21].

[1] Nautische Meilen, auch Seemeilen genannt, sind ein gebräuchliches Längenmaß in der Luftfahrt.
23 nm = 23 * 1.852 km = 42.596 km

2.4.1 Fluglärm

Am Frankfurter Flughafen werden derzeit täglich etwa 650 Starts und ebenso viele Landungen durchgeführt [22]. Aus einer seitlichen Entfernung von 300 Metern bringt es ein Airbus 320 mit 180 Sitzplätzen und einem Höchstabfluggewicht von 74 Tonnen beim Start auf 85 dB(A) [20].

Die Hauptquellen für Lärm bei einem Flugzeug sind die Triebwerke, das Fahrwerk und die das Flugzeug umströmende Luft [22]. Lärm entsteht, wenn der heiße Abgasstrahl mit hoher Geschwindigkeit auf die kalte Luft trifft, die das Triebwerk umgibt, zudem auch bei der Verbrennung von Treibstoff im Innern des Triebwerks und bei den großen rotierenden Turbinen am Lufteinlass. Eine zweite Ursache des Fluglärms ist der aerodynamische Lärm. Dieser entsteht, wenn Luft über den Flugzeugkörper und die Tragflächen streicht und an der Reibungsfläche verwirbelt. Besonders bei Start und Landung, wenn hoher Schub entwickelt werden muss, steigt der Lärmpegel. Im Landeanflug verstärkt sich der aerodynamische Lärm wegen der Luftturbulenzen an den ausgefahrenen Landeklappen und am Fahrwerk [20].

Die Berechnung von Fluglärm wird in Kapitel 5.1 näher erläutert.

Kapitel 3

Verwandte Arbeiten

In diesem Kapitel werden verwandte Arbeiten vorgestellt, die in den Bereichen ‚gekrümmte Anflüge', ‚Lärmberechnung', ‚Flugbahnvisualisierung' sowie der ‚Visualisierung der Lärmemission von Flugrouten' den aktuellen Stand der Forschung widerspiegeln.
Die Projekte aus den ersten beiden Sektionen bilden eine Basis für diese Arbeit. Darin werden wissenschaftliche Artikel zu Grundlagen über den Aufbau der segmentierten Anflugrouten und Ansätze zur Ermittlung der Lärmemission beschrieben. Die zwei darauf folgenden Abschnitte stellen ähnliche Konzepte in Bezug auf die Darstellung von Flugrouten und deren Lärmkartierung vor. Die letzte Sektion fasst die Stärken und Defizite der genannten Visualisierungen zusammen.

3.1 Gekrümmte Anflüge

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Seit den 1970ern beschäftigt sich das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt mit der Thematik gekrümmter Anflüge. Zu Beginn war die Motivation Anflüge in schwierigem Gelände zu erleichtern. Inzwischen soll der Ansatz hauptsächlich Fluglärm reduzieren [8]. In [8] von Dr. Robert Geister et al. werden gekrümmte Anflugverfahren basierend auf GBAS beschrieben. Dazu werden Grundlagen, Vorteile dieses Ansatzes und Ergebnisse von Flugversuchen bezüglich entworfener Displays für das Cockpit vorgestellt. Der Artikel vermittelt einen Überblick und erleichtert einen Einstieg in das Thema. Anhand der zugrunde liegenden Navigationsverfah-

ren GBAS und RNP wird das Konzept der Präzisionsanflüge erklärt. Die Grundlagen gliedern sich in den Aufbau der segmentierten Flugrouten und in die Richtlinien, an die das Konzept gebunden ist. Mit Hilfe von Simulationsflügen und Flugversuchen wurden angepasste Displays getestet, die zur Unterstützung der Piloten konstruiert wurden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden in [8] diskutiert.

Carolo-Wilhelmina-Universität Braunschweig

An der Technischen Universität in Braunschweig sind gekrümmte Anflüge derzeit Schwerpunkt in aktuellen Forschungen. Das Institut für Flugführung beschäftigt sich zusammen mit dem japanischen Forschungsinstitut für Elektronik und Navigation (ENRI) in [11] mit einem speziellen Anflug für den Flughafen Haneda in Tokio.

Nach einer Einführung in GBAS wird im Fokus der Arbeit ein Anwendungsbeispiel am Flughafen Haneda analysiert. In Abbildung 3.1 ist die geplante Anflugroute in Tokio dargestellt. Durch diesen Anflug wird die Stadt von hohen Schallpegeln verschont, da sich der komplette Flugpfad über der Bucht von Tokio befindet. Die einzelnen Wegpunkte sind rot markiert und trennen die Legs der Route voneinander. Die rechte Grafik 3.2 zeigt das Konzept übertragend auf den Flughafen in Braunschweig. Dort wurden Flugversuche dazu durchgeführt, deren Ergebnisse in [11] ausgewertet werden.

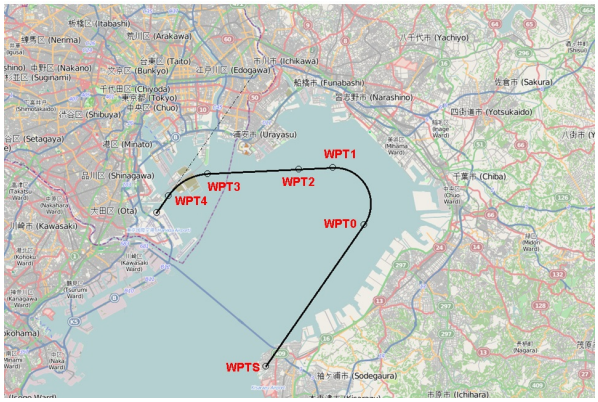

Abbildung 3.1: Gekrümmter Anflug auf den Flughafen Haneda zum Lärmschutz der Stadt Tokio mit rot markierten Wegpunkten über der Bucht von Tokio [11].

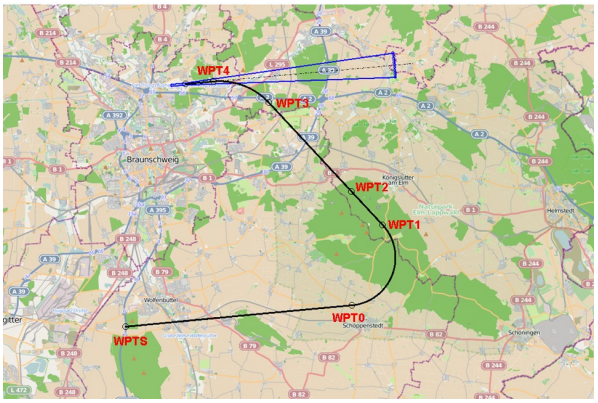

Abbildung 3.2: Das Konzept von Tokio übertragen auf den Flughafen Braunschweig (blaues Dreieck zur Markierung der verlängerten Landegeraden des Flughafens) [11].

3.2 Berechnung von Lärm

Max-Planck-Institut - Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen

1965 veröffentlichte das Bundesministerium für Gesundheitswesen ein Gutachten bezüglich Fluglärm, als Basis für das 1971 verabschiedete Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm. In dem Gutachten wurden ohne grundlegende Berechnungen Schutzzonen um Flughäfen aufgestellt. Um eine Grundlage dafür zu schaffen, entwickelten Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für Strömungsforschung in Göttingen eine Methode dafür - die Anleitung zur Berechnung von Fluglärm (AzB). Seit 1975 ist die AzB das gesetzliche Verfahren zur Berechnung von Fluglärm in Bezug auf die Festlegung von Lärmschutzbereichen [23].

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Ullrich Isermann beschäftigt sich seit vielen Jahren am Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik in Göttingen mit Fluglärmberechnungsverfahren. In Zusammenarbeit mit Rainer Schmid entstand [5]. Darin wird die Bewertung, Berechnung und Simulation von Fluglärm konzeptuell behandelt. Es werden Problemstellungen und mögliche Verfahren zur Lärmberechnung von Flugzeugen aufgezeigt. Dabei liegt der Fokus auf dem AzB-Verfahren an zivilen und militärischen Flugplätzen gemäß dem Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm. Weiterhin werden die Genauigkeit der Berechnungsverfahren und deren Harmonisierung in der EU sowie Überarbeitungsmöglichkeiten der AzB diskutiert. In [23], einem aktuelleren Artikel, beschreibt Isermann das Prinzip der Fluglärmberechnung und erläutert konventionelle Vorgehen, beispielsweise das Segmentierungsverfahren zur Zerlegung der Flugbahn, sowie Simulationsverfahren anhand bereits existierender Modelle. Zudem werden Kriterien für mögliche Gruppierungen der Flugzeuge beschrieben.

Die Berechnung von Fluglärm wird ebenfalls in der Dissertation [24] von Lothar Bertsch aus 2013 fokussiert. Darin soll eine Lärmvorhersage ein wichtiges Entscheidungskriterium bei einem Flugzeugvorentwurf darstellen.
Bertsch stellt verschiedene aktuelle Anwendungen zur Lärmberechnung vor (bspw. das „Aircraft Noise Prediction Program“ der NASA und „SOPRANO - Silencer Common Platform for Aircraft Noise calculations“), die hauptsächlich den Fluglärm einzelner Flugpfadpunkte am Boden be-

rechnen. Der Autor selbst entwickelt in seiner Arbeit das Tool „PANAM“ (Parametric Aircraft Noise calculations) zur Kalkulation der gesamten Lärmemission eines Flugzeugs.
Für die Feststellung der resultierenden Schallpegel werden drei Vorgehensweisen vorgestellt. Zum einen können Daten mit einer Genauigkeit von ein bis zwei Dezibel gemessen werden. Zum anderen bezieht der hybride Ansatz neben Messdaten ebenfalls die berechneten Schallpegel der einzelnen Lärmquellen mit ein. Als dritte Option wird der wissenschaftliche Weg beschrieben, der anhand von Berechnungen den Lärm ermittelt. Zusätzlich werden die Auswirkungen einzelner Parameter (z.B. Geschwindigkeit, Flughöhe, Anflugphase) auf den Bodenlärm näher betrachtet und verglichen. Für die Evaluierung des Tools werden dem berechneten Bodenlärm Messdaten gegenüber gestellt.

3.3 Die Visualisierung von Flugbahnen

Eurocontrol und die Universität Linköping - Air Traffic Visualization 3D
2003 entstand der Artikel [25], der sich hauptsächlich mit der Darstellung mehrerer Flugbahnen beschäftigt und die Präsentation der zahlreichen Informationen organisiert. In Echtzeit werden Daten des Flugverkehrsmanagements visualisiert und stehen zur Manipulation Fluglotsen zur Verfügung. Als wichtigstes Kriterium wird hier eine einfache und übersichtliche Handhabung der Szene verlangt. Trotzdem ist es substanziell, dem Nutzer alle Informationen zu präsentieren, ohne dass dieser zwischen mehreren Ansichten wechseln muss.

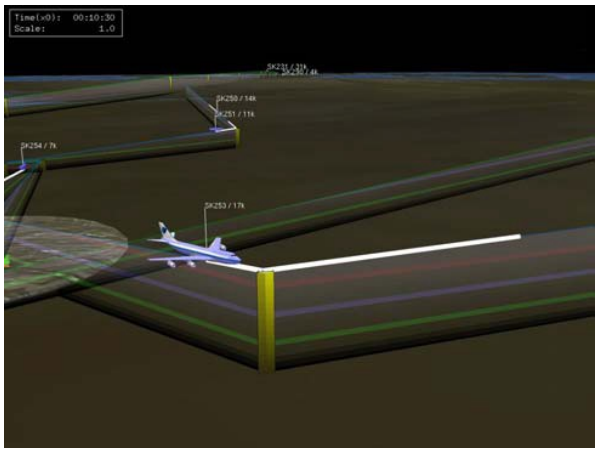

Abbildung 3.3: Screenshot mit Flugzeugmodellen und Flugpfadinformation des „Air Traffic Visualization 3D“, 2003 [25].

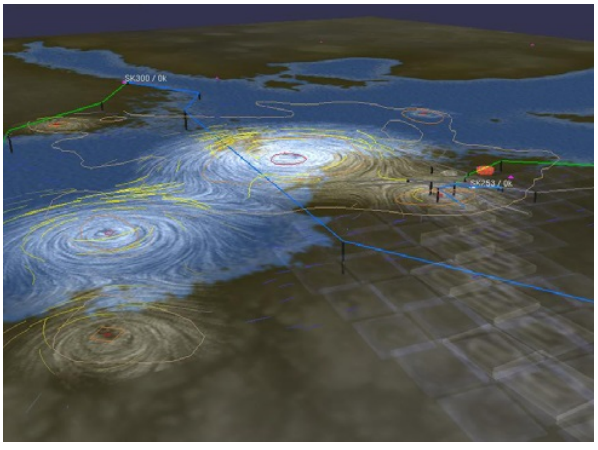

Abbildung 3.4: Meteorologische Informationen in „Air Traffic Visualization 3D“ für Fluglotsen eingebunden, 2003 [25].

Dazu werden die Daten aufgeteilt in eine Flugzeugbeschriftung und ein zusätzliches Display, um die Informationsmenge zu bewältigen (siehe Abbildung 3.3). Außerdem kann sprachlich interagiert werden, um beispielsweise Wegpunkte hinzuzufügen oder zu ändern. Geographische sowie meteorologische Angaben sind ebenfalls in der dreidimensionalen Welt eingefügt (siehe Abbildung 3.4).

Das Projekt wurde seit 2001 in Zusammenarbeit von Eurocontrol und der Linköping Universität bearbeitet. Die Entwicklung der Software dauerte neun Jahre an und steht als „Air Traffic Visualization 3D“ zur Verfügung. Nach verschiedenen Optimierungen der Darstellungskomponenten, wurde die Software zur Einschätzung von Fehlerquellen bei Fluglotsen sowie zum Training dieser eingesetzt (siehe Abbildung 3.5) [26].

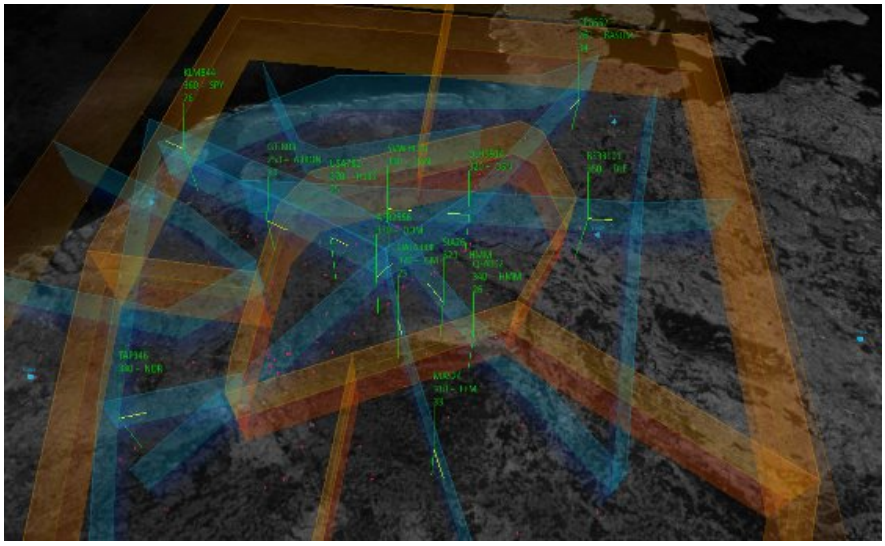

Abbildung 3.5: „Air Traffic Visualization 3D“ für das Training von Fluglotsen, 2010.

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften - AirTraffic

Albert Steiner entwickelte 2010 eine dreidimensionale Echtzeit-Visualisierung von Flugverkehrsdaten basierend auf Google Earth. [27] war Teil des Projektes „AirTraffic“ an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften. Alle Flüge um den Flughafen Zürich werden in Echtzeit angezeigt. Im Vordergrund steht die Übersicht der Daten für das Management des Flugverkehrs, um Entscheidungen dahingehend zu erleichtern. Die maßgebende Motivation dieses Projektes war eine Kostenreduktion durch eine Optimierung operationeller Maßnahmen.
Für den Empfang der benötigten Flugtransponderdaten wird eine Antenne genutzt, die auf dem

Dach der Hochschule montiert ist. Zusätzlich werden weitere Informationen über die Flüge aus dem Internet bezogen. Mittels der Daten werden Flugpfade generiert, indem durch eine Interpolation gleichmäßige Pfadlinien konstruiert werden. Diese sind nach den Altitude-Werten farbkodiert (siehe Abbildung 3.6).

Die einzelnen Komponenten der Visualisierung werden im KML-Format (Keyhole Markup Language) gespeichert, dadurch können wahlweise alle Flugdaten für eine spätere Analyse hinterlegt und in Google Earth aufgerufen werden [27][28].

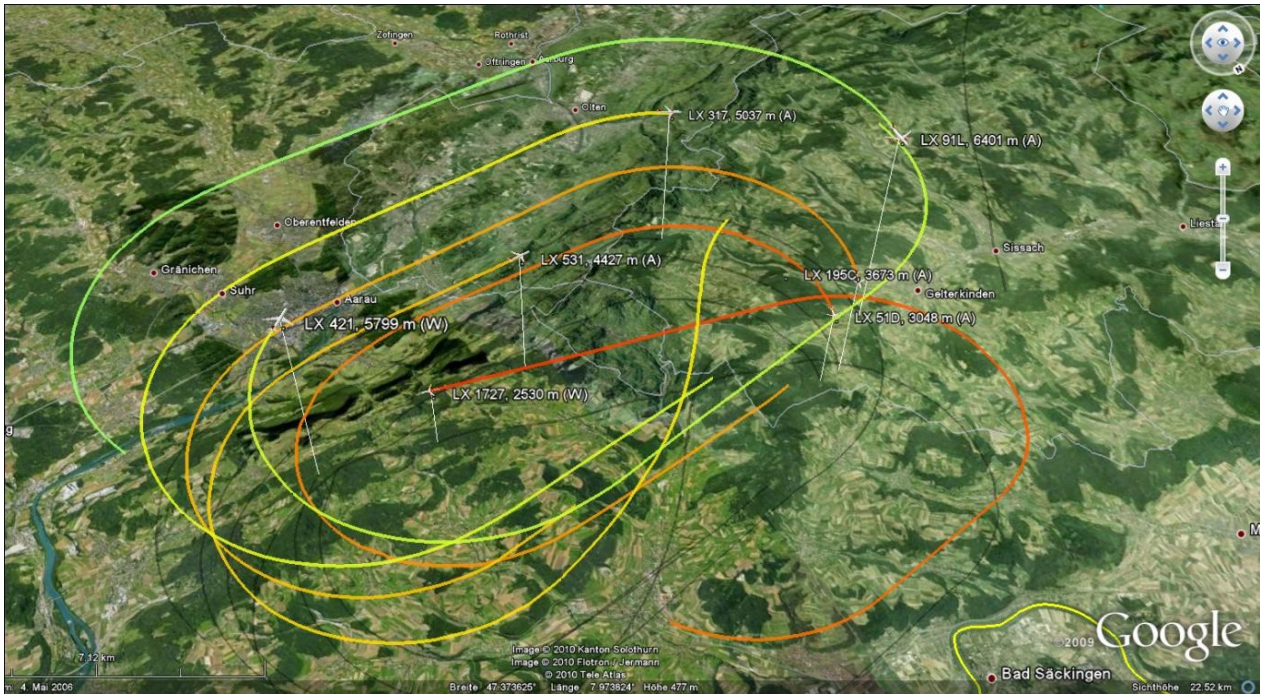

Abbildung 3.6: Screenshot „AirTraffic“, nach Altitude farbkodierte Fluglinie von Albert Steiner in GE, 2010 [27].

Universität Rowan und Federal Aviation Administration - FliteViz4D

[29] von Crowell, Fabian und Nelson umfasst eine vierdimensionale Darstellung verschiedener Flugpfade um einen oder mehrere Flughäfen. Mit unterschiedlichen Komponenten, wie beispielsweise einem zeitlichen Regler, einer Flugzeugbeschriftung und auf den Grund projizierte Routen, wird dem Benutzer das Flugszenario übersichtlich präsentiert. Die Bundesluftfahrtbehörde der Vereinigten Staaten (Federal Aviation Administration) entwickelte die Open Source Software zusammen mit der Universität Rowan von 2005 bis 2012.

Hinter dem Namen FliteViz4D („Flexible Flight Traffic Exploration Visualization 4D“, Abbildung

3.7) steht ein vielseitiges Tool, dessen Kernelement, mit allen notwendigen Funktionen, durch Plugins beliebig erweiterbar ist.

Für die Visualisierung der Flugbahn hat der Benutzer zahlreiche Auswahlmöglichkeiten. Es können beispielsweise statistische Daten, Konflikte zwischen zwei Flügen sowie Thermiken in Ampelfarben zur Beurteilung der Strecke angezeigt werden. Zur Orientierung steht eine dreidimensionale Kamera zur Verfügung, die teilweise auf Google Earth basiert und sich auf jedes Flugzeug positionieren lässt.

