4D-ROUTENPLANUNG FÜR UNBEMANNTE FLUGSYSTEME IM KONTEXT DER REGULIERUNG DES DEUTSCHEN LUFTRAUMS

M. Wallenstein, J. Wojtusch, R. Heidger
DFS Deutsche Flugsicherung GmbH, Am DFS-Campus 10, Deutschland

Zusammenfassung

Geografische Gebiete, in denen laut LuftVO der Betrieb von UAS nur unter bestimmten Auflagen, zu bestimmten Zeiten oder gar nicht erlaubt ist, stellen eine zusätzliche Herausforderung bei der Planung und Durchführung von Operationen dar. Zur Unterstützung von Betreibern und Piloten wurde eine optimiert 4D-Routenplanung für UAS konzipiert und evaluiert, welche diese Regulierungen im deutschen Luftraum berücksichtigt und zusätzliche Nutzervorgaben einbezieht. Die vorgestellte Lösung erfüllt domänenspezifische Kriterien hinsichtlich einer effizienten Route und gewährleistet durch ihre geringe Laufzeit einen unterbrechungsfreien und dynamischen Arbeitsablauf des Nutzers. Die prototypische Umsetzung dient als Basis für weitere Funktionen zur Unterstützung von Betreibern und Piloten bei der Operationsplanung und -durchführung im Verkehrsmanagementsystem *ZEUS*.

1. EINLEITUNG

Das von der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH entwickelte Verkehrsmanagementsystem *ZEUS* [1] ermöglicht eine sichere Integration von unbemannten Flugsystemen (UAS) in den deutschen Luftraum. Neben einer detaillierten Luftlagedarstellung mit integrierter Konflikterkennung und umfangreichen Funktionen zur Operationsplanung verfügt das System über aktuelle Karten von geografischen Gebieten, in denen laut Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO) der Betrieb von UAS nur unter bestimmten Auflagen, zu bestimmten Zeiten oder gar nicht erlaubt ist. Beispiele für solche geografischen Gebiete sind:

- **Flughäfen (§ 21h Absatz 3 Nr. 2 LuftVO)**

"über und innerhalb eines seitlichen Abstands von 1.000 Metern von der Begrenzung von Flughäfen sowie innerhalb einer seitlichen Entfernung von weniger als 1.000 Metern aller in beide An- und Abflugrichtungen um jeweils 5 Kilometer verlängerten Bahnmittellinien von Flughäfen" [2]

- **Bahn- Schiffs- und Straßenverkehr (§ 21h Absatz 3 Nr. 5 LuftVO)**

"über und innerhalb eines seitlichen Abstands von 100 Metern von Bundesfernstraßen, Bundeswasserstraßen und Bahnanlagen" [2]

- **Naturschutzflächen (§ 21h Absatz 3 Nr. 6 LuftVO)**

"über Naturschutzgebieten im Sinne des § 23 Absatz 1 des Bundesnaturschutzgesetzes, über Nationalparks im Sinne des § 24 des Bundesnaturschutzgesetzes und über Gebieten im Sinne des § 7 Absatz 1 Nummer 6 (Gebiete von gemeinschaftlicher Bedeutung) und 7 (Europäische Vogelschutzgebiete) des Bundesnaturschutzgesetzes" [2].

In Deutschland gibt es Stand August 2026 mehr als 91.400 ausgewiesene geografische Gebiete. Für Betreiber und Piloten stellen diese Regulierungen eine zusätzliche Herausforderung bei der Planung von Operationen in Regionen mit vielen und teilweise überlappenden geografischen Gebieten dar. Zur Unterstützung der Nutzer wurde im Rahmen der Weiterentwicklung von *ZEUS* eine optimierte 4D-Routenplanung für unbemannte Flugsysteme konzipiert und in einem ersten Prototypen implementiert. Diese räumliche und zeitliche Routenplanung beachtet die geltenden Regulierungen und bezieht dabei Vorgaben durch den Nutzer mit ein.