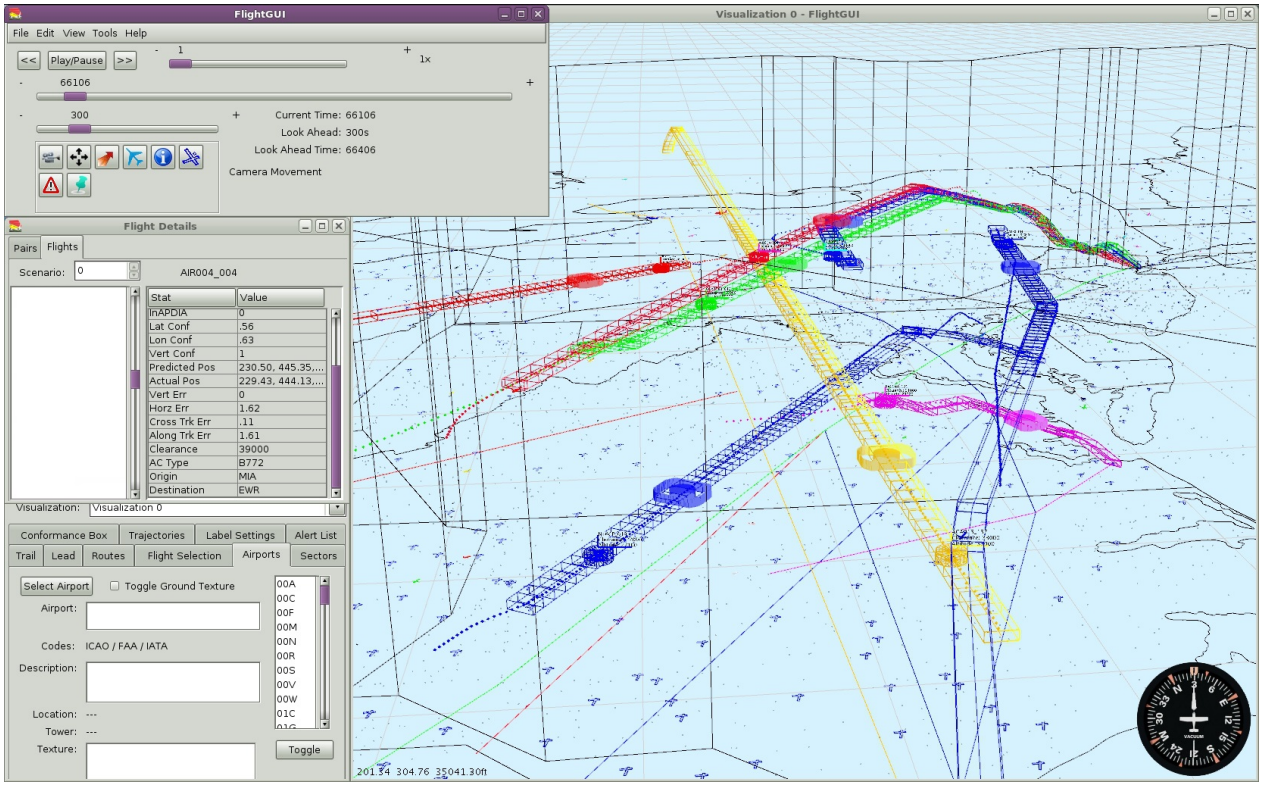

Abbildung 3.7: Screenshot aus FliteViz4D mit Zeitschieber, Flugdetails und den Einstellmöglichkeiten der Visualisierung für die Interaktion des Benutzers links, Darstellung Flugpfade rechts [29].

Der Benutzer kann entscheiden, welche Funktionen ein- bzw. ausgeblendet werden. Dadurch ist das Tool für verschiedene Anwendungen nutzbar. Hauptsächlich soll es bei der Entwicklung neuer oder verbesserter Konzepte in Bezug auf den Flugverkehr eingesetzt werden, um die Effizienz und Sicherheit des U.S.-amerikanischen Flugraums zu optimieren. Zudem bietet die Software die Möglichkeit einer nachträglichen Analyse des Luftverkehrs.

3.4 Die Visualisierung der Lärmemission eines Anflugs

Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium - FANOMOS

Das niederländische Zentrum für Luft- und Raumfahrt (NLR) entwickelte vor mehreren Jahrzehnten das Flugspurenaufzeichnungssystem „Flight Track and Aircraft Noise Monitoring System“, kurz FANOMOS. Darin werden vielfältige Informationen aus der Umgebung eines Flughafens in einer zweidimensionalen Karte zusammengefasst (siehe Abbildung 3.8) [30]. Neben Schalldruckpegeln können auch andere Daten, wie beispielsweise die Dichte der Flugrouten farbkodiert ausgegeben werden [31].

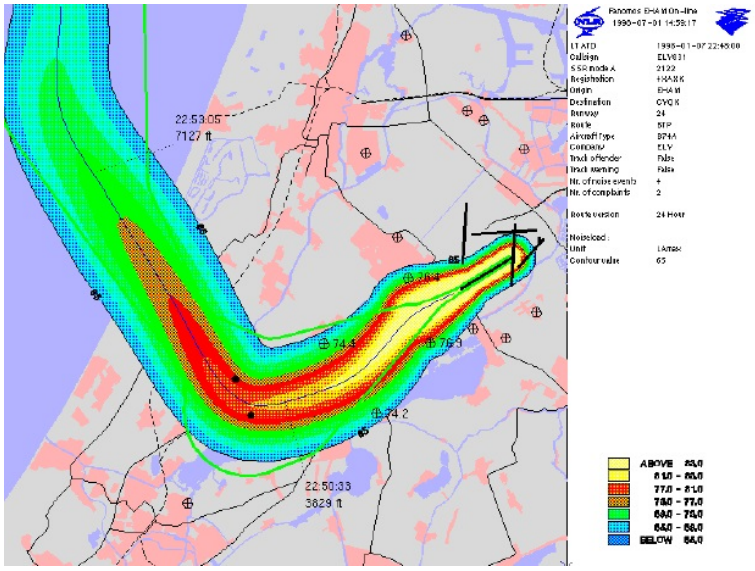

Abbildung 3.8: Datenausgabe von FANOMOS als Lärmteppich zur Beurteilung der Lärmsituation im Umfeld von Flughäfen 1998 [30].

Um Angaben über die Lärmbelastung aufzustellen, werden Umwelteinflüsse erhoben. Die Basis dabei bilden meteorologische Werte, Lärmmessungen sowie rückverfolgte Flüge und deren Identifikation. Des Weiteren werden eingehende Klagen über Fluglärm von Anwohnern ebenfalls einbezogen und fließen in die Darstellung mit ein. Diese Informationen sollen als Grundlage für die Aufstellung zukünftiger Flugpläne sowie Flughäfen dienen. Zusätzlich soll mit Hilfe der Anwendung überprüft werden, ob vorgeschriebene Flugrouten eingehalten werden [30].

FANOMOS wird weltweit eingesetzt. Die Deutsche Flugsicherung nutzt die Software seit 1988

für die Planung und Analyse mehrerer Flughäfen. In Verbindung mit „Stanly Track“, einer Anwendung die Flugplaninformationen liefert, stehen die Daten mehrerer deutscher Flughäfen für jeden online zur Verfügung (siehe Abbildung 3.9) [31].

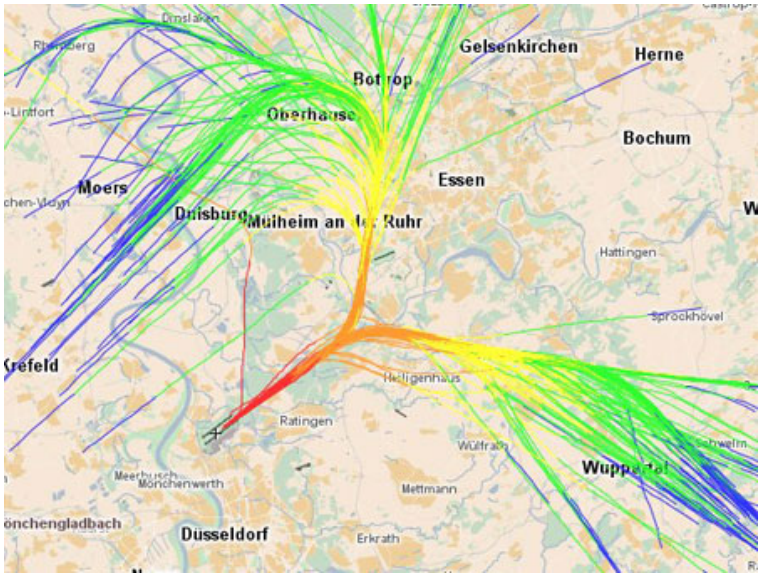

Abbildung 3.9: Flugverläufe am Düsseldorfer Flughafen nach Höhe farbkodiert [32].

Die Tageszeitung taz - Fluglärmkarte BER

Die Erstellung einer Fluglärmkarte und die damit verbundenen Probleme werden in der Arbeit von Gregor Aisch und Lorenz Matzat in [33] von 2013 vorgestellt. Der Schwerpunkt dieses Projekts liegt bei der Lärmbelastung des zukünftigen Flughafens Berlin Brandenburg und deren Visualisierung für die Internetseite der Tageszeitung (taz). Das Ergebnis der Arbeit ist online auf [34] einzusehen. Dort steht eine Karte zur Verfügung, welche die zu erwartenden Schallpegel veranschaulicht. Darin werden zweidimensional die geplanten Flugrouten sowie eine kalkulierte Lärmkarte präsentiert (siehe Abbildung 3.10).

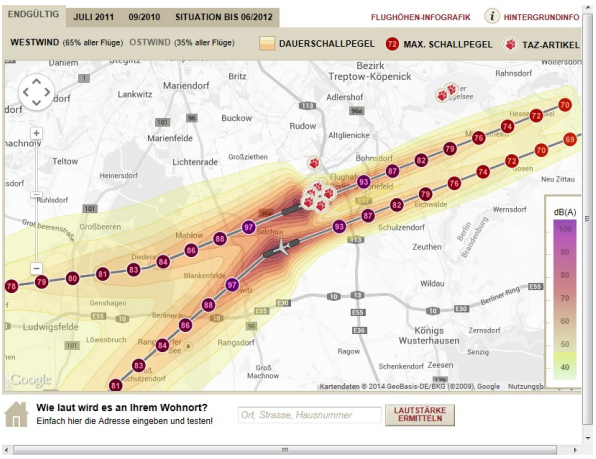

Abbildung 3.10: Screenshot der Fluglärmkarte auf taz.de mit numerischen Maximalpegeln und interaktiver Farbskala in Legende [34].

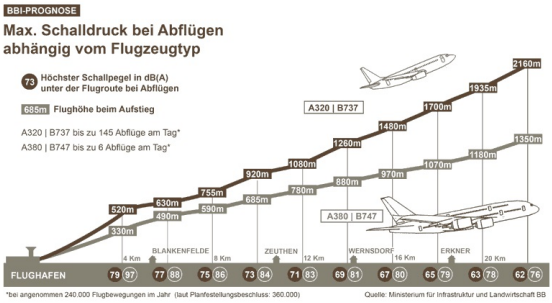

Abbildung 3.11: Höhengrafik der Fluglärmkarte in zweiter Ansicht der Anwendung zur Verdeutlichung der dritten Dimension [34].

Bei der Entwicklung der Software wurden einige Schwierigkeiten der Thematik sichtbar. Dazu zählt beispielsweise die große Anzahl an Faktoren, die bei der Berechnung der Lärmemission einzelner Flugzeuge beachtet werden muss. Folglich stieg der Arbeitsaufwand exzessiv und erforderte den Verzicht auf eine dynamische Darstellung der Szene.

Zudem ist für die Leser des Internetportals ein schneller Überblick der Daten erforderlich. Aus diesem Grund musste die Komplexität der Visualisierung für eine leichte Bedienbarkeit reduziert werden. Somit wurde die dritte Dimension verworfen und lediglich anhand einer zweidimensionalen Grafik in einer zusätzlichen Ansicht verdeutlicht (siehe Abbildung 3.11). Das Ablesen der Schalldruckpegel für eine gewünschte Position wird vereinfacht, indem die farbkodierten Flächen transparent gezeichnet sind. Liegt der Mauszeiger über der Lärmkarte, zeigt die Legende der Farbwerte den genauen dB(A)-Wert an der Mausposition an. Zusätzlich kann für eine eingegebene Adresse der Schalldruckpegel ermittelt werden.

Im Ausblick der Arbeit wird eine dreidimensionale Erweiterung von Lärmkarten in Form von „Lärmbergen“ diskutiert. Die Autoren sind der Meinung, dass eine Visualisierung in Google Earth die Daten besser veranschaulichen würde.

3.5 Vor- und Nachteile genannter Visualisierungen

In Tabelle 3.1 sind die Stärken und Defizite der oben genannten Arbeiten aus den Sektionen 3.3 und 3.4 über die Visualisierung von Lärm bzw. Flugrouten zusammengefasst. Die Gegen-

überstellung soll eine Übersicht wichtiger Aspekte bei derartigen Darstellungen bieten.

VISUALISIERUNG	STÄRKEN	DEFIZITE
Air Traffic Visualization 3D	- Management vieler Informationen (z.B. Flight of Interest, Flugzeugbeschriftung, farbkodierte Flugzeuge)	- Mehrfache Überschneidungen vieler oranger und blauer Flächenverläufe
Air Traffic	- Terrain - Höhe der Flugbahn verdeutlicht (Schatten auf Grund, orthogonale Linie zu Boden) - Speicherung KML-Format (nachträgliche Analyse)	
FliteViz4D	- Routen auf Grund projiziert - Zeitschieber - Interaktion bei Anzeige von Elementen	- Zufällige Farbwahl der Flugzeuge/Flugbahnen - Schwerer geographischer Überblick
FANOMOS	- Sehr viele Informationen fließen in Berechnungen ein	- Geografischer Verlauf unter Lärmkonturen nicht sichtbar (Version 1989)
Fluglärmkarte BER	- Transparente Lärmkarte - Interaktive Legende - Maximalschalldruckpegel direkt an Flugroute angezeigt	- Infografik in 2. Ansicht

Tabelle 3.1: Vergleich der Visualisierungen aus aktuellen Forschungen.

Bei der Visualisierung von Flugbahnen gibt es vielfältige Möglichkeiten die Datenmengen dem Benutzer zu präsentieren. Es muss eine Lösung gefunden werden, die alle notwendigen Informationen anzeigt und dennoch eine leichte Übersicht ermöglicht.
Numerische Werte vereinfachen die Einschätzung der Schalldruckpegel, wie beispielsweise die Maximalpegel in der „Fluglärmkarte BER“. Zusätzlich werden die Höhenangaben anhand eines fixen Bildes verdeutlicht, um die Informationsmenge zu reduzieren. Durch eine Interaktion mit dem Nutzer bei der Mausbewegung über die Karte wird das Verständnis der Daten ebenfalls erleichtert. Wenn hingegen eine detailliertere Analyse der Flugroute gewünscht ist, erschwert das Wechseln der Ansichten eine Einschätzung des Pfades.

Ein Vorteil der Fluglärmkarte sind die transparenten Flächen zwischen den Isolinien. Durch eine ungünstige Wahl der Visualisierungsmethoden können wichtige Daten verdeckt werden. Eine frühe Version des Systems „FANOMOS“ gibt beispielsweise eine komplett opake Lärmkarte aus, die geografische Daten unkenntlich macht (z.B. die Lage und Größe von Städten) und somit eine Einschätzung der Lärmbelastung von Anwohnern erschwert.
Die Software „FliteViz4D“ vergibt an die einzelnen Flugzeuge zufällige Farben, „Air Traffic Visualization 3D“ hingegen nutzt diese Eigenschaft zur zusätzlichen Informationskodierung. Je nach Anwendung sollten Potenziale zur Datenvisualisierung genutzt werden, um eine überschauliche Darstellung zu gewährleisten. Die Höhe kann wie in „Air Traffic“ von Albert Steiner durch auf den Grund projizierte Schatten und/oder orthogonale Linien zum Boden verdeutlicht werden. FliteViz4D schafft durch einen Timeslider eine vierte Dimension, in der der zeitliche Verlauf des Szenarios durchlaufen werden kann. Der Benutzer kann entscheiden, welche Elemente ihm angezeigt werden sollen, um eine zu große Informationsmenge zu reduzieren.

Im folgenden Kapitel wird die Anwendung FlightPathNoiseVisualizer (FPNV) vorgestellt, die in dieser Arbeit entstanden ist. Der Unterschied aller bisher genannten Arbeiten zu dieser Fluglärmvisualisierung ist ein Bezug zu nahegelegenen Wohngebieten. Keines der Projekte weist direkt auf angrenzende Siedlungen hin. Zudem stützen sich die meisten Visualisierungen bezüglich des Lärms auf Messdaten, anstatt auf Berechnungen.

Kapitel 4

Visualisierung gekrümmter Anflüge

Der FPNV unterstützt den Benutzer nach der Eingabe verschiedener Parameter bei der kombinierten Visualisierung eines gekrümmten Anflugpfades und dessen Lärmemission am Boden. In diesem Abschnitt wird nach der Beschreibung der Aufgabenstellung und des Arbeitsablaufs die Anwendung FPNV und deren einzelne Komponenten, die Benutzeroberfläche und die Flugpfad- sowie Flughafenvisualisierung, vorgestellt. Der Schwerpunkt Lärmvisualisierung wird in Kapitel fünf betrachtet.

4.1 Aufgabenstellung

Für den Entwurf eines gekrümmten Anflugs auf einen beliebigen Flughafen soll im Rahmen der Masterarbeit eine Software entwickelt werden, die dem Benutzer den gewünschten Anflugpfad visualisiert. Eine Eingabe aller benötigten Parameter in die Benutzeroberfläche ermöglicht die Datenverarbeitung und -präsentation in Google Earth.
Neben der Angabe eines Flughafens, soll der FPNV die Möglichkeit bieten, eine Datenbank gewünschter Flughäfen in Form einer Textdatei zu verwalten. Der Inhalt der Datei fasst deren Identifikationsschlüssel, die Landebahnen sowie die genauen Koordinaten zusammen.
Die Konstruktion der Flugroute wird durch die Auswahl einer der drei Anflugarten RNAV, RNP oder GBAS bestimmt. Diese soll mittels der Definition einzelner Wegpunkte von der Landebahnschwelle aus zusammengestellt werden.
Nach dem Starten der Visualisierung, wird der ausgewählte Flugpfad nach den Standards der

Luftfahrt zusammen mit dem Zielflughafen angezeigt. Um eine spätere Analyse des Anflugs zu ermöglichen, werden alle Daten gespeichert. Für die Umsetzung steht die Anwendung Qt Creator in Verbindung mit Google Earth zur Verfügung.
Einen Fortschritt bezüglich bisheriger Arbeiten bildet eine Erweiterung durch die Darstellung der Lärmbelastung auf anliegende Gebiete. Dafür sollen verschiedene Ansätze entwickelt und verglichen werden. Für eine Einschätzung des resultierenden Lärms sollen angrenzende Wohngebiete erkannt und hervorgehoben werden.

4.2 Benutzeroberfläche

Der FPNV öffnet beim Start eine graphische Benutzeroberfläche, in die alle notwendigen Daten für den Entwurf eines Anflugpfads eingegeben werden können.

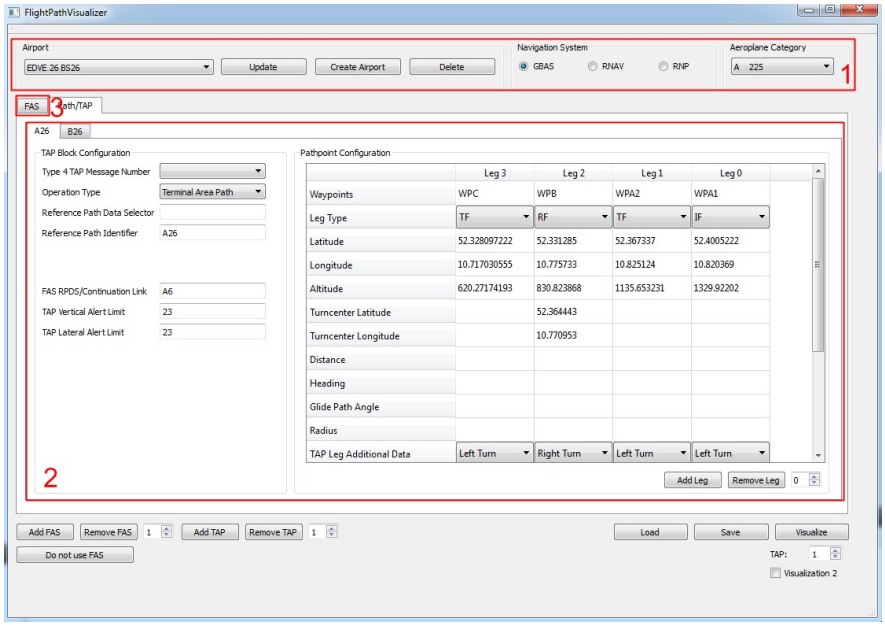

Abbildung 4.1: Benutzeroberfläche des FPNV mit geöffnetem Reiter für die Pfadeingabe und der in rot markierten Dreiteilung für die Dateneingabe.

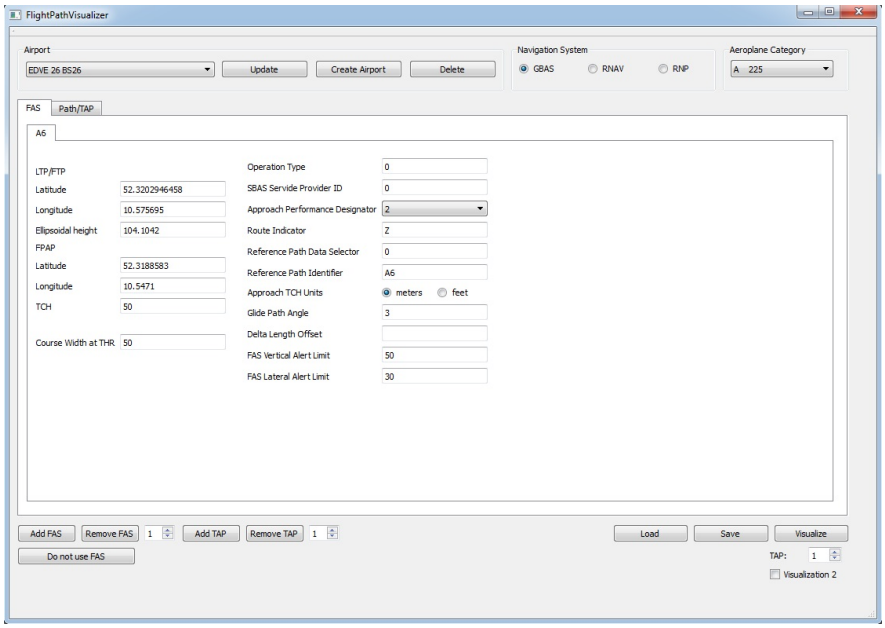

Abbildung 4.2: Benutzeroberfläche des FPNV mit geöffnetem Reiter des FAS-Block.

Für die Eingabe der Parameter teilt sich die Oberfläche in drei Bereiche (siehe Abbildung 4.1) – allgemeine Informationen (1), Angaben zu Pfaden bzw. TAPs (2) und gegebenenfalls Daten für FAS-Blöcke (bei der Angabe eines GBAS-basierten Navigationsverfahren) (3 – siehe Abbildung 4.2).

Der obere Teil beinhaltet die Verwaltung gewünschter Flughäfen (siehe Kapitel 4.5), die separat in einem zweiten Fenster angelegt werden können. Außerdem kann die Anflugart und die Flugzeugkategorie, zur Einschätzung der Lärmemission des Flugzeugs, eingestellt werden. Für die Festlegung der Anflugart stehen drei Systeme zur Auswahl - GBAS, RNAV und RNP. Der Aufbau des Pfad- und FAS-Reiter ist abhängig von der Auswahl dieser. Ein GBAS-basierter Anflug teilt den Pfad in TAP- und FAS-Block ein. Die anderen beiden Optionen bieten lediglich die Möglichkeit zur Eingabe eines Pfades. Dazu wird der FAS-Reiter deaktiviert und somit unzugänglich. Außerdem werden RNAV und RNP Anflüge als Pfad statt TAP bezeichnet. Bei der Eingabe eines RNAV-Anfluges sind keine RF in der Segmentfolge zulässig.

Angaben zum allgemeinen Pfad sind im zweiten Bereich zu finden. Für die Visualisierung wichtig sind die Wegpunkte, die durch ihre Koordinaten den Verlauf der Flugbahn angeben, und deren Legtypen. Eine Tabelle fasst die Konfiguration des Pfads zusammen. Wegpunkte können als geographische Koordinate oder in Distanz, Richtung und GPA angegeben werden.

Steht die Auswahl des Anflugverfahrens auf GBAS, können in einem zweiten Reiter die FAS-Blöcke definiert werden. Darin werden beispielsweise die Koordinaten der Landebahn (LTP/FTP und FPAP) angegeben. Existiert kein FAS-Block trotz der Angabe eines GBAS-Anflugs, werden die Landeschwellen des gewählten Flughafens als Ziel des Anflugs genutzt und mit einer Landegeraden von 23 nautischen Meilen markiert.
Bei beiden Reitern können mehrere Pfadabschnitte angegeben und kombiniert visualisiert werden. Zudem können wichtige Daten zu den Anflügen, die für die Visualisierung unbedeutend sind, in die Oberfläche eingegeben und gespeichert werden.
Alle Informationen zu den Anflügen können mit Hilfe der unteren Schaltflächen geladen und gespeichert werden. Der „Visualize“-Button startet den Visualisierungsprozess nach einer Prüfung der Datenvollständigkeit und öffnet Google Earth mit den KML-Dateien, die bei der Verarbeitung erzeugt werden.
Zu Veranschaulichung der Datenorganisation für die Benutzeroberfläche des FPNV ist in Abbildung 4.3 ein Klassendiagramm dazu dargestellt.

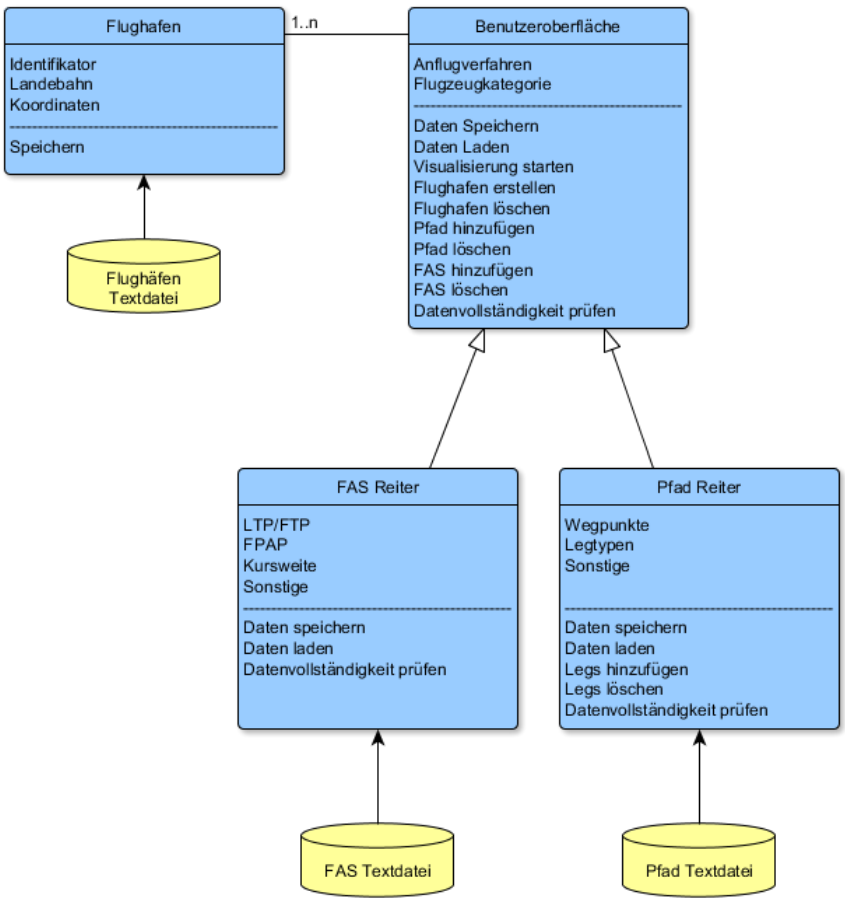

Abbildung 4.3: Klassendiagramm zur Organisation der Benutzeroberfläche.

4.3 Arbeitsablauf

Um einen Überblick über den Arbeitsablauf zu vermitteln, ist die sequenzielle Struktur des FPNV in Grafik 4.4 schematisch dargestellt. Für alle Komponenten, die in dieser Sektion genannt werden, folgt eine nähere Beschreibung in den folgenden Abschnitten dieses und des nächsten Kapitels.

Wenn alle benötigten Parameter vollständig sind, wird zuerst der Anflugpfad interpoliert, um anschließend den Zielflughafen zu berechnen. Unabhängig von der Wahl der Visualisierungsmethode werden in der nahen Umgebung der Flugroute alle Städte und Orte aus einer Datenbank gefiltert. Das weitere Vorgehen ist abhängig von dem Visualisierungswunsch des Benutzers. Zur Darstellung der Lärmemission eines Anflugs gibt es zwei Auswahlmöglichkeiten. Op-

tion eins stellt mittels einer generierten Distanzkarte und dem Marching Squares Algorithmus eine Lärmkarte auf. Als zweite Variante können alle gefilterten Wohngebiete anhand größenabhängiger Kreise dargestellt werden, die farblich nach der Höhe des Schalldruckpegels kodiert sind.

Der Visualisierungsprozess endet mit der Erstellung von KML-Dateien mit allen verarbeiteten Daten. Das Dateiformat KML ist XML-basiert und steht für die Organisation geografischer Daten zur Verfügung [35]. GE kann diese Dateien verarbeiten und fügt die Informationen in eine Visualisierung der Welt ein.

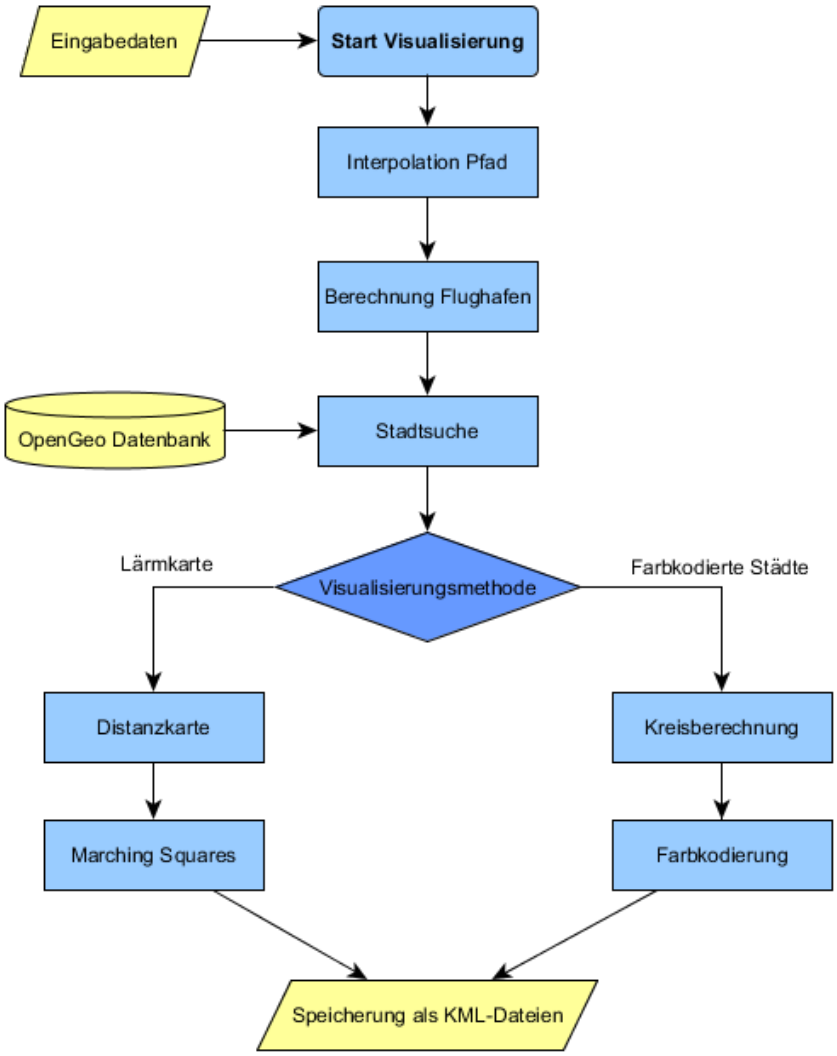

Abbildung 4.4: Ablaufdiagramm des FPNV.

Es wird die Software GE verwendet, da diese viele hilfreiche Funktionen bietet. Das Tool enthält eine realistische, dreidimensionale Welt. Darin können verschiedene Datenmengen mit Hilfe vielseitiger Elemente, wie Pfade oder Bildüberblendungen, angezeigt werden. Die Speicherung im KML-Format hat zum Vorteil, dass die generierten Objekte jederzeit aufrufbar sind und sich mit den Lärmelementen anderer Flugbahnen zum Vergleich überlappen lassen. Außerdem ist eine Kamera implementiert, die gewünschte Ansichten durch Drehen und Zoomen bietet. Bei der Betrachtung der angezeigten Daten, sind alle Komponenten optional und können ein- bzw. ausgeblendet werden. Dazu gehören nicht nur die geometrischen Formen, sondern auch geografische Merkmale, wie Grenzen oder Orte.
Für die nähere Betrachtung eines Pfades kann dessen Höhenprofil angezeigt und mit Hilfe eines Zeigers beliebige Teilabschnitte bzw. Punkte untersucht werden. Dazu können Informationen wie die maximale Steigung oder die Höhendifferenz eingesehen werden. Als zusätzliches Werkzeug kann in Google Earth ein Pfad abgeflogen werden, indem die Kamera automatisch den Pfadpunkten folgt. Zudem bietet eine Lineal-Funktion die Möglichkeit, Distanzen zweier Punkte zu messen und die Orientierung beliebiger Strecken zu ermitteln.[1]

4.4 Visualisierung Anflugpfad

Die realistische Darstellung eines Anflugpfades in GE erleichtert den Entwurf neuer Anflugrouten. Diese bestehen aus verschiedenen Komponenten, die zusammengefügt eine geschlossene Pfadlinie ergeben. Durch eine Interpolation zwischen den angegebenen geographischen Positionen wird der Pfad erzeugt. Dazu werden die Koordinaten der Wegpunkte sowie deren jeweiliger Legtyp (IF, TF oder RF) benötigt.
Der Startpunkt ist der IF, von dem aus ein gerades oder ein gekrümmtes Pfadstück zum nächsten Wegpunkt generiert wird. Handelt es sich um einen TF, wird zwischen dem aktuellen und dem vorhergehenden Wegpunkt auf der direkten Verbindungsstrecke interpoliert. Um die Position eines Interpolationspunktes zu ermitteln wird ein lokales Koordinatensystem genutzt (siehe Abbildung 4.5). In dessen Ursprung ist der letzte Wegpunkt bzw. der zuletzt erzeugte Punkt.

[1] Weitere Informationen stehen auf der Internetseite von Google Earth zur Verfügung [www.google.de/intl/de/earth/].

Die Y-Achse liegt auf der zu interpolierenden Geraden und der gesuchte Punkt (in der Grafik blau dargestellt) befindet sich mit dem Abstand i auf der Y-Achse. Das heißt, der Y-Wert des Ausgangspunkts muss mit i summiert werden. Um äquidistante Punkte zu generieren, soll i immer den gleichen Wert beibehalten. Dieses Verfahren wird wiederholt, bis der nächste Wegpunkt erreicht ist.

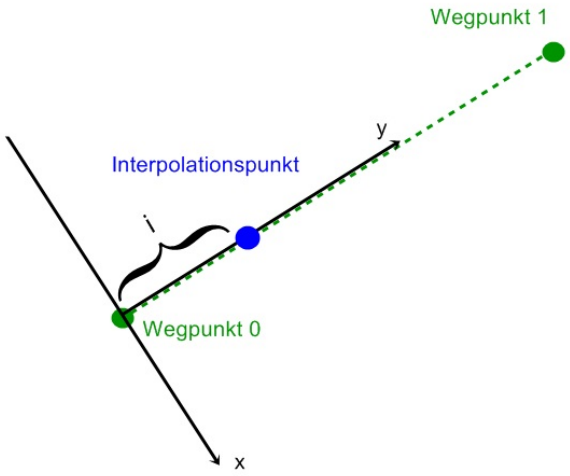

Abbildung 4.5: Berechnung eines Interpolationspunktes im Abstand i zur Erzeugung der Pfadlinie.

Bei einem RF wird der gekrümmte Teilpfad generiert, indem auf einem Kreissegment interpoliert wird. Für die Kreisberechnung werden der Kreismittelpunkt (Drehzentrum) sowie die zwei Wegpunkte, die den Segmentabschnitt bestimmen, herangezogen.

Bei der Visualisierung des Anflugpfades wird der IF mit einem ultramarinblauen Stern und der Wegpunktbezeichnung gekennzeichnet. Alle kalkulierten Interpolationspunkte sind durch eine ebenfalls ultramarinblaue Linie verbunden. Diese Farbe hebt sich besonders gut von den ampelfarbenen Lärmelementen ab, die in Kapitel 5.2 näher erläutert werden. Alle Wegpunkte (ausgenommen der IF) sind mit ihrer jeweiligen Bezeichnung und einem weißen Diamant markiert. Die Höhe des Pfades wird durch senkrechte Linien zum Grund verdeutlicht (siehe Abbildung 4.6). Für eine genauere Analyse der Altitude-Werte kann die in Google Earth vorhandene Funktion ‚Höhenprofil' genutzt werden (siehe Abbildung 4.7).

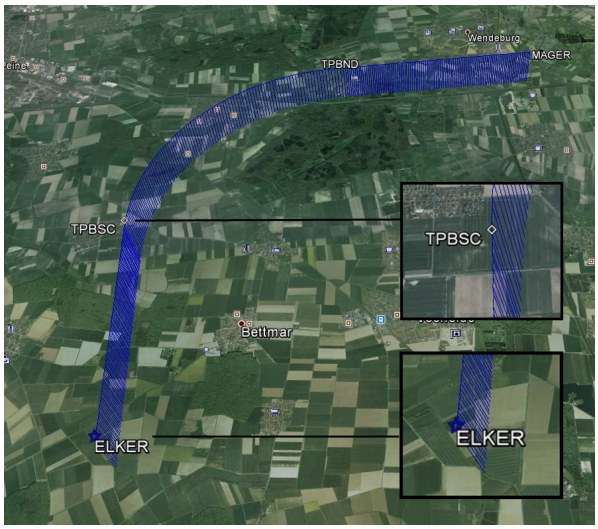

Abbildung 4.6: Visualisierung Pfad mit Wegpunktbezeichnung, IF als „ELKER“ und TF als „TPBSC“ in GE.

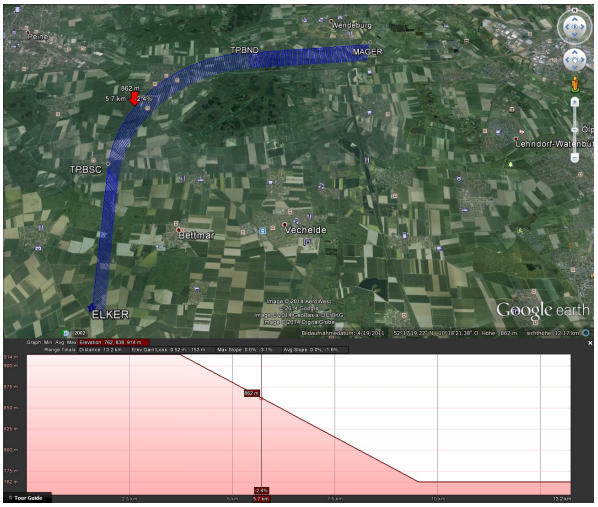

Abbildung 4.7: Visualisierter Pfad mit Höhenprofil in GE zur Analyse des Altitude-Verlaufs.

Existiert ein Fas-Block wird dieses Pfadsegment hellblau dargestellt, um ihn von dem TAP-Block zu unterscheiden (siehe Abbildung 4.9).

4.5 Visualisierung Flughafen

Das Ziel eines jeden Anflugs ist ein Flughafen, deshalb wird dieser bei der Visualisierung gekennzeichnet. Jede Landebahn kann je nach Windrichtung von zwei Richtungen angeflogen werden. Diese ist klar definiert, indem die entsprechende Ausrichtung zwischen null und 360 Grad angegeben wird. Zusätzlich werden zwei geographische Koordinaten für die genaue Position aufgeführt. Zum einen die ‚Threshold Coordinate‘ (THRC), die den Beginn der Landebahn markiert, und zum anderen die THRC der gleichen Landebahn aus der entgegengesetzten Richtung (eTHRC), die somit das Ende kennzeichnet (siehe Abbildung 4.8).

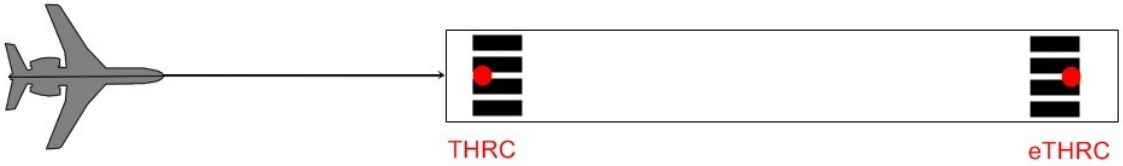

Abbildung 4.8: Landebahn mit THRC und Endpunkt eTHRC [36].

Die Kursweite gibt die zulässige laterale Abweichung des Anflugs an. Orthogonal vom THRC werden in negativer und positiver Richtung zwei Punkte im Abstand der Kursweite berechnet. Kombiniert mit dem Ende der Landebahn kann ein Dreieck berechnet werden, das den Flughafen trichterförmig markiert, wie in Abbildung 4.9 und 4.10 zu sehen. Bei RNAV und RNP Anflügen wird keine Kursweite angegeben, deshalb wird von einem Standardwert von 2.5° zwischen der eTHRC und der jeweiligen Dreiecksseite ausgegangen.

Abbildung 4.9: Flugpfad in Richtung Flughafen, der mit einem Dreieck zur Orientierung markiert wird in GE.

Abbildung 4.10: Flughafen Braunschweig: Dreieck um THRC +/- Kursweite und eTHRC an Landebahn in GE.