Für die Ermittlung einer optimierten Route in einem definierten Operationsgebiet werden Start- und Zielpunkt so verbunden, dass Flugstrecke und Genehmigungsaufwand für das Durchqueren von geografischen Gebieten minimiert werden. Dies ist beispielhaft in Abbildung 1 dargestellt. Die rote Operation, links in Abbildung 1, muss mindestens zwei geografische Gebiete kreuzen. Hier wurden beispielhaft die graue Bahntrasse sowie das grüne Naturschutzgebiet anstatt dem gelben Wohngebiet gewählt. Priorisiert werden dabei geografische Gebiete, deren Genehmigungsaufwand als geringer eingeschätzt wird oder für die bereits Genehmigungen vorliegen. Die blaue Operation, rechts in Abbildung 1, kann hingegen ohne das Durchqueren von geografischen Gebieten geplant werden.

In der Literatur werden unterschiedliche Ansätze zur Planung von Routen für UAS vorgestellt und diskutiert. In bekannten und statischen Umgebungen mit monokriteriellem Optimierungsproblem liefern deterministische, graphenbasierte Algorithmen wie *Dijkstra*, *A** oder *Theta** optimale oder nahezu optimale Lösungen, z.B. [3], [4]. Die Generierung eines geeigneten Graphen ist dabei beispielsweise rasterbasiert mit einem gleichmäßigen Raster oder *Quaternärbäumen* beziehungsweise graphenbasiert mit Verfahren wie *Sichtbarkeitsgraphen* oder *Delaunay-Triangulation* möglich. Bei großen oder komplexeren Umgebungen steigt der Rechenaufwand jedoch deutlich an. Naturinspirierte Algorithmen wie *Genetische Algorithmen*, *Partikelschwarmoptimierung* oder *Ameisenalgorithmen*, z.B. [5], [6], sowie stochastische Verfahren wie *Rapidly-exploring Random Tree* oder *Probabilistic Roadmap*, z.B. [7], [8], eignen sich für komplexe und nichtlineare Umgebungen sowie multikriterielle Optimierungsprobleme. Allerdings ist bei diesen Ansätzen häufig eine sorgfältige Parametrierung erforderlich und eine optimale Lösung ist nicht garantiert. Hybridansätze, z.B. [9], [10], vereinen mehrere Verfahren und können so teilweise Nachteile ausgleichen. Gleichzeitig steigt die Komplexität und der Rechenaufwand. Verfahren basierend auf maschinellem Lernen, z.B. [11], [12], eignen sich ebenfalls für komplexe Szenarien, sofern genügend Trainingsdaten und Rechenleistung zur Verfügung stehen. Eine weiterführende Diskussion und Klassifikation der verschiedenen Ansätze haben beispielsweise Nafees et al. zusammengestellt [13].

CC BY 4.0

doi: 10.25967/680095

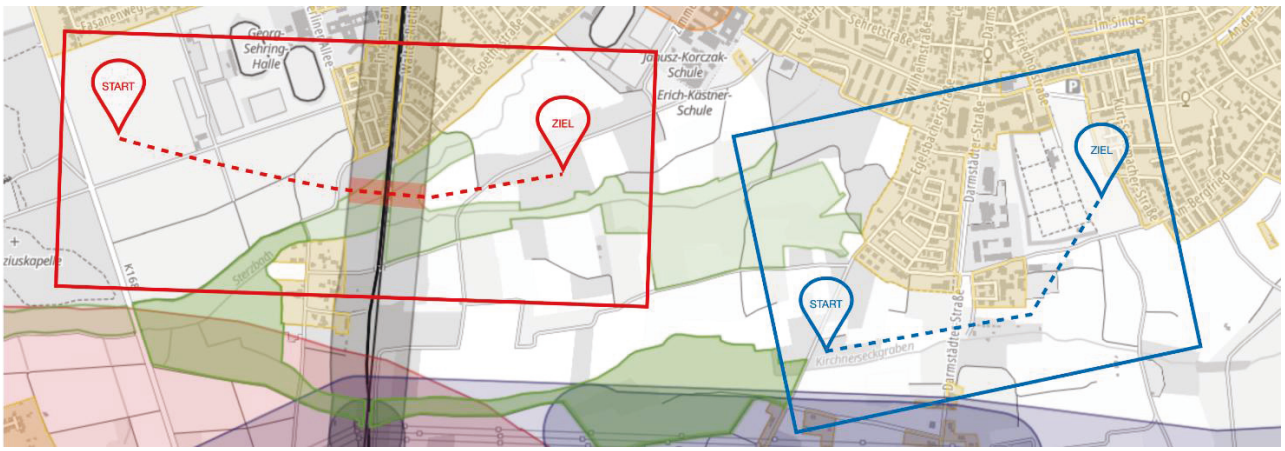


BILD 1. Beispielhafte Routenplanung in definierten Operationsgebieten, rote Operation mit einer erzwungenen Kreuzung von geografischen Gebieten und blaue Operation mit einer möglichen Route durch freien Luftraum (Quelle: BMV/dipul, GeoBasis-DE/BKG)

Viele bestehenden Veröffentlichung zum Thema Routenplanung fokussieren sich auf die Planung um statische oder dynamische Hindernisse. Ziel dieser Arbeit ist hingegen ein Konzept zur Bestimmung einer optimierten Route im Kontext von geografischen Gebieten und anderen Operationen, die für Betreiber und Piloten einen sinnvollen Ausgleich zwischen Flugstrecke und Genehmigungsaufwand darstellt. Dieses Konzept wird in den folgenden Kapiteln näher ausgeführt. Das auf diese Einleitung folgende zweite Kapitel stellt die dieser Arbeit zugrunde liegende Problemstellung dar. Das dritte Kapitel beschreibt die angewandten Ansätze und Methoden. Im vierten Kapitel folgen die Vorstellung und Diskussion von Ergebnissen einer ersten Evaluation anhand einer prototypischen Implementierung. Die Arbeit schließt mit einem zusammenfassenden Fazit im fünften Kapitel.

2. PROBLEMBESCHREIBUNG

Die strategische Routenplanung für UAS bildet eine wichtige Grundlage für die Vorbereitung von Operationen vor dem Start. Im Rahmen dieser Arbeit wird dafür angenommen, dass eine geeignete Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen einem Start- und Endpunkt in einem abgeschlossen Operationsgebiet im deutschen Luftraum zu einer gegebenen Zeit gesucht wird. Diese Annahme lässt sich in der Regel auch auf Operationen mit zusätzlichen Zwischenpunkten oder über eine Fläche anwenden, da diese oft als eine Reihe von sequenziellen Punkt-zu-Punkt-Verbindungen abstrahiert werden können. Des Weiteren sollen die Flugstrecke und der Aufwand zur Einhaltung der gesetzlichen Regulierungen minimiert werden. Taktische Flugmanöver wie das Umfliegen von statischen Hindernissen im Gelände oder dynamischen Flugrouten bemannter Luftfahrt werden bei der strategische Routenplanung nicht berücksichtigt. Diese bedürfen einer taktischen Routenplanung durch Betreiber oder Pilot kurz vor oder während der Operation.

Die Grundlage für die strategische Routenplanung bilden die geografischen Gebiete und andere in *ZEUS* hinterlegte Operationen. Die geografischen Gebiete liegen als dreidimensionale Polygonflächen vor, definiert durch die Längen- und Breitengrade ihrer Eckpunkte sowie eine untere und obere Höhenbegrenzung. Bei dynamischen geografischen Gebieten ist zudem die Geltungszeit festgelegt. Der Großteil der geografischen Gebiete ist statisch und ohne zeitliche Begrenzung gültig. Die Daten für die geografischen Gebiete werden durch die Digitale Plattform Unbemannte Luftfahrt *dipul* bereitgestellt [2]. Operationen in *ZEUS* werden in ähnlicher Form über ein Operationsgebiet als Kreis, Polygonfläche oder Polygonzug und die untere und obere Höhenbegrenzung sowie die Geltungszeit definiert. In dieser Arbeit werden die Operationsgebiete als räumlich und zeitlich beschränkte Hindernisse angenommen, die nicht durchquert werden können. Prinzipiell ist aber bei bekannten Flugrouten eine detaillierte Planung mit Kollisionsvermeidung auch innerhalb der Operationsgebiete möglich. Für die strategische Routenplanung ist die Datengrundlage damit räumlich (3D) und zeitlich (1D) festgelegt und kann als 4D-Raum modelliert werden.