Zur Speicherung aller Daten wird der Identifiziercode des Flughafens verwendet, dieser ist eine vierstellige Buchstabenkombination. Da die Datenmenge überschaubar ist, werden Textdateien als Datenbank genutzt. Darin sind alle Pfad-/TAP- und FAS-Informationen einer Landebahnschwelle aufgelistet. Pro Flughafen wird ein Ordner erstellt, in dem neben den Pfaddaten die KML-Dateien generiert werden.

Mit diesem Kapitel sind alle Komponenten der Flugbahnvisualisierung im FPNV beschrieben worden. Im folgenden Abschnitt werden die Berechnung und Darstellung von Fluglärm erklärt.

Kapitel 5

Visualisierung Lärm

Für die Darstellung der Lärmbelastung der Anwohner in der Umgebung einer entworfenen Flugroute, berechnet der FPNV die dort zu erwartenden Schalldruckpegel unter vereinfachten Annahmen. Die Visualisierung dieser Daten soll eine Unterstützung bei der schnellen Erkennung stark belasteter Wohngebiete darstellen.
In diesem Kapitel wird die Berechnung von Fluglärm näher erläutert, auf der die Software FPNV basiert. Für die Visualisierung der Schalldruckpegel eines Anflugs wurden zwei Methoden entwickelt, die einzeln in den Sektionen 5.2.1 und 5.2.2 vorgestellt werden.

5.1 Berechnung von Lärm

Eine Vorhersage eines Lärmszenarios bei einem Anflug ermöglicht die Einschätzung der Belastung von Anwohnern des Zielflughafens. Um die Realität nachbilden zu können, verlangt die Berechnung von Fluglärm sehr viele Faktoren. Dazu gehören beispielsweise [5] [24]:

- Fluggeschwindigkeit
- Alter der Maschine
- Flugzeugtyp
  - Gewicht

  - Turbinen

- Meteorologische Daten (beeinflussen Triebwerksleistung/Flugzeuglage etc.)

  - meteorologiebedingte Dämpfungseffekte: Brechung, Streuung, Bildung akustischer Schattenzonen
  - Wind
  - Luftdruck
  - Temperatur
  - Turbulenzen

- Position des Fahrwerks/der Spoiler/der Landeklappen
- Zeitlicher Verlauf
- Lastvielfaches bei Kurvenflügen
- Lage des Flugzeugs zum Boden
- Abweichungen der Flugstrecke (Bildung von Korridoren)
- Richtwirkung durch Bewegung
- Ausstrahlcharakteristik des Lärms (abhängig von einzelnen Lärmquellen am Flugzeug)
- Boden-/Geländedämpfung

Ein Bezug zu allen Faktoren würde den Rahmen der Arbeit überschreiten. Deshalb wurden vereinfachte Annahmen getroffen. Der FPNV ignoriert meteorologische Daten, da diese für eine allgemeine Einschätzung nicht relevant sind. Veränderungen der Lärmquelle beispielsweise durch das Ausfahren des Fahrwerks, der Spoiler oder Landeklappen werden in dieser Arbeit nicht näher untersucht, da keine Optimierungen an dem Ablauf dieser Geschwindigkeitsreduktion vorgenommen werden sollen. Faktoren wie Geschwindigkeit, Bodendämpfung oder Lastvielfaches bei Kurvenflügen werden ebenfalls ignoriert. Es wird die Annahme getroffen, dass ein durchschnittliches Flugzeug bei einer Landung einen Schalldruckpegel gleichmäßig als kugelförmige Quelle ausstrahlt. Der Flugzeugtyp wird bei der Implementation aufgrund

fehlender Lärmemissionsdaten vernachlässigt. Dieser Aspekt sollte aber nachträglich noch betrachtet werden, da der Schalldruckpegel der Lärmquelle von der Größe des Flugzeugmodells erheblich beeinflusst wird. (Die entsprechende Auswahl der Flugzeugtypen ist in der Benutzeroberfläche bereits implementiert.)

Ein gebräuchliches Mittelstreckenflugzeugmodell ist der A320 von Airbus, der 2013 im Durchschnitt pro Monat 42-mal produziert wurde. Somit ist Airbus an der Spitze der Flugzeughersteller. Direkt dahinter befindet sich Boeing mit 38 Flugzeugen des Modells 737. Die Flotte der Boeing 737-600/700/800/900 hatte 4 236 Maschinen im Jahr 2013 in Betrieb [37]. Um einen durchschnittlichen Wert bei den Visualisierungen des FPNV zu verwenden, stehen die Daten einer Boeing 737-76J/W[1] zur Verfügung. Das DLR hat mit dieser Maschine Lärmmessungen durchgeführt und dabei einen maximalen Schalldruckpegel von 72 dB(A) in einer Entfernung von 576.5 Meter zum Flugzeug aufgezeichnet. Unter Nutzung der Formel 5.1 (Erläuterung folgt im nächsten Abschnitt) zur Berechnung der Differenz von Schalldruckpegeln bezüglich einer vorgegebener Distanz, hat die B737 einen Ausgangspegel von 127.2 dB(A). Dieser Wert bezieht sich auf einen Meter Abstand zum Flugzeug und ist unter Ausschluss vieler Faktoren bei der Lärmberechnung entstanden. In allen folgenden Visualisierungen der Lärmemission eines Anflugs wird 127,2 dB(A) als maßgebender Durchschnittswert der Kugellärmquelle angenommen.

Zu Beginn der Berechnung einer Fluglärmkarte muss eine Farbskala aufgestellt werden, indem die Grenzwerte einer Einteilung der Schalldruckpegel definiert werden. Der FPNV berechnet die Schalldruckpegel L der Umgebung des Flugpfads und klassifiziert alle Werte anhand vorgegebener Schwellenwerte.
Für die Berechnung von L an einem Immissionsort I wird die Slant Distance s, der kürzeste Vorbeiflugabstand, betrachtet (siehe Grafik 5.2 in Abschnitt „Ansatz 1 - Translation der Wegpunkte“). Der Pfadpunkt der Flugroute, der am nächsten am Immissionsort I liegt, hat den größten Einfluss auf diesen und wird somit ausschließlich betrachtet. Um L für I zu erhalten, muss der zwanzigfache dekadische Logarithmus des Verhältnisses eines bekannten Schalldrucks

[1] Registrierung: D-ABLD, Air Berlin, Baujahr: 2008

in Abstand s' zu einem Bezugsschalldruck in Abstand s_{ref} gebildet werden:

$$\Delta L = \text{-}\ 20 \cdot log_{10}(\frac{\widetilde{p}}{p_{ref}}) \tag{5.1}$$

[24]

s	Abstand zur Lärmquelle
s'	aktueller Abstand (von I zur Lärmquelle)
s_{ref}	Referenzabstand

ΔL ist die Differenz der Schalldruckpegel zwischen s' und s_{ref}.
Durch die logarithmische Kurve ändert sich mit steigendem Abstand der Schallquelle zum Immissionsort der Pegel pro Längeneinheit weniger. Bei einer Entfernung von einem Meter, mit 127.2 dB(A) als Referenz und einer Entfernung von 500 Metern, lässt sich die folgende Differenz des Schalldruckpegels wie folgt berechnen:

$$20 \cdot log_{10}(\tfrac{500}{1}) = -\,53.9794\ .$$

Somit ergibt sich bei einer Entfernung von 500 Meter zum Flugzeug ein Wert von 73.22 dB(A). Diese Formel ist für alle Lärmquellen gleich [24]. Wird die Formel umgestellt, ergibt sie den Abstand s' zur Lärmquelle, bei einem vorgegebenen Schalldruckpegel:

$$\text{s'} = 10^{(\frac{\Delta L}{20})} \cdot\ s_{ref} \tag{5.2}$$

Anhand dieser Formel konnte die Tabelle 5.1 aufgestellt werden, die für die Unterteilung der Lärmschwellen ausschlaggebend ist. Zusätzlich ist in der rechten Spalte das Empfinden eines solchen Schalls beschrieben, um die Werte nachvollziehen zu können.

Entfernung	dB(A)	Empfinden [38]
2.29 m	120	Trillerpfeife an Ohr (Schmerzschwelle)
22.91 m	100	Presslufthammer 10m entfernt (Schwelle Unwohlsein)
72.44 m	90	Handschleifgerät
229.09 m	80	Starker Straßenverkehr
724.44 m	70	Haartrockner
2 290.87 m	60	Rasenmäher (Stressgrenze)
7 244.36 m	50	Vogelgezwitscher im Freien
12 882.50 m	45	Obere zulässige Grenze der Tagesgeräusche in Wohngebieten
22 909.00 m	40	Lern- und Konzentrationsstörungen möglich

Tabelle 5.1: Mögliche Schwellwerte für die Einteilung der Skala der Schalldruckpegel.

Für die Visualisierung des FPNV muss eine Farbskala erstellt werden, nach der eine Einteilung der Schalldruckpegel erfolgt. Für die Einteilung der Bereiche gleicher Intensität zwischen den Isolinien einer Lärmkarte wird häufig eine Skala in Ampelfarben genutzt, um die Stärke der Belastung zu verdeutlichen. Rottöne stehen für eine hohe Lärmimmission, während grün auf geringe Werte hinweist. Viele Farbskalen aus dem Alltag beruhen auf diesem System, beispielsweise bei der Einordnung elektrischer Geräte in eine Energieeffizienz-Klasse oder bei der Markierung von Kraftfahrzeugen bezüglich ihrer Schadstoffgruppe, und sind daher den Benutzern vertraut. Dieses Konzept wurde für den FPNV übernommen. Tabelle 5.2 zeigt die Werte der festgelegten Grenzen.

Farbe	Dezibel
Rot	> 80
Orange	70 - 79
Gelb	60 - 69
Hellgrün	50 - 59
Dunkelgrün	40 - 49

Tabelle 5.2: Einteilung der Farbskala des FPNV zur Einschätzung der Schalldruckpegel.

Ein Flugzeug, das sich bei einer Landung mit einem Gleitpfadwinkel von drei Grad fortbewegt, erreicht 13.8 Kilometer vor der Landebahnschwelle eine Höhe von 724 Meter und somit einen Schalldruckpegel von über 80 dB(A) am Boden. Dieser Wert steigt stark auf dem letzten

Abschnitt des Flugpfades und ist deshalb rot markiert. Alle Anwohner in diesem Bereich sind einem zu hohen Lärmpegel ausgesetzt. Eine weitere Einteilung dieser Region ist möglich aber wenig sinnvoll. Die Intervalle sind bezüglich des Schalldruckpegels äquidistant, um eine Interpretation der Daten zu erleichtern. Tagsüber sollten 60 dB(A) nicht überschritten werden, um Anwohner vor persistentem Stress zu schonen [39]. Dieser Schwellenwert bildet den Mittelwert der Farbskala. Die Nacht-Schutzzone darf laut dem ‚Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm' keine Pegel über 50 dB(A) erreichen [39]. Da ab 40 dB(A) Konzentrationsschwächen bei Schulkindern ausgelöst werden können, ist dieser Wert die untere Grenze der Skala.

Nach der Aufstellung der Schwellenwerte zur Abgrenzung der Landschaften nach Lärmimmissionsgrad, müssen die Daten dem Benutzer intuitiv präsentiert werden. Dazu muss die Umgebung des Anflugpfads farblich klassifiziert und markiert werden.

5.2 Darstellung von Lärm

Die zwei wichtigsten Aspekte bei einer Visualisierung der Lärmemission eines Flugpfades sind:

- Welche Wohngebiete sind vom Fluglärm betroffen?
- Welcher Schalldruckpegel erreicht die einzelnen Siedlungen?

Auf diese zwei Fragestellungen konzentrieren sich die beiden ausgearbeiteten Varianten der Visualisierung. Es soll sofort ersichtlich sein, wo Wohngebiete liegen und welchem Schalldruckpegel diese ausgesetzt sind. Die erste Variante projiziert eine zweidimensionale Lärmkarte auf den Grund und markiert alle nahgelegenen Siedlungen durch eine Ortsmarkierung („Placemark"). Die zweite Methode verbindet diese beiden Informationen und zeigt den zu erwartenden Lärm der einzelnen Städte an. Im Folgenden werden beide Visualisierungsarten näher erklärt.

5.2.1 Methode 1 - Zweidimensionale Lärmkarte

Eine Lärmkarte kennzeichnet durch beliebig viele Isolinien Positionen mit gleichem Schalldruckpegel. Dadurch wird die Ausbreitung des Lärms verdeutlicht und eine schnelle Einschätzung des Szenarios ermöglicht. Das Konzept der Lärmkartierung wurde auf die Landschaft um

den Anflugpfad übertragen (siehe Abbildung 5.1). Speziell bei Fluglärm wird eine derartige Visualisierung als Lärmteppich bezeichnet.

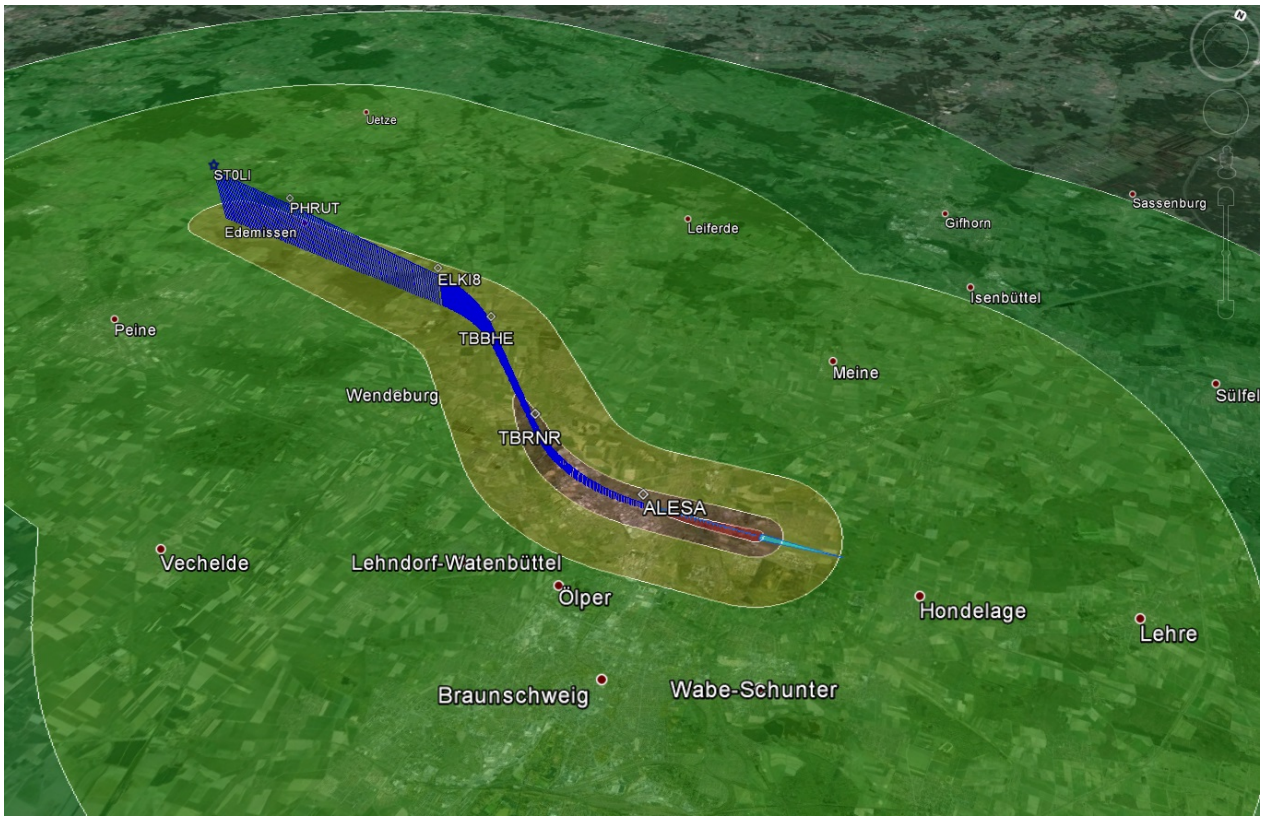

Abbildung 5.1: Zweidimensionale Lärmkarte auf den Boden um einen Flugpfad projiziert, in GE.

Die Lärmkarte ist aufgrund einer einfachen Übersichtlichkeit lediglich auf zwei Dimensionen beschränkt, da eine dreidimensionale Darstellung den intuitiven Eindruck minderte. Als Projektion auf den Boden der Umgebung besitzt die Karte eine Höhe von null Meter über dem Grund.
Für die Realisierung dieser Methode wurden verschiedene Ansätze verfolgt, die nachfolgend einzeln beschrieben werden.

Ansatz 1 - Translation der Wegpunkte

Vorwissen über verschiedene Aspekte des Flugpfades erleichtert die genaue Berechnung der Lärmkonturen. Es ist bekannt, dass alle Punkte einer Isolinie den gleichen Abstand zum jeweils

nächsten Punkt des Flugpfades besitzen und dass sich der Pfad aus Strecken und Kreissegmenten zusammensetzt. Dadurch ist es möglich, Punkte der Isolinie anhand der vorgegebenen Wegpunkte zu errechnen und durch gerade oder gekrümmte Segmente zu verbinden. Durch die Annahme einer Kugelquelle mit einer gleichmäßigen Ausbreitung des Lärms kann diese Vereinfachung getroffen werden.

Zu Beginn werden alle Wegpunkte auf den Grund projiziert, das heißt die z-Koordinate (der Altitude-Wert) wird auf null gesetzt. Anschließend werden pro Wegpunkt jeweils zwei geographische Koordinaten orthogonal zum Flugpfad berechnet, welche die vorgegebene Distanz w aufweisen (siehe Grafik 5.2). Dabei handelt es sich um den Abstand des Immissionsortes I zu dem auf den Grund projizierten Flugpfad.

$$w = \sqrt{(h^2 - s^2)} \tag{5.3}$$

Mit Hilfe eines lokalen Koordinatensystems, bei dem sich der Wegpunkt im Ursprung befindet und die X-Achse an der Orientierung des Pfads ausgerichtet ist, ergibt eine Verschiebung des Wegpunktes in positiver und negativer Y-Richtung zwei Punkte der Isolinie (siehe rote Punkte in Grafik 5.3).

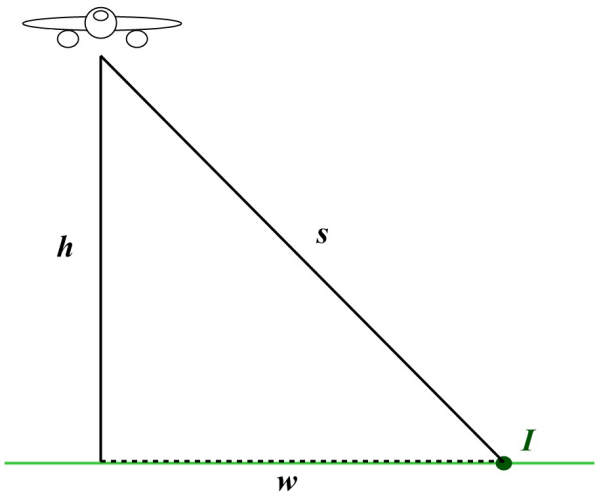

Abbildung 5.2: Die Höhe des Flugpfads h und die vorgegebene Distanz s zum Immissionsort ergeben über den Satz des Pythagoras den Abstand w zum Flugpfad am Boden.

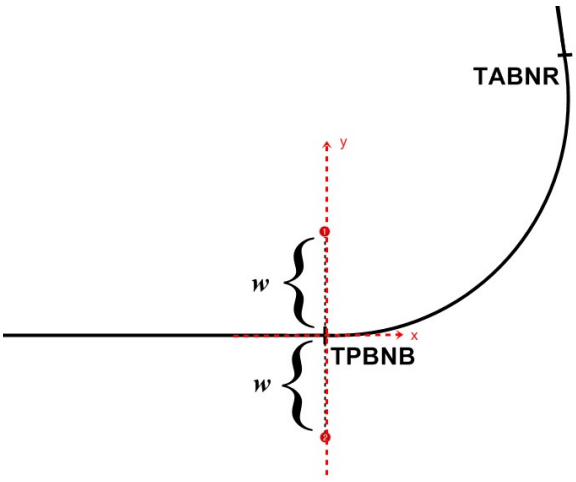

Abbildung 5.3: Draufsicht auf Flugpfad, Wegpunkt „TPBNB“ mit orthogonalen Punkten im Abstand w auf lokalem Koordinatensystem.

Somit werden [2 · (Anzahl der Wegpunkte)] Punkte berechnet, die auf der Isolinie liegen. Zum

Verbinden der Punkte gibt es drei Möglichkeiten. Handelt es sich bei dem Segment zwischen den Wegpunkten um ein TF, verbindet eine gerade Linie die berechneten Punkte. Ein RF erfordert ein Kreissegment, dessen Drehzentrum gleich dem des jeweiligen Wegpunkts ist. Bei einem IF sowie dem letzten Wegpunkt der Sequenz werden die zwei generierten Punkte mit Hilfe eines Halbkreises, dessen Drehzentrum der IF bzw. der letzte Wegpunkt ist, verbunden. Dadurch entsteht eine Kontur um die Flugbahn, wie in Abbildung 5.4 zu sehen.