Die geografischen Gebiete haben eine große Varianz in Komplexität und Größe. Im Mittel haben die ausgewiesenen Polygonflächen 479 Eckpunkte (σ = 1837,2; min = 4; max = 121580) und decken eine Fläche von 3,4 km² (σ = 66,0 km²; min = 6,6 m²; max = 8117,6 km²) ab. Bei den hinterlegten Operationen kann der Nutzer die Geometrie des Operationsgebiets frei wählen. Um eine hohe Nutzerakzeptanz und eine positive Nutzererfahrung bei der Routenplanung in *ZEUS* sicherzustellen, müssen Routenvorschläge innerhalb einer kurzen Rechenzeit bereitgestellt werden können. Daher wird als Leistungsanforderung definiert, dass auf einem handelsüblichen Arbeitsplatzrechner (MacBook Pro 16" mit Apple M1 Pro und 16 GB Arbeitsspeicher) in einem Operationsgebiet von 100 km² mit 50 geografischen Gebieten eine Route innerhalb von höchstens 10 bis 12 Sekunden berechnet werden kann. Diese Wartezeiten gelten in der kognitiven Psychologie als akzeptabel und ermöglichen es den Nutzern sich weiterhin auf die Aufgabe zu konzentrieren, ohne dass die Interaktion unterbrochen wird [14].

Mathematisch kann die 4D-Routenplanung als ein globales, monokriterielles Optimierungsproblem für ein einzelnes UAS in einer statischen Umgebung aus Raum und Zeit beschrieben werden. Wird die Umgebung durch einen gewichteten Graphen $G = (V, E)$ mit den Knoten V und den Kanten E modelliert, so entspricht die gesuchte Route R dem Pfad

$$R = (s = v_0, v_1, \dots, v_k = t)$$

der den Startknoten s mit dem Zielknoten t verbindet. Die Kostenfunktion $c_e: E \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ ordnet jeder Kante $(u, v) \in E$ nicht negative Kosten zu. Diese Kosten werden sowohl

CC BY 4.0

durch die Kantenlänge l als auch durch den Genehmigungsaufwand $c_v : V \to \mathbb{R}_{\geq 0}$ für das Durchqueren der jeweiligen geografischen Gebiete bestimmt. Für die Gesamtkosten c_a ergibt sich damit

$$c_a(R) = \sum_{i=0}^{k-1} c_e((v_i, v_{i+1})) = \sum_{i=0}^{k-1} f(l_{i,i+1}, e_i, e_{i+1})$$

Das Optimierungsproblem

$$\min_{R \in \mathcal{R}(s,t)} \sum_{(u,v) \in R} c_e((u,v))$$

sucht die Route R, die die Gesamtkosten g minimiert, wobei $\mathcal{R}(s,t)$ die Menge aller Pfade vom Startknoten s zum Zielknoten t im Graphen G bezeichnet.

Aus dieser Beschreibung ergeben sich drei zentrale Problemfelder:

1. Zur systematischen Bewertung des Genehmigungsaufwands für die verschiedenen Klassen von geografischen Gebieten ist eine anwendungsbezogene Heuristik abzuleiten.
2. Für eine effiziente Modellierung des 4D-Raums unter Einbindung komplexer Polygone ist ein geeigneter Ansatz zu wählen. Ein wesentlicher Faktor zur Steigerung der Effizient besteht in der Reduktion der Komplexität von vier auf zwei Dimensionen, um etablierte und leistungsfähige 2D Verfahren verwenden zu können.
3. Für die performante Lösung des Optimierungsproblems sind geeignete Algorithmen zu untersuchen und zu bewerten. Dabei ist zu beachten, dass neben der Gesamtlänge auch die Anzahl der durchquerten geografischen Gebiete den Genehmigungsaufwand beeinflussen.

Die vorliegende Arbeit stellt geeignete Lösungsansätze für diese Problemfelder vor und evaluiert deren Wirksamkeit und Leistungsfähigkeit anhand einer prototypischen Implementierung.

3. METHODEN

Das methodische Vorgehen orientiert sich an den drei identifizierten Problemfeldern. Eine anwendungsbezogene Bewertung des Genehmigungsaufwands und eine effiziente Modellierung des 4D Raums bilden die Grundlage für eine leistungsfähige und praxisgerechte Routenplanung.

3.1. Genehmigungsaufwand

Die systematische Bewertung des Genehmigungsaufwands für die verschiedenen Klassen von geografischen Gebieten stellt eine wesentliche Voraussetzung zur Abschätzung geeigneter Kostenparameter des Optimierungsproblems dar. Um eine anwendungsbezogene Heuristik ableiten zu können, wurde ein Experteninterview mit einem Fachspezialisten der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH (berufliche Erfahrung mit UAS seit 2018; privater Fernpilot von UAS seit 2015; Inhaber des EU-Kompetenznachweises A1/A3 und des EU-Fernpilotenzeugnisses A2) durchgeführt. Im Rahmen des Interviews zeichnete der Fachspezialist aus seiner professionellen Perspektive effiziente Routen von Hand in eine Auswahl exemplarischer Operationsgebiete und beantwortete verschiedene Fragen zur Einschätzung des Genehmigungsaufwands unterschiedlicher geografischer Gebiete.

Anhand der gezeichneten Verläufe und der Erläuterungen des Fachspezialisten lassen sich domänenspezifische Kriterien für effiziente Routen im Rahmen des hier betrachteten Szenarios identifizieren. Eine Route gilt demnach als effizient, wenn unbelegte Bereiche möglichst direkt durchflogen, geografische Gebiete bei Vorliegen geeigneter Alternativen vollständig umgangen, unvermeidbare Querungen auf ein Minimum reduziert und bei mehreren Alternativen die geografischen Gebiete mit dem geringsten zu erwartenden Genehmigungsaufwand gewählt werden.

Hinsichtlich der Bewertung des Genehmigungsaufwands zeigen die Antworten des Fachspezialisten, dass dessen tatsächlicher Umfang von einer Reihe von Einflussfaktoren abhängig ist. Hierzu zählen bereits bestehende Genehmigungen, die Eigenschaften des eingesetzten UAS, die Verfügbarkeit eines zuständigen Ansprechpartners sowie der Zeitpunkt, die Dauer und die Jahreszeit der Operation. Darüber hinaus beeinflusst auch der Generalisierungsgrad geografischer Gebiete den erforderlichen Genehmigungsaufwand. Dieser beschreibt die Diskrepanz zwischen verfügbarer Datenlage und rechtlicher Realität. Besonders deutlich zeigt sich dies am Beispiel von Wohngebieten, bei denen die Daten ganze Siedlungen häufig als zusammenhängende Gebiete ausweisen. Aus rechtlicher Perspektive kann jedoch die Zustimmung einzelner Grundstückseigentümer oder -nutzungsberechtigter erforderlich sein. Eine rein datenbasierte Bewertung kann daher den tatsächlichen Genehmigungsaufwand nur näherungsweise abbilden.

Trotz dieser individuellen Einflussfaktoren wurde der Fachspezialist gebeten, eine allgemeine Einschätzung des zu erwartenden Genehmigungsaufwands für die unterschiedlichen Klassen von geografischen Gebieten vorzunehmen. Die Skala reichte dabei von 1 ("einfach") bis 5 ("schwer"). Die Ergebnisse dieser Einschätzung sind in TABELLE 1 zusammengefasst. Der Aufwand für Naturschutzflächen wird von dem Fachspezialisten als sehr hoch eingestuft, da für diese Gebiete häufig kein direkter Ansprechpartner erreichbar ist. Außerdem haben aufgrund von Setz- und Brutzeiten verschiedener Tierarten Genehmigungen eine saisonale Abhängigkeit oder werden gar nicht erteilt. Für Industrieanlagen oder Behörden existieren hingegen häufig vergleichsweise unkomplizierte Genehmigungswege. Straßen-, Schienen- oder Wasserverkehrswege sind mit einem mittleren Aufwand bewertet, da diese entweder auf sehr kurzem Weg gequert werden oder eine Befliegung in der Regel in Zusammenarbeit mit dem Betreiber erfolgt.

TABELLE 1 enthält neben der Bewertung des Fachspezialisten auch die daraus abgeleiteten Kostenparameter c_i, die zur Lösung des Optimierungsproblems genutzt werden. Diese Kosten stellen dabei eine generalisierte anwendungsbezogene Heuristik dar, die gegebenenfalls durch den Nutzer an die jeweiligen Gegebenheiten der zu planenden Operation angepasst werden müssen. Für in *ZEUS* hinterlegte Operationsgebiete wird der Kostenparameter $c_i = \infty$ festgelegt, um eine Vermeidung dieser Gebiete sicherzustellen.