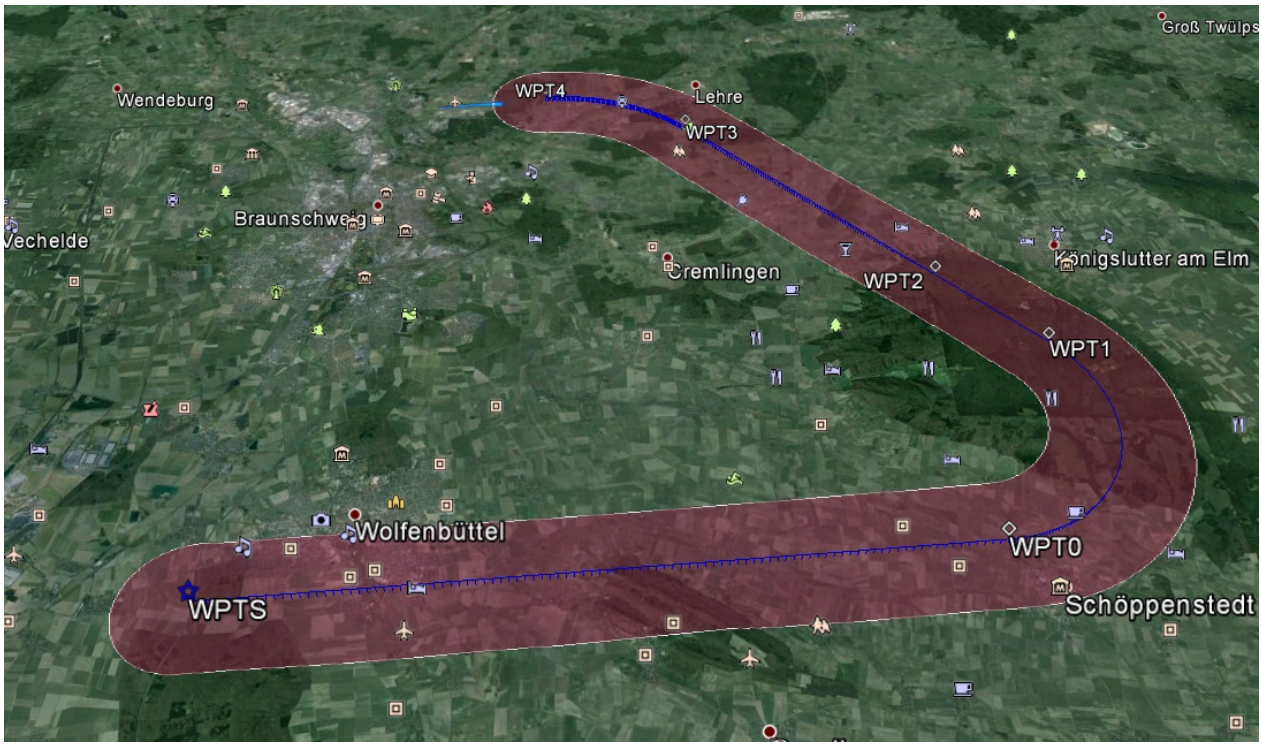

Abbildung 5.4: Lärmkontur eines Flugpfads durch die Translation der Wegpunkte, in GE.

Der Nachteil bei diesem Ansatz wird bei Isolinien deutlich, die weiter vom Flugpfad entfernt sind. Dadurch schneiden sich die Konturen und sind nicht mehr trivial zu verbinden.
Um die Schnittpunkte zu ermitteln, können die einzelnen Segmente gleichgesetzt und auf gemeinsame Punkte getestet werden. Dazu müssen, je nach Kombination, Kreise bzw. Strecken untereinander oder ein Kreis mit einer Strecke verglichen werden. Sind Schnittpunkte vorhanden muss überprüft werden, ob diese in beiden Segmentabschnitten liegen.
Anschließend muss eine Entscheidung getroffen werden, welches Segment weiter verfolgt wird. Das Verfahren „Kontur Tracing“ löst dieses Problem. Der Startpunkt des Algorithmus ist der Konturpunkt mit der höchsten Latitude und der niedrigsten Longitude. Es werden alle Segmente in

der korrekten Reihenfolge abgelaufen. Dazu wird jedes Segment mit allen noch nicht getesteten Abschnitten auf einen Schnittpunkt überprüft. Bei einer Überschneidung wird mit dem äußeren Segment ab dem Schnittpunkt fortgefahren. Ob eine Kontur innen oder außen verläuft kann durch einen Vergleich der Winkel ermittelt werden. Mit diesem Verfahren wird die komplette Kontur der Segmentmenge ermittelt.

Probleme bei diesem Ansatz bereiten unzählige Sonderfälle, die das vermeintlich triviale Verfahren kompliziert gestalten. Zum Beispiel kann bei einer extremen Krümmung des Flugpfads, dieser über sich selbst verlaufen, sodass Löcher entstehen. Diese werden nicht erkannt, da lediglich die äußere Kontur betrachtet wird. Außerdem ist diese Lösung für eine Änderung des Lärmberechnungsverfahren nicht geeignet, da eine Grundvoraussetzung die gleichmäßige Lärmausbreitung ist. Dies macht den Ansatz unflexibel und bei späteren Änderungen unbrauchbar. Deshalb wurde eine zweite Variante zur Erstellung einer Lärmkarte in Betracht gezogen.

Ansatz 2 - Marching Squares

Für die Berechnung der Isolinien wird eine farbkodierte Distanzkarte generiert, die mit Hilfe des Marching Squares Algorithmus zugehörige Punkte extrahiert.
Zu Beginn wird ein Gitter mit einem Ausmaß von 23.5 Kilometern in alle vier Himmelsrichtungen um den jeweiligen Pfad gelegt. Die Grenze der äußeren Isolinie liegt bei 40 dB und somit bei einer Entfernung von 22.9 Kilometer. Um eine zusätzliche Randbehandlung zu umgehen, wurde das Gitter um 600 Meter erweitert. Der Abstand der Gitterknoten untereinander liegt bei circa 150 Meter und stellt einen Kompromiss zwischen Laufzeit und Genauigkeit dar.
Die Knoten des Gitters bilden ein Skalarfeld, in dem die kürzeste euklidische Distanz d (Formel 5.4) zum Flugpfad gespeichert ist.

$$d = \sqrt{(\mathrm{P1}_x - \mathrm{P2}_x)^2 + (\mathrm{P1}_y - \mathrm{P2}_y)^2 + (\mathrm{P1}_z - \mathrm{P2}_z)^2} \tag{5.4}$$

Neben dem Abstand wird zusätzlich die zugehörige Farbe der Lärmkarte für jeden Knoten ge-

speichert. Ist die Distanzkarte vollständig, können die Konturen der Isolinien berechnet werden.

Zuerst soll die äußere Isolinie ermittelt werden. Dazu wird über das Gitter mit einer Vier-Knoten-Maske iteriert, um einen Startpunkt der Kontur zu finden. Sind 2 Farbwerte der Knoten in der Maske verschieden, wird mit dem Marching Squares Algorithmus begonnen. Bei diesem Verfahren können 16 verschiedene Fälle der Vier-Knoten-Maske eintreten, die den weiteren Verlauf bestimmen (siehe Abbildung 5.5). Dunkle Eckpunkte sind innerhalb der betrachteten Isolinie, farblose Punkte liegen außerhalb dieser.

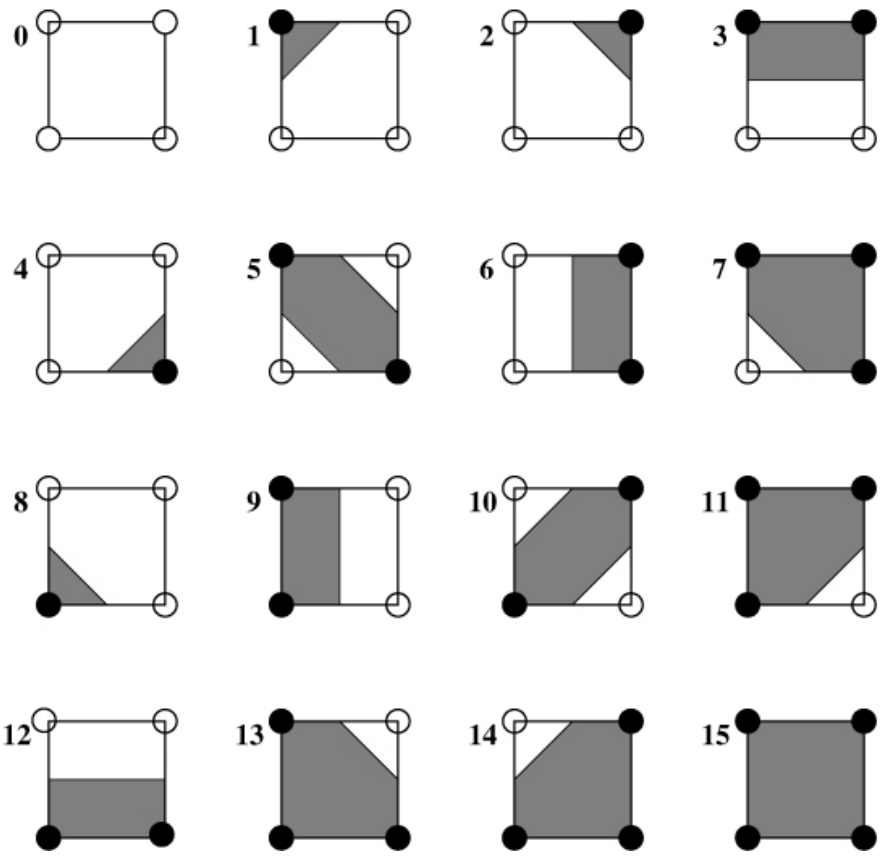

Abbildung 5.5: 16 Konfigurationen des Marching Squares Algorithmus. Dunkle Knoten liegen innerhalb der Kontur, farblose liegen außerhalb [40].

Dabei ist zu beachten, dass die Fälle 5 und 10 zweideutig sind, da die dunkel gefärbten Ecken auch getrennt werden können. Somit wird der farblose Bereich verbunden.
Ist der aktuelle Fall bestimmt, wird der nächste Pfadpunkt berechnet und die Maske folgt der weiterführenden Richtung. Diese Schritte werden wiederholt, bis der Ausgangspunkt der Kontur erreicht wird.

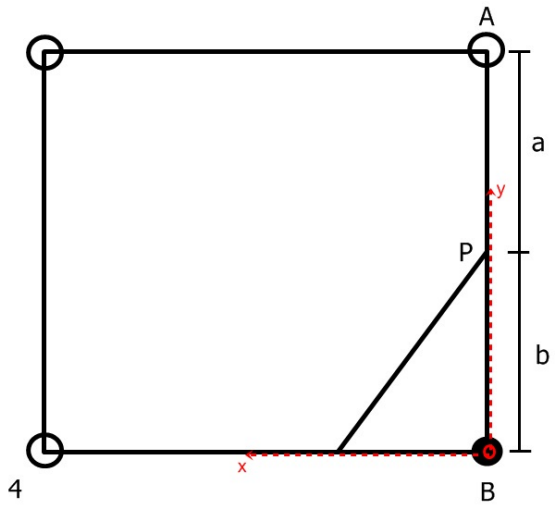

Abbildung 5.6: Fall 4 des Marching Squares Algorithmus mit einem lokalen Koordinatensystem zur Bestimmung eines Punktes der Isolinie.

Auf jeder Strecke zwischen einem weißen und einem schwarzen Eckpunkt liegt ein Punkt der Isolinie. Als Einstieg in die Kontur wird beispielsweise ein Muster wie in Fall 4 in Abbildung 5.5 detektiert. Um die genaue Position P des Isolinienpunktes wie in Abbildung 5.6 zu ermitteln, werden die Distanzwerte zum Flugpfad der Punkte A und B betrachtet und interpoliert. Der Abstand b zwischen dem schwarzen Eckpunkt B, der innerhalb der Kontur liegt, und P kann wie folgt ermittelt werden:

$$b = (a+b) \cdot \frac{(thr - d(B))}{(d(A) - d(B))} \tag{5.5}$$

a+b	Abstand der beiden Knoten A und B (abhängig von Gittergröße)
thr	Schwellenwert der Isolinie
d(X)	Minimalste Distanz von Punkt X zum Flugpfad

In einem lokalen Koordinatensystem mit dem Ursprung in B und einer Orientierung von B zu P auf der Y-Achse, ergibt sich P aus der Summe von b und dem Y-Wert von B. Durch eine Rücktransformation in geographische Koordinaten ergibt P einen Punkt auf der Isolinie und wird

zu der Pfadlinie ergänzt. Nun wird die Maske in die vorgegebene Richtung versetzt und der nächste Punkt interpoliert. Für die Wegrichtung gibt es vier Optionen - Nord, Süd, Ost oder West. Jeder der 16 Fälle bestimmt den weiteren Verlauf der Maske, da die geschlossene Kontur immer im Uhrzeigersinn umrundet wird. Bei Fall sieben werden beispielsweise die zwei nächsten Gitterpunkte in Richtung West, zusammen mit den zwei linken Knoten aus dem aktuellen Muster betrachtet. Nord und Ost werden ausgeschlossen, zumal es nicht das Ziel ist, innerhalb der Kontur zu landen (Fall 15). Da die Maske von Süden auf die aktuelle Position gewechselt hat, wird diese Richtung ebenfalls nicht in Betracht gezogen.
Dieser Vorgang wird für alle Isolinien wiederholt. Dabei werden ausschließlich die Gitterpunkte betrachtet, die innerhalb der bereits kalkulierten Isolinie liegen, da der Flugpfad zusammenhängend ist und nicht außerhalb liegen kann. Tastet die Vier-Knoten-Maske einen Wert mit einem bereits abgeschlossenem Schwellenwert ab, wurde ein Loch detektiert, dessen Kontur ebenfalls errechnet werden muss. Das Verfahren endet, sobald über alle Gitterpunkte innerhalb der äußeren Isolinie iteriert wurde.
Sobald alle Pfadlinien der Lärmkarte ermittelt wurden, werden die Daten an Google Earth übermittelt und zusammen mit der Färbung der Zwischenbereiche visualisiert. Dabei dient die bereits in Kapitel 5.1 aufgelistete Tabelle 5.2 als Grundlage für die Farbeinteilung. Um die Analyse der Daten zu erleichtern, präsentiert der FPVN dem Benutzer eine Legende wie in Abbildung 5.7 am unteren Bildschirmrand.

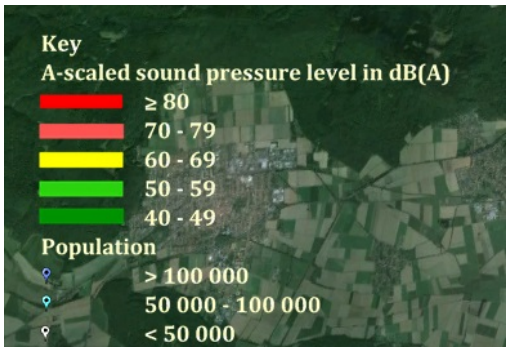

Abbildung 5.7: Die Legende der Lärmkarte mit der Farbskala der Schalldruckpegel und Markierung der Siedlungen nach Einwohnerzahl.

Die Opazität der Lärmkarte hat einen Wert von 0.3. Dadurch ist es möglich, die Stadtver-

läufe bei näherer Betrachtung zu erkennen. Trotzdem sind die Farben deutlich voneinander zu unterscheiden (siehe Abbildung 5.8).

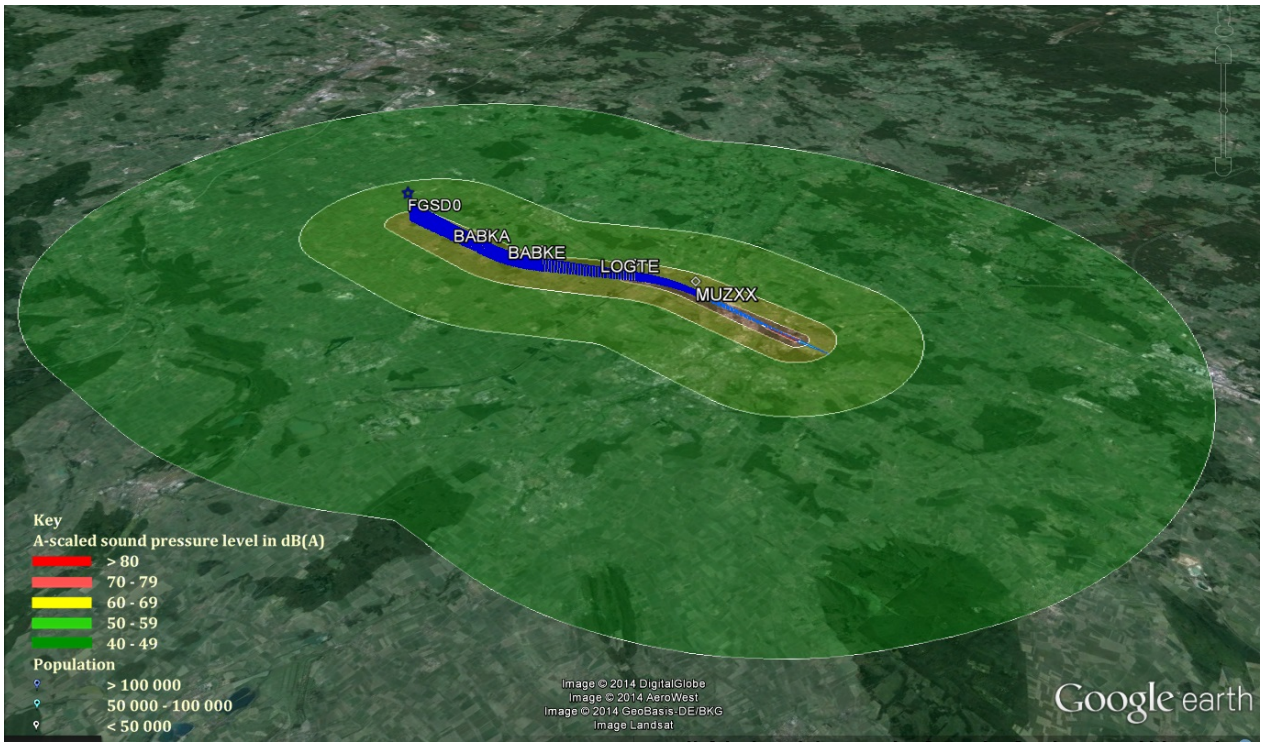

Abbildung 5.8: Die Lärmkarte der ersten Visualisierung mit allen Elementen außer den Placemarks in GE. Die Legende unten links, farbkodierte Isolinien und der TAP- und FAS-Block mit der Markierung des Flughafens.

Um die erste Methode der Lärmvisualisierung eines Anflugs zu vervollständigen, fehlt noch eine wichtige Information – die Positionen der umliegenden Wohngebiete. Dazu wird die Datenbank OpenGeoDB aller deutschen Gemeinden verwendet [12]. Darin enthalten sind Informationen wie die Position des Zentrums (Latitude und Longitude in Dezimalwerten), die Fläche und die Einwohnerzahl der Stadt. Ein Filter sucht alle Wohngebiete, die im Umkreis des Flugpfades angesiedelt sind. Dazu werden die Koordinaten der Städte mit denen des Pfades verglichen. Als Markierung wurden die in Google Earth bereit gestellten Placemarks verwendet. Dabei handelt es sich um Kennzeichen beliebiger Form und Farbe. FPNV markiert Wohngebiete anhand nadelförmiger Landmarken, deren Farbe die Bevölkerung der Stadt kodiert. Um die Varianz der dargestellten Farben gering zu halten, sind drei Abstufungen von Blautönen verwendet worden. Dunkelblau steht für Großstädte mit über 100 000 Einwohnern, Hellblau für Mittelstädte mit 50 000 bis 100 000 Einwohnern und Weiß für Kleinstädte und kleinere Gemeinden mit einer Bevölkerung unter 50 000. Die Fläche der Städte wurde ignoriert, da nicht die Größe der

Stadt, sondern die Anzahl der potenziell belasteten Anwohner bei der Lärmeinschätzung von Interesse ist.