CC BY 4.0

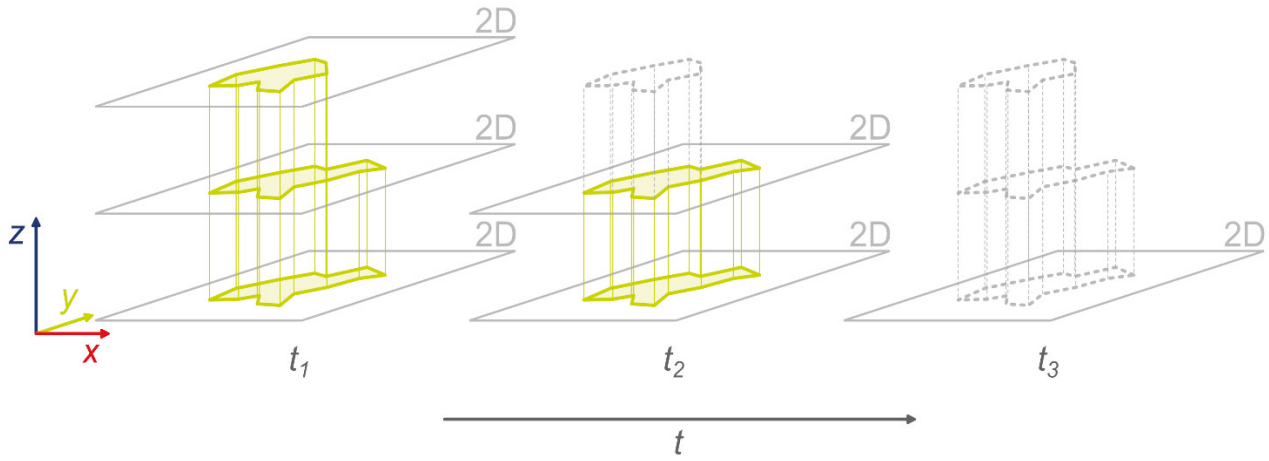


BILD 2. Einschätzung des zu erwartenden Genehmigungsaufwands für die unterschiedlichen Klassen von geografischen Gebieten und die daraus abgeleiteten Kostenparameter c_i

Klasse	Bewertung
Luftverkehr (*rot*)	2 (c_i = 400)
Straßenverkehr (*grau*)	3 (c_i = 600)
Schienenverkehr (*grau*)	3 (c_i = 600)
Schiffsverkehr (*hellblau*)	3 (c_i = 600)
Siedlung (*gelb*)	4 (c_i = 800)
Industrie & Energie-versorgung (*blau*)	2 (c_i = 400)
Einrichtungen & Behörden (*orange*)	2 (c_i = 500)
Naturschutzflächen (*grün*)	5 (c_i = 900)

TABELLE 1: Einschätzung des zu erwartenden Genehmigungsaufwands für die unterschiedlichen Klassen von geografischen Gebieten und die daraus abgeleiteten Kostenparameter c_i

3.2. Modellierung

Die Modellierung des 4D-Raums mit drei räumlichen und einer zeitlichen Dimension bildet die Grundlage der Routenplanung. Eine vollständige 4D-Repräsentation kann aufgrund der hohen Komplexität sowie der Vielzahl geografischer Gebiete und hinterlegter Operationen auch für kleine Operationsgebiete einen erheblichen Rechen- und Speicheraufwand verursachen. Die spezifischen Eigenschaften der hier betrachteten Strukturen ermöglicht jedoch eine signifikante Reduktion dieser Komplexität. Sowohl geografische Gebiete als auch hinterlegte Operationen gelten typischerweise für bestimmte Höhenbänder, beispielsweise von Grund bis 100 m über Grund, und gegebenenfalls für definierte Zeitintervalle, beispielsweise von 09:00 Uhr UTC bis 11:00 Uhr UTC. Die Diskretisierung in der Höhe erlaubt eine Zerlegung des 3D-Raums in mehrere übereinanderliegende 2D-Ebenen, die jeweils ein Höhenband repräsentieren. Darüber hinaus kann unter Ausnutzung der Diskretisierung in der Zeit diese Zerlegung für unterschiedliche Zeitintervalle wiederholt werden. Auf diese Weise lässt sich der gesamte 4D-Raum durch ein System statischer 2D-Ebenen sowie geeigneter Übergänge zwischen diesen modellieren [15]. BILD 2 visualisiert dieses Vorgehen.