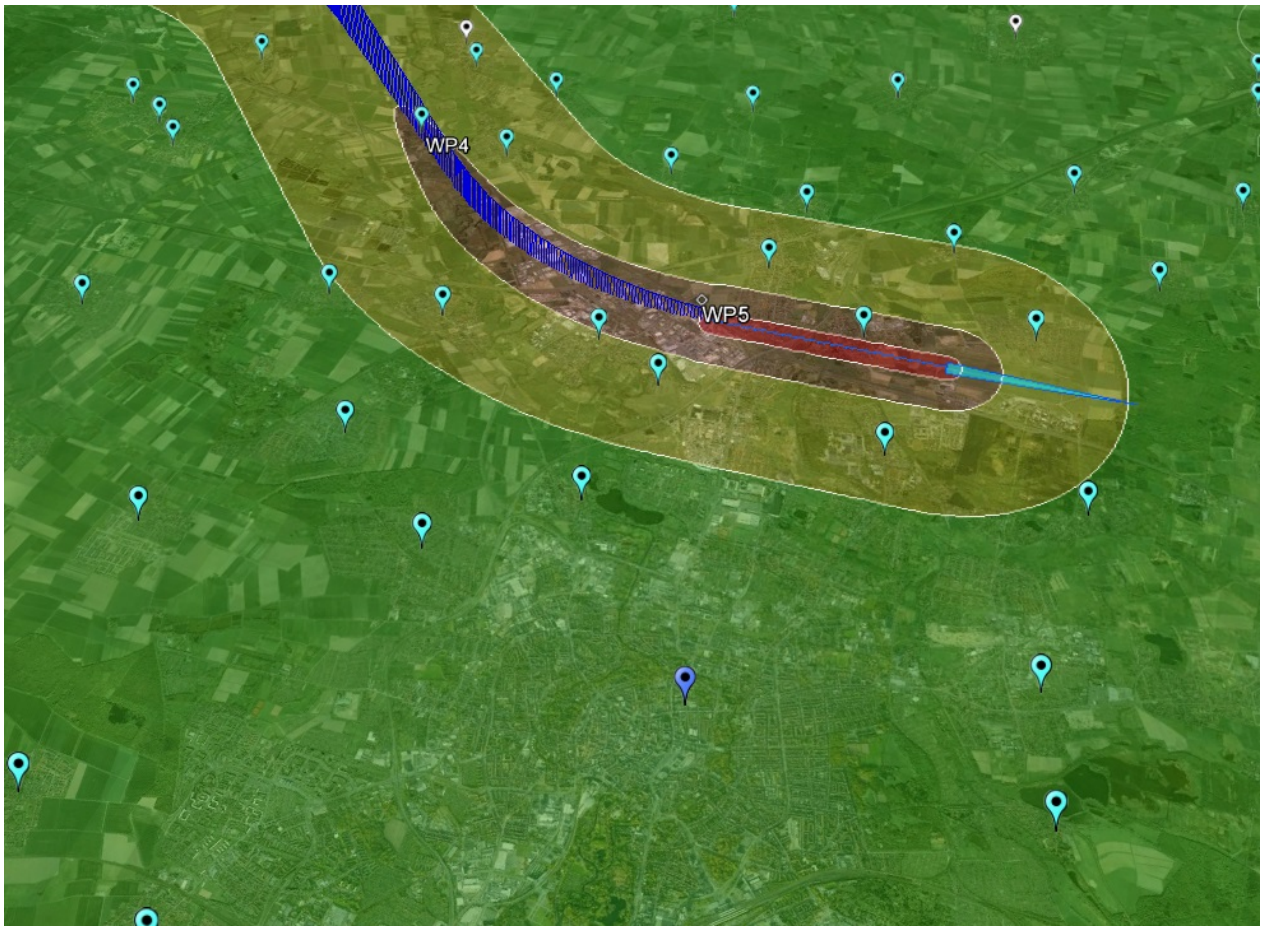

Abbildung 5.9: Die Lärmkarte der ersten Visualisierung mit allen Elementen in GE. Die Konturen der Stadt Braunschweig scheinen durch die Isolinien der Lärmkarte unter dem dunkelblauen Placemark durch.

5.2.2 Methode 2 - Farbkodierte Städte

Bei diesem Ansatz der Visualisierung werden die Informationen über die Siedlungen und deren jeweiligen Lärmpegel vereint. Eine Kreisfläche stellt über den Radius die Einwohnerzahl sowie anhand der Farbe den resultierenden Schalldruckpegel pro Stadt dar (siehe Abbildung 5.10).

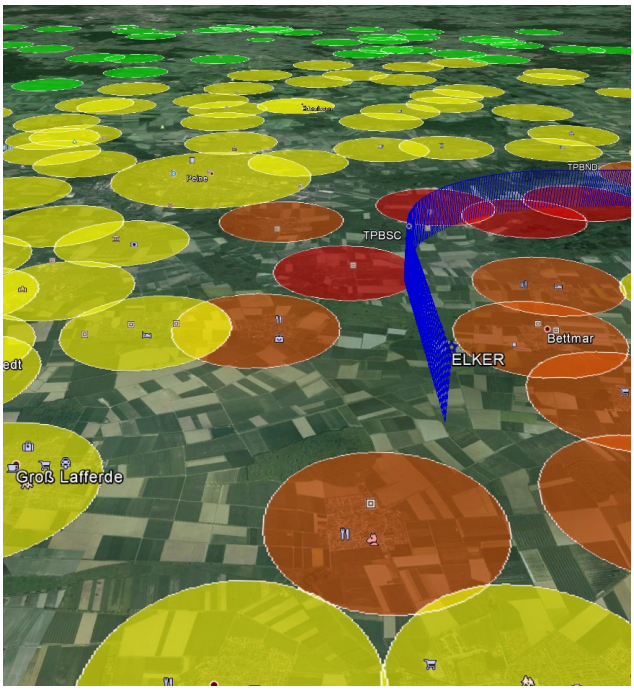

Abbildung 5.10: Farbkodierte Kreise markieren die Städte. Die Kreisgröße spiegelt die Einwohnerzahl wider.

In der Umgebung des gewünschten Anflugpfades wird nach bewohnten Gebieten gesucht, um diese für eine Einschätzung hinsichtlich ihrer Lärmbelastung hervorzuheben. Dafür werden zuerst alle Ortschaften, die sich im Umkreis von 22.09 Kilometern (Grenze zu 40 dB(A)) befinden, aus der oben genannten Datenbank gefiltert. Um den Mittelpunkt jeder Siedlung wird ein Kreis gezeichnet, dessen Radius durch die Einwohnerzahl, multipliziert mit einem Skalierungsfaktor, bestimmt wird.
Eine Alternative ist die Darstellung der Fläche der Stadt durch den Kreisradius in Kombination mit einer Beschriftung der Einwohnerzahl am Kreismittelpunkt, um eine Beurteilung über die Belastung zu präzisieren. Da diese Variante jedoch eine genaue Analyse bei der Betrachtung der Visualisierung erfordert und den intuitiven Eindruck der Szene erschwert, nutzt der FPNV ausschließlich die Einwohnerzahl als Kriterium für die Kreisgröße. Die Bevölkerungs-

dichte (mittlere Anzahl der Einwohner pro Fläche) ist nicht aussagekräftig, da die Ausdehnung der Stadt und Ansiedlung innerhalb dieser stark variieren kann [41]. Deshalb wurde auf eine Kombination aus Fläche und Einwohneranzahl zur Ermittlung des Radius verzichtet.

Die zur Verfügung stehende Datenbank weist inkonsistente Einträge auf und liefert nicht für jede Gemeinde eine Einwohnerzahl. Ist in der Datenbank kein Wert über die Bevölkerung der Stadt vorhanden, wird ein Standardwert von 75.000 Menschen[2] angenommen.
Da keine weiteren Informationen über die Ausdehnung der gefundenen Ortschaften vorliegen, wurde ein Kreis als geometrische Form gewählt. Die Koordinaten der Stadt (Latitude und Longitude als Dezimalwert) geben den Mittelpunkt des Kreises an. Jede Kreisfläche wird mit einer Farbe kodiert, abhängig von der minimalsten Entfernung zum Anflugpfad und der somit resultierenden Lärmbelastung. Die Skala der Farbtöne wird zur Kodierung der Schalldruckpegel wie bei der ersten Visualisierung eingeteilt (siehe Tabelle 5.2).
Die Farbgebung kann anhand der euklidischen Distanz von dem Mittelpunkt der Stadt zum nächsten Punkt der Pfadlinie bestimmt werden. Optional kann die Entfernung auch von dem Kreispunkt, der dem Flugpfad am nächsten ist, berechnet werden. Somit wird der Maximalwert präsentiert. Eine zweite Alternative überprüft mittels mehrerer Referenzpunkte innerhalb des Kreises die Distanz zum Anflugpfad. Werden mehrere Intervalle der eingeteilten Schalldruckpegel ermittelt, wird die Farbe des Lärmpegels gewählt, der den größten Anteil einnimmt. Um das Verhältnis der Kreisanteile zu erhalten, wird die euklidische Distanz von definierten Abtastpunkten innerhalb des Kreises zum Flugpfad ermittelt. Der Farbbereich, in dem über 50 Prozent der Punkte liegen, wird dem Kreis zugeordnet.
Bei einer Zugehörigkeit einer Ortschaft zu zwei Farbtönen, besteht die Möglichkeit eine farbliche Trennung der Kreise vorzunehmen, um eine korrekte Interpretation der Darstellung zu fördern. Dazu wird die Lärmkarte innerhalb der Kreise berechnet und angezeigt. Eine Visualisierung diesbezüglich wird in Abschnitt 6.2 vorgestellt.
Der FPNV vergibt pro Kreis lediglich eine Farbe, um alle Städte während der Verarbeitung zu klassifizieren und dem Benutzer diesen Arbeitsschritt abzunehmen. Eine Evaluation (Kapitel 6) soll zeigen, ob dieses Vorgehen für die Anwender akzeptabel ist oder die Lärmbelastung zu

[2]Mittelstädte haben 50.000 bis 100.000 Einwohner.

unpräzise darstellt.
Von den oben genannten Verfahren bestimmt der FPNV die Kreisfarbe mittels verschiedener Abtastpunkte. Um eine Entscheidung treffen zu können, muss die Anzahl der Punkte ungerade sein und ausreichend um aussagekräftige Ergebnisse zu liefern. Zudem sollte die Punktmenge klein genug sein, um die Laufzeit der Anwendung gering zu halten.
Neben dem Mittelpunkt werden vier gleichverteilte Positionen auf dem Kreisrand abgetastet, um die größtmögliche Fläche abzudecken. Bei der Betrachtung der jeweils nächsten Pfadpunkte wird der Kreis der Farbe zugeordnet, in deren Bereich mindestens drei Abtastpunkte liegen. Eine Ausnahme gilt, wenn sich die anderen beiden Punkte im höheren der betreffenden Schalldruckpegelbereiche befinden, somit wird die Stadt diesem Intervall zugeordnet. Dadurch werden höhere Lärmpegel stärker gewichtet.
Die anderen beiden Verfahren, die den Maximalwert bzw. den Schalldruckpegel am Kreismittelpunkt als Referenz betrachten, wurden verworfen, weil sie ungenauer sind als die Abtastung mehrerer Punkte.

Die Opazität der Kreisflächen liegt bei 0.7 und ist damit deutlich größer als bei der ersten Visualisierungsmethode. Dadurch heben sich die Kreise klarer vom Grund ab und dennoch sind die Konturverläufe der überblendeten Ortschaften leicht zu erkennen.
Der FPNV präsentiert dem Benutzer die Farbskala in einer Legende als Bildschirmüberlagerung am linken unteren Monitorrand (siehe Abbildung 5.11).

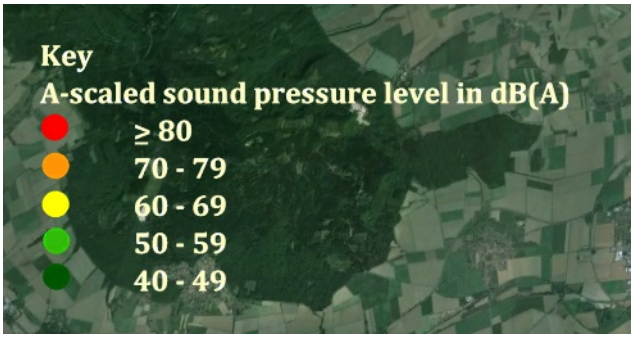

Abbildung 5.11: Legende der farbkodierten Städte mit der Farbskala der Schalldruckpegel.

Abbildung 5.12 fasst die zweite Methode der Lärmvisualisierung abschließend zusammen.

Darin wird Braunschweig als Großstadt gekennzeichnet mit einem Schalldruckpegel zwischen 50 und 59 dB(A). Bei der näheren Betrachtung wird deutlich, dass ein großer Teil der Stadt im dunkelgrünen Bereich und somit bei 40 - 49 dB(A) liegt. Da der Großteil der Stadt aber den hellgrünen Abschnitt einnimmt, wird dieser Aspekt bei der Visualisierung ignoriert.

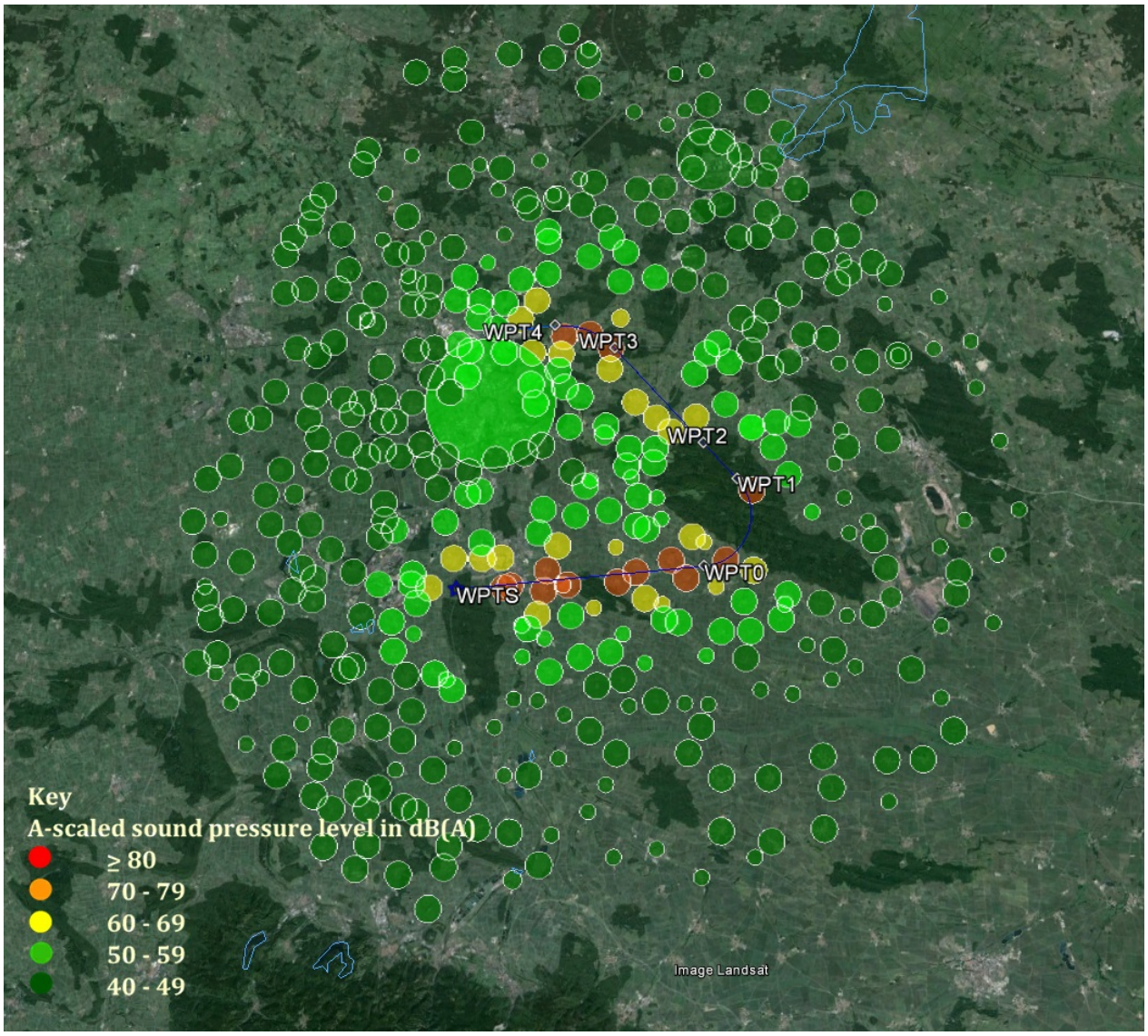

Abbildung 5.12: Komplette Darstellung der farbkodierten Städte mit Kreisflächen und Anflugpfad in GE.

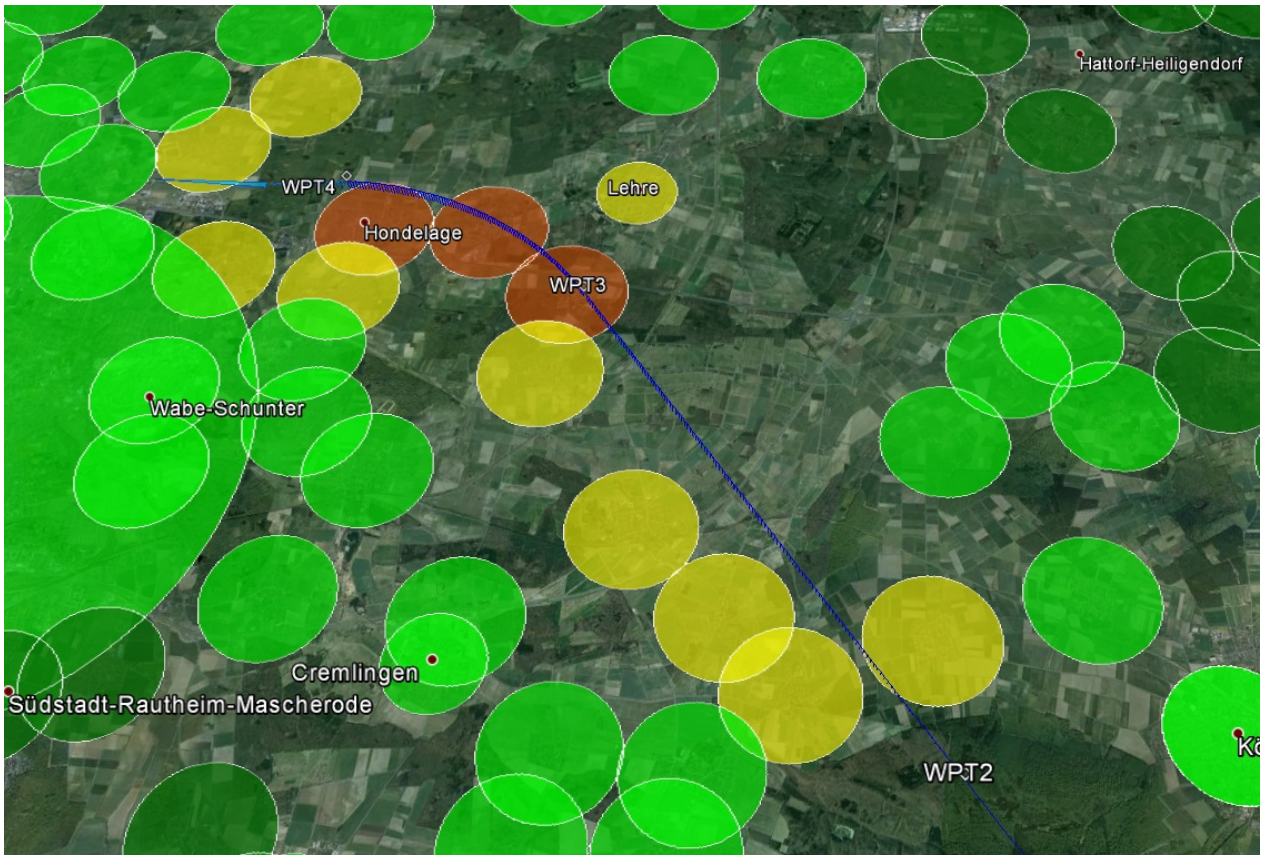

Abbildung 5.13: Komplette Darstellung der farbkodierten Städte nah, in GE. Die Farbe der Kreise wird durch fünf Referenzpunkte bestimmt.

Kapitel 6

Evaluation

Um die Ergebnisse der Visualisierungen zu bewerten, wurde eine Evaluation durchgeführt. Im Fokus steht dabei die subjektive Zufriedenheit und die objektive Leistungsmessung zukünftiger Anwender. Dieses Kapitel stellt die Ziele, den Aufbau sowie die Ergebnisse der Befragung vor und diskutiert diese.

6.1 Ziele

Zur Einschätzung der beiden Visualisierungsmethoden wurde die Arbeit separat vier Experten der Luft- und Raumfahrttechnik aus den Fachbereichen ‚Anflugverfahren' und speziell ‚Flugpfadplanung' vorgestellt. Anschließend wurde mit den Probanden eine Diskussion zu den beiden Verfahren aufgebaut. Das Ziel dabei war die Beantwortung folgender Fragen:

- Stellt die Anwendung eine Unterstützung bei der Planung eines Anflugpfads dar?
- Wie hoch ist der Schulungs-/Arbeitsaufwand für die Anwendung?
- Können alle Daten korrekt abgelesen werden?/Werden Informationen übersehen?
- Welche Visualisierungsmethode wird bevorzugt und warum?
- Wo liegen die Stärken/Defizite der einzelnen Darstellungsvarianten?
- Welche Markierung der Städte ist ausreichend/notwendig?

- Gibt es Verbesserungsvorschläge?

Der Gedankenaustausch mit den Probanden sollte Aufschluss über deren erste Eindrücke bei der Nutzung des FPNV bringen. Die Ziele der Arbeit wurden erfüllt, wenn die Visualisierungen alle Informationen korrekt anzeigen und diese intuitiv verstanden werden.

6.2 Aufbau und Ergebnisse

Die Evaluation begann mit der Vorstellung des Projekts, dazu wurden die Motivation, die Umsetzung und die Ergebnisse der Arbeit anhand von Beispielen erläutert. Anschließend wurde als Einstieg in die Diskussion ein Datensatz in Bezug auf eine Einschätzung der Lärmpegel der Stadt Hondelage diskutiert.

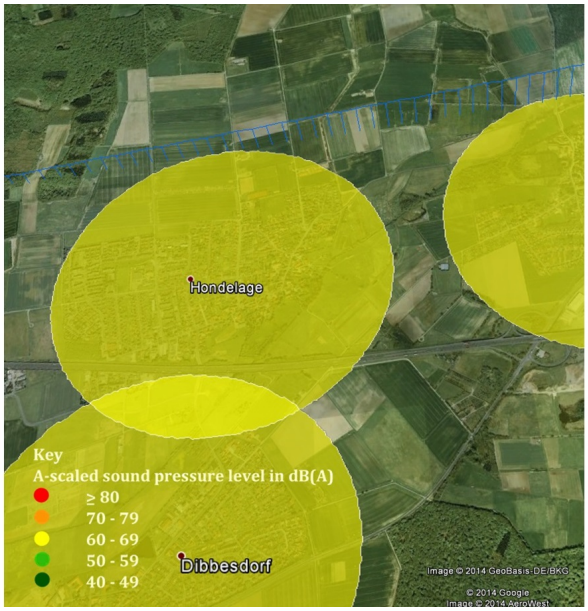

Abbildung 6.1: Hondelage als farbkodierte Stadt eines Anflugs zur Einschätzung des Schalldruckpegels in GE.

Abbildung 6.2: Hondelage in einer Lärmkarte eines Anflugs zur Einschätzung des Schalldruckpegels in GE.

Bei der Gegenüberstellung der beiden Darstellungen wurde ein Nachteil der zweiten Visualisierungsmethode deutlich. Da der Schalldruckpegel von fünf Referenzpunkten auf den kompletten Kreis projiziert wird, wird die Realität verfälscht. Die Lärmkontur ist nur zu vermuten, genauso wie eine Einschätzung, ob ein Stadtteil teilweise stärker belastet wird. Am Beispiel Hondelage

in Abbildung 6.1 ist zu erkennen, dass die Stadt mit einem mittleren Schalldruckpegel von 60 - 69 dB(A) markiert wird. Abbildung 6.2 verdeutlicht jedoch, dass der nördliche Teil der Stadt einem höheren Schalldruckpegel als 69 dB(A) ausgesetzt ist. Aus diesem Grund wurde von allen Teilnehmern die Lärmkarte bei der Beurteilung der Lärmemission bevorzugt.
Im Gespräch mit den Probanden wurde deutlich, dass die Kreisform bei der Interpretation der Wohngebiete verwirrte. Trotz der genauen Erklärung des Aufbaus des Kreises anhand der Einwohnerzahl, irritierte es die Probanden, wenn der Kreis größer oder kleiner als der zu erkennende Stadtverlauf war. Bei kleineren Ortschaften ist der Fehler durch die Kreisform minimal, ist jedoch der Verlauf einer größeren Stadt länglich, wird eine große Freifläche bedeckt, die fälschlicherweise als belastet eingestuft wird. Zudem können außerhalb des Kreises Wohngebiete, Schulen oder Krankenhäuser liegen, die dann bei der Beurteilung des Anflugpfades ignoriert werden. Die Struktur der Städte ist wichtig, um einzuschätzen, wo in der Stadt Gewerbegebiete oder Ackerflächen sind, deren Lärmpegel neben dicht bewohnten Bereichen zu vernachlässigen sind. Ebenso liefern die Lärmkarten mit den Placemarks als Stadtmarkierung unzureichende Informationen über das Ausmaß der jeweiligen Stadt. Dazu ist eine detailliertere Datenbank notwendig, die bei dieser Arbeit nicht vorliegt.
Die Lage der besiedelten Gebiete wird bei beiden Visualisierungsmethoden übersichtlich dargestellt. Ein Vorteil der sich bei den farbkodierten Städten zeigt, ist ein schneller Überblick über unbewohnte Regionen. Durch die freien Flächen ohne farbliche Kennzeichnung bekommt der Anwender einen schnellen Eindruck über die Verteilung der Siedlungen.

Eine Kombination der beiden Visualisierungen optimiert die Anwendung, indem der Vorteil der lückenhaften Darstellung der Siedlungsgebiete mit den genauen Lärmkonturen verbunden wird. Dadurch werden die Stärken beider Methoden vereint und lediglich das Problem der Kreisform bleibt bestehen.
Für die Umsetzung kann das Gitter der Distanzkarte für die Berechnung der Isolinien nur innerhalb der Kreise betrachtet werden, sodass nicht die komplette Lärmkarte angezeigt wird und lediglich die Kreise eingefärbt sind. Alternativ kann aber auch die vollständige Lärmkarte zusammen mit den kreisförmigen Stadtmarkierungen visualisiert werden. Somit können die Schalldruckpegel an allen Positionen abgelesen werden, wodurch das Kreisproblem kompen-

siert wird, da ebenfalls bei einem Stadtteil außerhalb des Kreises der Lärmpegel erkennbar ist. Den Teilnehmern der Evaluation wurde die zweite Variante der kombinierten Lösung vorgestellt (siehe Abbildung 6.3).

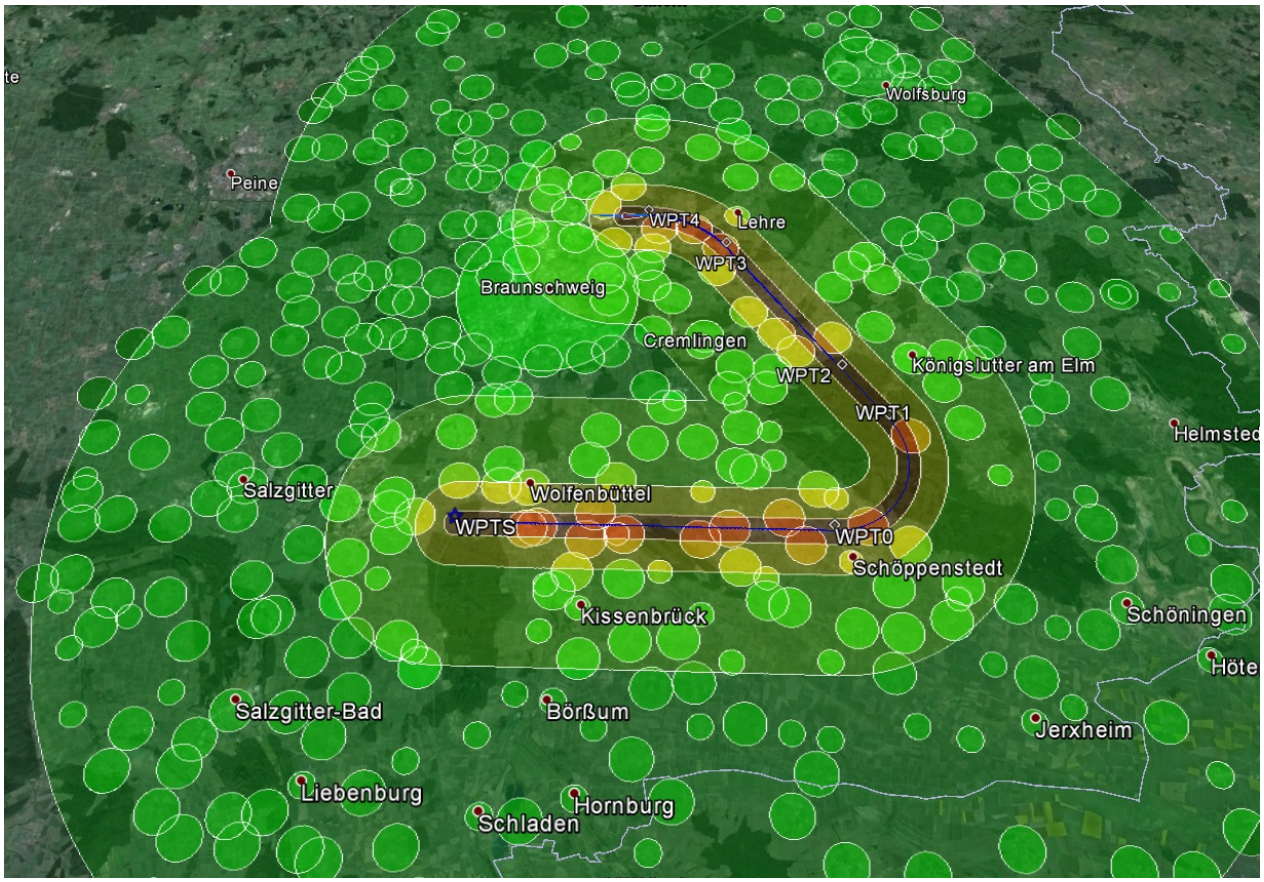

Abbildung 6.3: Die Lärmkarte ist mit den farbkodierten Kreisen der Städte kombiniert in GE.

Bei der Wahl zwischen den drei Optionen entschieden sich alle vier Probanden für die Kombination beider Visualisierungsmethoden, da darin alle notwendigen Informationen angezeigt werden.

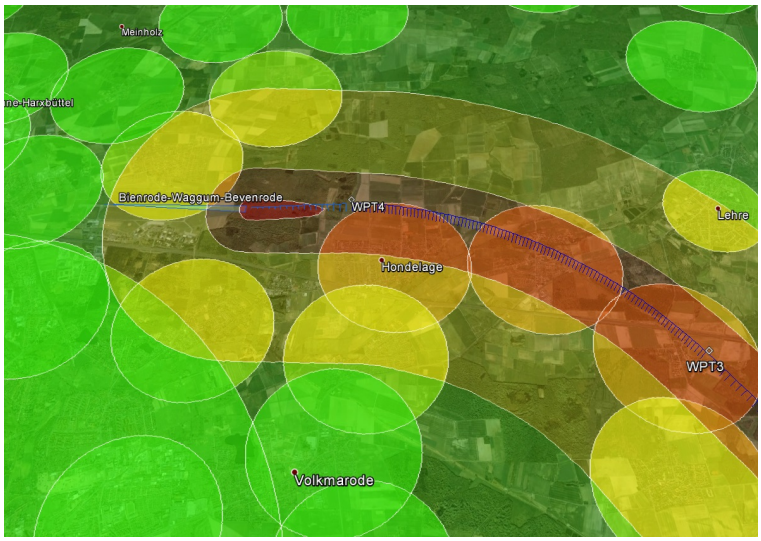

Abbildung 6.4: Kombination beider Visualisierungsmethoden nah in GE.

Um die drei Varianten der Lärmdarstellung im Vergleich zu bewerten, sollten die Probanden die Tabelle 6.1 ausfüllen. Dafür standen ihnen pro Zeile 15 Punkte zur Verfügung, die nicht aufgebraucht werden müssen. Je mehr Punkte eine Visualisierung bekommt, umso besser wird sie im Vergleich zu den anderen Optionen gewertet (Genaue Ergebnisse siehe Anhang B).

	LÄRMKARTE	FARBKODIERTE STÄDTE	KOMBINATION
SCHULUNGSAUFWAND			
ZEITAUFWAND/ÜBERSICHTLICHKEIT			
SCHALLDRUCKPEGEL ABLESEN			
SIEDLUNGSPOSITIONEN			

Tabelle 6.1: Vergleich der drei Visualisierungsmethoden.

Der Schulungsaufwand wurde bei allen drei Varianten als gering beurteilt, wobei die Lärmkarte die höchste Punktzahl erhielt, da bereits Erfahrungen im Umgang mit derartigen Visualisierungen gesammelt wurden. Alle Probanden waren im Umgang mit Google Earth vertraut, was eine Bedienung erheblich erleichterte. Der Zeitaufwand zur Bearbeitung eines Entwurfs wurde bei der ersten Methode als am höchsten bewertet, da Informationen über nahegelegene Städte zu wenig in die Darstellung eingebracht werden und eine intensivere Analyse erforderlich ist.

Am besten schnitt die Verbindung beider Visualisierungsmethoden bei der Zeiteffizienz und bei dem Ablesen der Schalldruckpegel ab. Die Lage der Siedlungen sowie die Lärmbelastung die-

ser kann schnell und einfach abgelesen und beurteilt werden. Damit sind die zwei wichtigsten Aspekte (siehe Abschnitt 5.2) einer Lärmvisualisierung in Bezug auf einen Anflugpfad umgesetzt worden.
Die Untersuchung der Lärmpegel wurde bei den farbkodierten Städten am schwersten eingestuft, da die Farbgebung der Kreise lediglich durch wenige Referenzpunkte bestimmt wird und somit Fehlinterpretationen gefördert werden. Bei der Kennzeichnung der Siedlungspositionen wurde diese Methode favorisiert, weil Freiflächen zwischen den Kreisen die Verteilung der Siedlungen im Vergleich besser verdeutlichen.

Abschließend sollten die Teilnehmer der Evaluation ein Feedback zu den drei Darstellungsmethoden abgeben. Dabei wurde deutlich, dass die Anwendung hilfreich bei der Planung eines Anflugpfades ist und besonders die Kombination der beiden vorgestellten Visualisierungsmethoden diese unterstützt.
Alle Anmerkungen der Teilnehmer wurden in das Fazit der Evaluierung in Abschnitt 6.3 eingearbeitet.

6.3 Fazit der Evaluation

Die Evaluation der Arbeit verdeutlichte, dass beide Lösungen bei der Umsetzung der Lärmvisualisierung zur Unterstützung eines Anflugentwurfs einsetzbar sind. In der folgenden Tabelle 6.2 sind Vor- und Nachteile der beiden entwickelten Ansätze zur Darstellung der Lärmemission eines Anflugpfades zusammengefasst.

LÄRMKARTEN		FARBKODIERTE STÄDTE	
Vorteile	Nachteile	Vorteile	Nachteile
Genaue Einschätzung der Lärmpegel	Information über Größe der Städte stark reduziert	Unbewohnte Flächen schnell ersichtlich	Kreisform
Genauer Verlauf der Schalldruckpegel		Lärmverteilung schnell erkennbar	Generalisierung zu einer Kreisfarbe
		Information über Größe der Städte	

Tabelle 6.2: Vor- und Nachteile der zwei Visualisierungsmethoden im Vergleich.

Lärmkarten und farbkodierte Städte benötigen wenig Schulungsaufwand und werden vom Anwender schnell verstanden. Außerdem sind beide Varianten zuverlässig und liefern immer die gleichen Ergebnisse.

Bei der Lärmkartierung kann genau abgelesen werden, wo sich Städte befinden und wie viel Lärm dort durch den angegebenen Anflug entsteht. Das Problem bei diesem Ansatz ist die Einschätzung der einzelnen Siedlungen, da nur eine geringe Information über deren Größe vermittelt wird. Werden genauere Informationen benötigt, muss die von Google Earth bereitgestellte Landschaft unter der Karte analysiert werden. Jedoch können diese Daten bereits veraltet sein und Fehlinformationen liefern. Die zweite Variante hingegen, verdeutlicht Informationen über die Bevölkerung besser. Durch die Kreisgröße wird direkt aufgezeigt, wie viele Menschen diesen Bereich besiedeln. Allerdings verallgemeinert die Kreisform den Stadtverlauf zu stark, wodurch Probleme bei der Einschätzung der Schalldruckpegel auftreten können. Wenn beispielweise eine Großstadt einen länglichen Verlauf besitzt, deckt der Kreis nicht die komplette Fläche ab, wodurch die Farbgebung wiederum verfälscht wird. Die Generalisierung der Schalldruckpegel zu einer Kreisfarbe übergeht kleine Bereiche der Siedlung, die eventuell stärker belastet werden.

Einen Vorteil gegenüber dem ersten Ansatz haben die farbkodierten Städte bei der Erkennung unbewohnter Flächen. Diese sind nicht eingefärbt und deshalb leicht zu identifizieren.

Wenn zwei Flugrouten anhand ihrer Lärmemission verglichen werden sollen, können beide Ansätze verwendet werden. Lärmkarten sind vorteilhafter bei der Erkennung von Maximalpegeln und der allgemeinen Verteilung der Schalldruckpegel. Dahingegen zeigen farbkodierte Städte direkt eine Veränderung auf einzelne Siedlungen.

Beide Varianten der Lärmvisualisierung unterstützen eine erste Einschätzung der Anflugpfade. Es ist jedoch eine genauere Betrachtung erforderlich, um Ungenauigkeiten bei dem Ausmaß einzelner Städte zu detektieren.
Eine Möglichkeit die Nachteile der beiden Visualisierungen auszugleichen, ist die Kombination beider Visualisierungen. Dadurch sind Informationen der Stadtgröße vorhanden und zusätzlich wird die Generalisierung in der Kreisfläche aufgehoben. Außerdem werden alle Vorteile aus der Tabelle vereint. Das einzige Problem, das den intuitiven Eindruck erschwert, ist die Kreisform zur Beschreibung einer Stadt. Besser wäre eine genaue Kontur der Stadt, die zusätzlich Informationen über dicht bewohnte Gebiete liefert, doch dafür liegt keine Datenbank vor.

Kapitel 7

Schlussbetrachtungen

Mit dem vorgestellten FPNV wurden erste Versuche unternommen, Anflugdaten in Verbindung mit der resultierenden Lärmemission in Google Earth darzustellen. Das Ergebnis ist als solide Basis für weitere Forschung nutzbar. In diesem Kapitel fasst ein Fazit die Ziele, die Ergebnisse und wichtigsten Erkenntnisse der Arbeit zusammen. Um das Ergebnis der Arbeit abschließend zu bewerten, wird ein Vergleich zu der Tabelle 3.1 in Kapitel 3 gezogen. Darin wurden Stärken und Schwachpunkte ähnlicher Visualisierungen betrachtet. Ein Ausblick stellt Möglichkeiten zur Erweiterung der Anwendung vor.

7.1 Fazit

Der FPNV ist eine Software, die nach der Eingabe einer Anflugroute diese dreidimensional in GE visualisiert und die hervorgehenden Schalldruckpegel auf den Grund projiziert. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Hervorhebung der umliegenden Wohngebiete zur Einschätzung der Lärmbelastung dieser durch den Anflugpfad.
Die Eingangsdaten der Anwendung setzen sich neben den Wegpunkten der Flugroute aus Informationen über den Zielflughafen, das zugrunde liegende Navigationsverfahren und spezifischen Daten des Anflugs zusammen. Nach der Interpolation der Pfadlinie wird diese dem Anwender nach den Standards der Luftfahrt präsentiert.

Bei der Beurteilung von Fluglärm werden zahlreiche Faktoren für eine korrekte Darstellung der Realität benötigt. Die Berechnung des Lärmpegels wurde mittels vereinfachter Annahmen reduziert, um den Aufwand der Arbeit einzugrenzen. Die Anwendung stellt das Flugzeug vereinfacht als kugelförmige Quelle dar, die den Lärm gleichmäßig verbreitet. Dadurch muss lediglich die Distanz zum Anflugpfad betrachtet werden, um einen Schalldruckpegel für einen Immissionsort zu ermitteln.

Für die Kennzeichnung nahegelegener Siedlungen wurden zwei Methoden entwickelt, die diese zusammen mit dem resultierenden Lärm darstellen. Die erste Variante erstellt eine zweidimensionale Lärmkarte und markiert umliegende Städte anhand von Placemarks. Zu Beginn wurde ein Ansatz aufgestellt, bei dem die Kontur der Isolinie anhand gerader und gekrümmter Segmente zusammengesetzt wird. Aufgrund vielzähliger Sonderfälle bei dem Zusammenstellen der Teilstücke wurde dieser Ansatz jedoch verworfen. Der Marching Squares Algorithmus erstellt die Isolinien der Lärmkarte anhand einer Distanzkarte und umgeht somit die genannten Sonderfälle. Mittels dieser Kartierung kann an jeder beliebigen Position der zu erwartende Schalldruckpegel abgelesen werden.
Das Problem dieser Methode ist die unzureichende Markierung der Siedlungen. Obwohl farbkodierte Placemarks die Städte in drei Größen differenzieren, kann das genaue Ausmaß dieser nur mit erhöhtem Aufwand analysiert werden.
Die zweite Variante kombiniert die Informationen der Siedlungen mit denen der Lärmpegel. Dazu werden um die Mittelpunkte der nahegelegenen Städte Kreise gezeichnet, deren Radius von der jeweiligen Einwohnerzahl abhängt. Jeder Kreis wird nach dem Schalldruckpegel der am Mittelpunkt sowie vier weiteren Referenzpunkten zu erwarten ist, farblich kodiert. Dadurch entstehen freie Flächen, die eine Einschätzung unbewohnter Regionen erleichtern. Die Darstellung der Einwohnerzahl ist ein Vorteil gegenüber der ersten Methode, jedoch verfälscht die Generalisierung zu einer Kreisfarbe die Realität.
Um die Defizite der Visualisierungsmethoden auszugleichen wurden beide Ansätze kombiniert. In dieser Darstellung wird die Lärmkarte berechnet und zusammen mit den Kreisen der farbkodierten Städte angezeigt. Dadurch können die resultierenden Schalldruckpegel des Anflugpfads an jeder Position abgelesen werden und die Verteilung der Städte wird dem Benutzer übersicht-

lich präsentiert.
Mit der kombinierten Visualisierung der Lärmemission kann die Szene leicht analysiert werden um eine erste Einschätzung bezüglich eines Anflugpfades aufzustellen. Dadurch werden die Forscher bei der Planung gekrümmter Anflüge für verschiedene Flughäfen unterstützt und das Ziel der Masterarbeit wurde erreicht.
Eine perfekte Darstellung würde die Kreisform mit dem genauen Grundriss der Stadt ersetzen und interessante Bereiche wie beispielsweise Wohngebiete, Schulen oder Krankenhäuser deutlich hervorheben bzw. Gewerbegebiete und Ackerflächen ignorieren. Da eine Datenbank in solchem Umfang nicht vorliegt, kann sich der Anwender lediglich auf die realitätsnahe Abbildung der Welt von GE beziehen. Wobei zu beachten ist, dass diese nicht aktuell sein muss und falsche Informationen liefern könnte.