Zur Repräsentation der statischen 2D-Ebenen im Kontext des globalen, monokriteriellen Optimierungsproblems werden die drei Ansätze *gleichmäßiges Raster*, *Quaternärbaum* und *Delaunay-Triangulation* untersucht und miteinander verglichen. BILD 3 zeigt die drei Ansätze im direkten Vergleich.

Ein *gleichmäßiges Raster* unterteilt die 2D-Ebene in regelmäßig angeordnete Zellen und bietet eine einfache und potenziell sehr präzise Repräsentation des Raums. Mit zunehmender Auflösung steigt jedoch die Anzahl an Zellen erheblich an, unabhängig von der tatsächlichen Komplexität der betrachteten Strukturen. Im Beispiel von BILD 3 umfasst das *gleichmäßige Raster* in Teilabbildung (a) bei moderater Auflösung bereits 100 Zellen. Dabei werden sowohl belegte als auch unbelegte Bereiche mit der selben räumlichen Auflösung abgedeckt. Zur Bestimmung der Kosten jeder einzelnen Zelle muss auf Überschneidungen mit geografischen Gebieten oder hinterlegten Operationen geprüft werden. Für solch eine Schnittmengenprüfung zweier Polygone ist eine Laufzeit von $\mathcal{O}(n+m)$ zu erwarten.

Ein *Quaternärbaum* [16] reduziert die Anzahl der Zellen durch eine rekursive Unterteilung räumlich komplexer Bereiche. Das dabei entstehende unregelmäßige Raster löst mit jeder Iteration belegte Bereiche höher auf, während unbelegte Bereiche nicht weiter verfeinert werden. Der in BILD 3 beispielhaft dargestellte *Quaternärbaum* in Teilabbildung (b) besteht nach 4 Iterationen aus 88 Zellen und bietet dabei in relevanten Bereichen eine höhere Auflösung als das *gleichmäßige Raster* in Teilabbildung (a) mit 100 Zellen. Trotz der gegenüber *gleichmäßigen Rastern* höheren Effizienz erfordert dieser Ansatz ebenfalls zahlreiche geometrische Schnittprüfungen mit einer Laufzeit von $\mathcal{O}(n+m)$. Zudem kann keine optimale Route garantiert werden, da die Planung üblicherweise über die Mittelpunkte der Zellen erfolgt, die in unbelegten Bereichen auch durch zusätzliche Iterationen nicht weiter verfeinert werden.

Bei der *Delaunay-Triangulation* [17] wird basierend auf den Eckpunkten der Polygone und des Operationsgebiets ein triangulierter Graph erzeugt. Um unbelegte und innere Bereiche besser abzubilden, können mehrere Iterationen der *Delaunay-Triangulation* angewandt werden. Dabei werden die Zentroide der in der vorherigen Iteration gebildeten