In Kapitel 3 wurden ähnliche Projekte aus den Bereichen Flugbahn- sowie Fluglärmvisualisierung vorgestellt. Um einen Vergleich zu dieser Arbeit zu ziehen, werden deren Stärken und Defizite mit den Ergebnissen des FPNV gegenübergestellt.
Als Vorzug der Visualisierung der entwickelten Anwendung ist dabei die Nutzung von Google Earth zu nennen. Dadurch wird Terrain realitätsnah abgebildet, um die Umgebung des Anflugs besser einschätzen zu können. Durch die transparente Lärmkarte können geographische Daten problemlos erkannt werden. Zudem werden KML-Dateien zur Speicherung aller Daten genutzt, um eine nachträgliche Analyse des Anflugs ohne großen Aufwand zu ermöglichen. Die Darstellung ist intuitiv und vermittelt dem Benutzer eine übersichtliche Datenmenge.
Die Defizite der Visualisierung werden im nächsten Abschnitt näher betrachtet und diskutiert.

7.2 Ausblick

Für zukünftige Arbeiten an diesem Thema gibt es verschiedene Punkte, die Potenzial für eine Optimierung des FPNV bieten. Dazu gehören der Verarbeitungsprozess, die Lärmberechnung sowie die Visualisierung. Die nachfolgenden Sektionen nennen die wichtigsten Aspekte.

7.2.1 Datenverarbeitung

Die frei verfügbare Datenbank, die zur Ermittlung nahegelegener Städte des Anflugpfads verwendet wird, verfügt über 61 072 Einträge. Diese schließen neben Städten, Gemeinden und Ortsteilen ebenfalls Museen und Denkmäler ein und die Filterung wichtiger Informationen benötigt somit viel Zeit. Um Suchdurchläufe zu beschleunigen, kann eine separate Speicherung vorheriger Ergebnisse einen kompletten Durchlauf der Datenbank ersparen, da oft für die gleichen Pfadsegmente umliegende Städte gesucht werden. Am besten wäre jedoch die Nutzung einer anderen Datenbank, deren Einträge für eine derartige Verwendung angepasst sind.

7.2.2 Lärmberechnung

Den größten Raum für eine Erweiterung bietet die Lärmberechnung.
Aktuell kann nur ein Schalldruckpegel einer Boeing 737 angezeigt werden. Es sollten Emissionsdaten für die fünf Flugzeugkategorien hinterlegt werden, um eine Differenzierung zwischen den Flugzeugen vorzunehmen und die Lärmemission der Kugelquelle dementsprechend anzupassen.
Zudem wird derzeit der Einfluss des Flugzeugs auf einen Immissionsort nur bezüglich eines Pfadpunktes betrachtet. Um die komplette Flugroute einzubeziehen, können verschiedene Ansätze genutzt werden. Beispiele dafür finden sich in [23]. Das darin erwähnte Segmentierungsverfahren zerlegt die Anflugbahn in lineare Segmente und summiert deren einzelne Beiträge zu einer Gesamtimmission.
Als dritten Punkt ist die Bildung von Korridoren um eine geplante Flugroute zu nennen. Durch die Streuung der Anflüge kann nicht ausschließlich der exakte Verlauf des Pfades vorausgesetzt werden. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 7.1 aufgenommene Radarflugspuren für Abflüge.

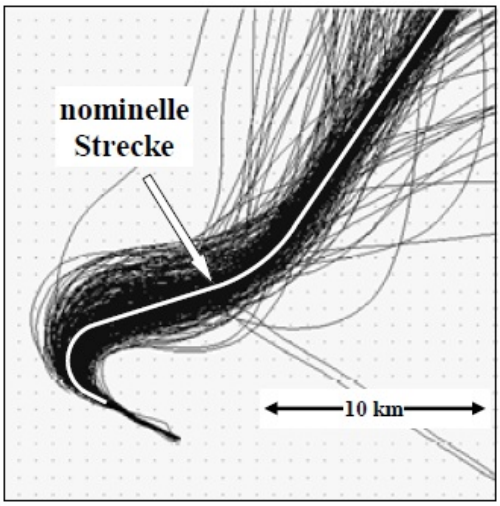

Abbildung 7.1: Radarflugspuren zeigen bei Abflügen Abweichungen bis zu einigen Kilometern von der nominellen Strecke. Gründe dafür sind Unterschiede in der Flugzeugmasse, bei dem Flugverfahren und bei meteorologischen Randbedingungen [23].

Momentan wird der genaue Anflugpfad für die Lärmberechnung betrachtet, ohne dabei eine mögliche Streuung zu berücksichtigen. Da hierdurch Wohngebiete stärker betroffen sein können als bisher berechnet, sollte eine Abweichung näher in die Kalkulation eingehen.

7.2.3 Visualisierung

Wie bereits in vorhergehenden Abschnitten erwähnt wurde, kann eine detailliertere Datenbank Informationen liefern, die eine Darstellung der Städte optimiert. Dazu gehören Daten über dicht besiedelte Stadtteile, Schulen oder Krankenhäuser, deren Hervorhebung, beispielsweise durch rote Quadrate innerhalb der Stadtkontur, eine Prognose über die Lärmbelastung verfeinern kann.

In der Arbeit [33] erleichtern numerische Werte sowie eine Interaktion mit dem Benutzer die Analyse der Fluglärmdaten. Dieses Konzept kann auf den FPNV übertragen werden, indem die Maximalpegel jeder Stadt im Kreiszentrum angezeigt werden. Um den intuitiven Eindruck zu bewahren können diese Werte bei einem Klick auf den Kreis erscheinen.

Abbildungsverzeichnis

1.1 Zwei Anflüge auf Nürnberger Flughafen 3

2.1 Initial Fix 3D in Google Earth 8
2.2 Track-To-Fix 3D in GE 8
2.3 Radius-To-Fix mit gekennzeichnetem Drehzentrum 3D in GE 8
2.4 Globus mit Längen- und Breitengraden 9
2.5 Schwierigkeit geozentrischer Koordinaten 11
2.6 Berechnung Punkt anhand Distanz, Richtung, GPA 11
2.7 Flugroute basierend auf konventioneller Navigation 12
2.8 Flugroute anhand satellitenbasierter Navigation 12
2.9 Fly-Over Waypoint 12
2.10 Fly-By Waypoint 12

3.1 Flughafen Haneda in Tokio mit gekrümmten Anflug 17
3.2 Konzept von Haneda auf Flughafen Braunschweig übertragen 17
3.3 „Air Traffic Visualization 3D“ Flugpfad mit Flugzeugmodell, 2003 19
3.4 „Air Traffic Visualization 3D“ Meteorologie, 2003 19
3.5 „Air Traffic Visualization 3D“ für das Training von Fluglotsen, 2010 20
3.6 „Air Traffic“ von Albert Steiner 21
3.7 Screenshot „Flexible Flight Traffic Exploration Visualization 4D“ 22
3.8 Ausgabe FANOMOS des NLR 23
3.9 Flugverläufe Flughafen Düsseldorf 24
3.10 Fluglärmkarte BER der taz 25
3.11 Höhengrafik Fluglärmkarte BER der taz 25

4.1 Benutzeroberfläche des FPNV, TAP-Block 29
4.2 Benutzeroberfläche des FPNV, FAS-Block 30
4.3 Klassendiagramm zur Organisation der Benutzeroberfläche 32
4.4 Ablaufdiagramm des FPNV 33
4.5 Interpolation eines geraden Pfadstücks 35
4.6 Visualisierung IF und TF 36
4.7 Höhenprofil in GE 36
4.8 Landebahn mit THRC und eTHRC 36
4.9 Flugpfad in Richtung Flughafen 37
4.10 Visualisierung Flughafen Braunschweig 37

5.1 Lärmkarte um Flugpfad 45
5.2 Berechnung des Abstands zu auf Grund projizierten Pfad 46
5.3 Berechnung orthogonaler Punkte zu Wegpunkt 46
5.4 Lärmkontur eines Flugpfads durch Translation der Wegpunkte 47
5.5 Konfigurationen des Marching Squares Algorithmus 49
5.6 Bestimmung Punkt der Isolinie anhand Marching Squares 50
5.7 Legende der Lärmkarte 51
5.8 Lärmkarte ohne Placemarks 52
5.9 Komplette Lärmkarte nah 53
5.10 Farbkodierte Städte um Flugpfad 54
5.11 Legende der farbkodierten Städte 56
5.12 Farbkodierte Städte komplett 57
5.13 Farbkodierte Städte ohne Legende 58

6.1 Hondelage als farbkodierte Stadt eines Anflugs 60
6.2 Hondelage in einer Lärmkarte eines Anflugs 60
6.3 Kombination beider Visualisierungsmethoden 62
6.4 Kombination beider Visualisierungsmethoden nah 63

7.1 Streuung von Radarflugspuren für Abflüge 71

Tabellenverzeichnis

3.1 Vergleich der Visualisierungen aus aktuellen Forschungen. 26

5.1 Mögliche Schwellwerte für die Einteilung der Skala der Schalldruckpegel. 43
5.2 Einteilung der Farbskala des FPNV zur Einschätzung der Schalldruckpegel. . . . 43

6.1 Vergleich der drei Visualisierungsmethoden. 63
6.2 Vor- und Nachteile der zwei Visualisierungsmethoden im Vergleich. 65

B.1 Vergleich der Visualisierungsmethoden: Schulungsaufwand. xi
B.2 Vergleich der Visualisierungsmethoden: Zeitaufwand/Übersichtlichkeit. xi
B.3 Vergleich der Visualisierungsmethoden: Schalldruckpegel ablesen. xii
B.4 Vergleich der Visualisierungsmethoden: Siedlungspositionen. xii

Anhang A

Abkürzungen

AzB	Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen
dB	Dezibel
dB(A)	A-bewerteter Schalldruckpegel
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
eTHRC	entgegengesetzte Threshold Coordinate (Landebahnende)
FAS	Final Approach Segment
FPAP	Flight Path Alignment Path
FPNV	FlightPathNoiseVisualizer
GE	Google Earth
GPA	Gleitpfadwinkel
GPS	Global Positioning System
IF	Initial Fix
KML	Keyhole Markup Language
LTP/FTP	Landing/Fictious Threshold Point
m	Meter
NLR	Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (Nationales Zentrum für Luft- und Raumfahrt der Niederlande)
nm	Nautische Meile
TAP	Terminal Area Path
TF	Track-to-Fix

THRC	Threshold Coordinate (Landebahnbeginn)
RF	Radius-to-Fix
XML	Extensible Markup Language

A.1 Symbole

d	Euklidische Distanz
d(X)	Minimalste Distanz von Punkt X zum Flugpfad
h	Flughöhe
I	Immissionsort
L	Schalldruckpegel
ΔL	Differenz der Schalldruckpegel
$\mathbf{P1}_x$	X-Koordinate Punkt 1
s	Kürzester Vorbeiflugabstand
s'	Aktueller Abstand zwischen I und Lärmquelle
s_{ref}	Referenzabstand
thr	Schwellenwert einer Isolinie
w	Abstand I zu auf Grund projizierten Flugpfad
°	Grad (Winkel)

Anhang B

Ergebnisse der Evaluation

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Evaluation bei dem Vergleich der drei Visualisierungsmethoden aufgelistet. Um die drei Varianten der Lärmdarstellung zu bewerten, sollten die Probanden die Tabelle 6.1 ausfüllen. Dafür standen ihnen pro Zeile 15 Einheiten zur Verfügung, die nicht aufgebraucht werden müssen. Je mehr Punkte eine Visualisierung bekommt, umso besser wird sie im Vergleich zu den anderen Optionen gewertet.

	LÄRMKARTE	FARBKODIERTE STÄDTE	KOMBINATION
SCHULUNGSAUFWAND	5	6	4
	7	4	4
	4	2	9
	6	4	4
Summe	22	16	21

Tabelle B.1: Vergleich der Visualisierungsmethoden: Schulungsaufwand.

	LÄRMKARTE	FARBKODIERTE STÄDTE	KOMBINATION
ZEITAUFWAND/ÜBERSICHTLICHKEIT	4	5	6
	6	4	5
	2	4	9
	5	5	5
Summe	17	18	25

Tabelle B.2: Vergleich der Visualisierungsmethoden: Zeitaufwand/Übersichtlichkeit.

	Lärmkarte	Farbkodierte Städte	Kombination
Schalldruckpegel ablesen	6	3	6
	5	5	5
	7	1	7
	4	5	6
Summe	22	14	24

Tabelle B.3: Vergleich der Visualisierungsmethoden: Schalldruckpegel ablesen.

	Lärmkarte	Farbkodierte Städte	Kombination
Siedlungspositionen	3	3	3
	3	7	5
	2	6	6
	3	6	6
Summe	11	22	20

Tabelle B.4: Vergleich der Visualisierungsmethoden: Siedlungspositionen.

Referenzen

[1] BR Studio Franken, “Weltpremiere - Der Flug der Nummer 21.” Internet Quelle. Aufgerufen Aug. 22, 2014: http://www.dreifaltigkeit-altdorf.de/zitate_laerm.htm.

[2] Weimer, Dr. Martin, “Zitate über Lärm.” Internet Quelle. Aufgerufen Sept. 01, 2014: http://www.br.de/franken/inhalt/zeitgeschichte/gustav-weisskopf-flug-100.html.

[3] Das Statistik-Portal, “Anzahl der Flugbewegungen in Europa in den Jahren 2012 bis 2019 (in Millionen) .” Internet Quelle. Aufgerufen Sept. 01, 2014: http://de.statista.com/statistik/daten/studie/255880/umfrage/anzahl-der-flugbewegungen-in-europa/.

[4] Spiegel Online - Böcking, D., “ Neues Internetportal zu Fluglärm: Hier dröhnt es.” Internet Quelle. Aufgerufen Sept. 01, 2014: http://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/luftfahrtindustrie-startet-internetportal-zum-fluglaerm-a-979510.html.

[5] U. Isermann und R. Schmid, “Bewertung und Berechnung von Fluglärm,” *FE-Nr. L-2/96-50144/96*, 2000. DLR - Institut für Strömungsmechanik.

[6] Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e.V., “Das Fluglärm Portal.” Internet Quelle, 2014. Aufgerufen July 08, 2014: http://www.fluglärm-portal.de/.

[7] DLR, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Isermann U., "Das Projekt Leiser Flugverkehr - LFVK." Internet Quelle. Aufgerufen July 10, 2014: http://www.dlr.de/as/desktopdefault.aspx/tabid-192/402_read-11273/.

[8] Geister, R., Dautermann, T., Mollwitz, V., Hanses, C. und Becker H., "3D-Precision Curved Approaches: A Cockpit View on ATM," *Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*, 2013.

[9] Schreckenberg, D., "Betroffenheit durch Fluglärm am Beispiel des Frankfurter Flughafens." Internet Quelle, 2010. Aufgerufen Aug. 05, 2014: http://www.dlr.de/as/desktopdefault.aspx/tabid-192/402_read-11273/.

[10] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, "Neuartige Anflugverfahren reduzieren Anfluglärm." Internet Quelle, 2011. Aufgerufen Apr. 26, 2014: http://www.koeln-bonn-airport.de/unternehmen/umwelt-laermschutz/fluglaerm/laerm-fluglaerminfos.html.

[11] Steen, M., Feuerle, T., Stanisak, M., Yoshihara, T. und Hecker P., "GBAS curved approach procedures: advantages, challenges and applicability," *ICAS*, 2012.

[12] OpenGeoDB, "OpenGeoDB." Internet Quelle, 2012. Aufgerufen 13, 2014: http://opengeodb.org/wiki/OpenGeoDB_Downloads.

[13] Vogelwarten Helgoland, "Die Arbeit mit geographischen Koordinaten." Internet Quelle, 2001. Aufgerufen June 03, 2014: http://www.ifv-vogelwarte.de/files/Richtlinien/Handbuch%208-3.pdf.

[14] ArcGIS Resources, "Georeferenzierung und Koordinatensysteme." Internet Quelle. Aufgerufen May 06, 2014: http://resources.arcgis.com/de/help/getting-started/articles/026n0000000s000000.htm.

[15] Eurocontrol, "What is Area Navigation?." Internet Quelle. Aufgerufen June 07, 2014: http://www.icao.int/MID/Documents/2014/PBN%20Workshop-Tunis/01%20What%20is%20Area%20Navigation_VJUL13.pdf.

[16] Federal Aviation Administration, “Area Navigation (RNAV) and Required Navigation Performance (RNP).” Internet Quelle. Aufgerufen Apr. 11, 2014: http://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aim/aim0102.html.

[17] Geister R., Hanses C. und Becker H., “Curved approach procedures enabled by a ground based augmentation system,” *IEEE*, 2012.

[18] RTCA, “Minimum aviation system performance standards for the local area augmentation system (LAAS),” 2004. DO-245A.

[19] Scientific Committees, “Dezibel Definition.” Internet Quelle. Aufgerufen Apr. 26, 2014: http://ec.europa.eu/health/opinions/de/gehoerverlust-mp3-player/glossar/def/dezibel.htm.

[20] Flughafen Köln/Bonn GmbH, “Köln Bonn Airport - Lärm- und Fluglärminfos.” Internet Quelle. Aufgerufen Apr. 27, 2014: http://www.gbe-bund.de/gbe10/abrechnung.prc_abr_test_logon?p_uid=gasts&p_aid=&p_knoten=FID&p_sprache=D&p_suchstring=8684::Schalldruckpegel.

[21] Gesundheitsberichterstattung des Bundes, “Lärm.” Internet Quelle. Aufgerufen Apr. 26, 2014: http://www.gbe-bund.de/gbe10/abrechnung.prc_abr_test_logon?p_uid=gasts&p_aid=&p_knoten=FID&p_sprache=D&p_suchstring=8684::Schalldruckpegel.

[22] Stadt Frankfurt am Main, “Fluglärm.” Internet Quelle. Aufgerufen Apr. 27, 2014: http://www.frankfurt.de/sixcms/detail.php?id=5992731.

[23] Isermann U., “Fluglärmberechnungsverfahren - von der AzB zum Werkzeug für den aktiven Schallschutz,” 2010.

[24] E.-L. Bertsch, “Noise Prediction within Conceptual Aircraft Design,” 2013.

[25] Lange, M., Hjalmarsson, J., Cooper, M., Ynnerman, A. und Duong, V., “Visualization and 3D and Voice Interaction in Air Traffic Management,” *SIGRAD*, 2003.

[26] Eurocontrol und Linköping Universität, “Air Traffic Visualization 3D.” Internet Quelle, 2011. Aufgerufen July 12, 2014: http://atv3d.sourceforge.net/index.php?page=1.

[27] A. Steiner, “Visualizing traffic data with Google Earth™: Real-time Air Traffic in 3D,” *Swiss Transport Research Conference*, 2010.

[28] Z. H. für Angewandte Wissenschaften, “AirTraffic Live.” Internet Quelle, 2011. Aufgerufen July 11, 2014: //radar.zhaw.ch/home.html.

[29] Crowell, A., Fabian, A. und Nelson, N., “An interactive 4D visualization system for air traffic concept analysis,” *IEEE*, 2012. Swiss Transport Research Conference.

[30] H. Veerbeek, H.W. und ten Have, “Aircraft noise exposure: the cycle of modelling, monitoring and validation,” *Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium*, 1998.

[31] Middel, J., Veerbeek, H.W., van Engelen, J.A.J. und Verbeek, R.J.D, “Fluglärmmonitoring am Flughafen Frankfurt/Main,” *Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium*, 2003.

[32] Deutsche Flugsicherung, “Flugverläufe am Flughafen Düsseldorf.” Internet Quelle, 2014. Aufgerufen Aug. 12, 2014: https://www.dfs.de/dfs_homepage/de/Flugsicherung/Umwelt/Flugverl%C3%A4ufe%20online/D%C3%BCsseldorf/.

[33] G. Aisch and L. Matzat, “Fluglärmkarte BER: Making of,” *kunsttexte.de//auditive_perspektiven*, 2013. NLR-CR-2003-280.

[34] Die Tageszeitung, “Fluglärm-Karte BBI-Airport Berlin.” Internet Quelle, 2014. Aufgerufen Aug. 12, 2014: http://www.taz.de/!t195/#!bbi/.

[35] Google, “Keyhole Markup Language.” Internet Quelle, 2014. Aufgerufen 10, 2014: https://developers.google.com/kml/.

[36] RTCA, “GNSS-Based Precision Approach, Local Area Augmentation System (LAAS) Signal-in-Space Interface, Control Document (ICD),” 2008. DO-246D.

[37] Flightglobal Insight, “Growing Bigger Slowly,” *World Airliner Census*, 2013.

[38] sengpielaudio, “Dezibel-Tabelle - SPL - Lautstärke-Vegleichstabelle.” Internet Quelle. Aufgerufen Apr. 26, 2014: http://www.sengpielaudio.com/TabelleDerSchallpegel.htm.

[39] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, “Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm.” Internet Quelle, 1971. Aufgerufen Aug. 25, 2014: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/flul_rmg/gesamt.pdf.

[40] Mantz, H., Jacobs, K. und Mecke, K., “Utilizing Minkowski functionals for image analysis: a marching square algorithm,” *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2008.

[41] Länderdaten, “Bevölkerungsdichte.” Internet Quelle, 2013. Aufgerufen 29, 2014: http://www.laenderdaten.de/bevoelkerung/bevoelkerungsdichte.aspx.