CC BY 4.0

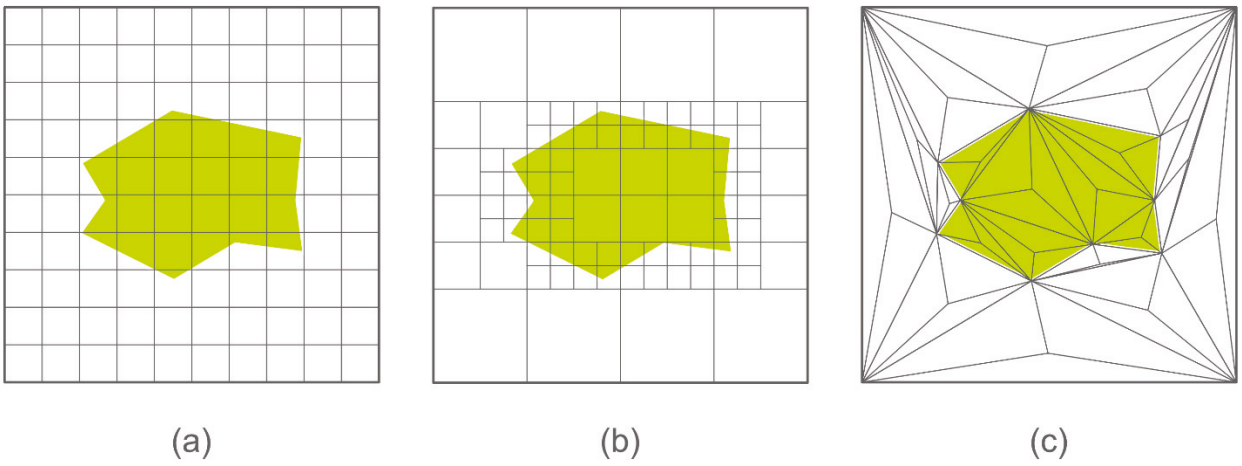


BILD 3. Ansätze zur Repräsentation der 2D-Ebenen *gleichmäßiges Raster* (a), *Quaternärbaum* (b) und *Delaunay-Triangulation* (c)

Dreiecke zur Liste der Eckpunkte hinzugefügt und in der nächsten Iteration verwendet. Das entstehende Netz bildet den Raum als triangulierter Graph aus Knoten und Kanten ab. Große unbelegte Bereiche werden durch die zusätzlichen Stützpunkte unterteilt, um eine ausreichende Auflösung für die spätere Routenplanung sicherzustellen. Das im Beispiel von BILD 3 dargestellte Netz in Teilabbildung (c) enthält nach 2 Iterationen 60 Dreiecke. Im Vergleich zu rasterbasierten Verfahren vermeidet dieser Ansatz geometrische Schnittprüfungen und nutzt stattdessen Punkt-in-Polygon-Prüfungen mit einer Laufzeit von $\mathcal{O}(n)$. Diese asymptotische Komplexität wird prinzipiell auch bei den rasterbasierten Ansätzen erreicht, jedoch sorgt dort die geometrische Komplexität für höhere Laufzeiten.

Der durchgeführte Vergleich der verschiedenen Ansätze zeigt, dass eine auf einer *Delaunay-Triangulation* basierende Repräsentation der statischen 2D-Ebenen das größte Potential für die Lösung des hier betrachteten Problems aufweist. Ein triangulierter Graph vereint eine kompakte Darstellung mit effizienten Rechenoperationen und einer hohen räumlichen Auflösung.

Die geografischen Gebiete und hinterlegten Operationen liegen als Polygone im WGS-84-Format vor und werden für die Berechnungen in das kartesische Web-Mercator-Koordinatensystem transformiert. Eine kartesische Projektion ist notwendig, um geometrische Operationen und Distanzberechnungen ausführen zu können. Das Web-Mercator-Koordinatensystem bietet dabei eine ausreichende Genauigkeit für die betrachteten Operationsgebiete.

Für die Planung der optimierten Route müssen die als triangulierter Graph modellierten geografischen Gebiete und hinterlegten Operationen mit geeigneten Kosten verknüpft werden. Hierfür wird für jeden Knoten des Graphen ermittelt, ob er innerhalb einer Struktur liegt und gegebenenfalls welcher Struktur er zuzuordnen ist. Die Zugehörigkeit wird über eine Punkt-in-Polygon Prüfung bestimmt, wodurch für jeden Knoten ein Satz relevanter Strukturen identifiziert werden kann. Jeder Struktur werden domänenspezifische Kosten zugeordnet, welche den erwarteten Genehmigungsaufwand sowie operationelle Einschränkungen repräsentieren. Liegt ein Knoten innerhalb mehrerer überlappender Strukturen, werden die zugehörigen Kosten kumuliert. Für Knoten, die keiner Struktur zugeordnet sind, wird ein fest definierter Basiswert $c_b = 1$ für die Kosten angesetzt. Die Knotenkosten c_v ergeben sich damit zu

$$c_v(u) = \begin{cases} c_b, & \text{für } k = 0, \\ \sum_{i=1}^{k} c_i\,, & \text{für } k > 0. \end{cases}$$

wobei c_i die Kosten der Struktur i und k die Anzahl der den jeweiligen Knoten umschließenden Strukturen bezeichnet. Die Knotenkosten c_v gehen nicht direkt in die Gesamtkostenc_a ein. Stattdessen werden sie bei der Bestimmung der Kantenkosten c_e berücksichtigt. Diese ergeben sich aus der geometrischen Länge und den Kosten der zugehörigen Start- und Endknoten. Für eine Kante $(u, v) \in E$ mit der Länge $l(u, v)$ sind die Kosten gegeben durch

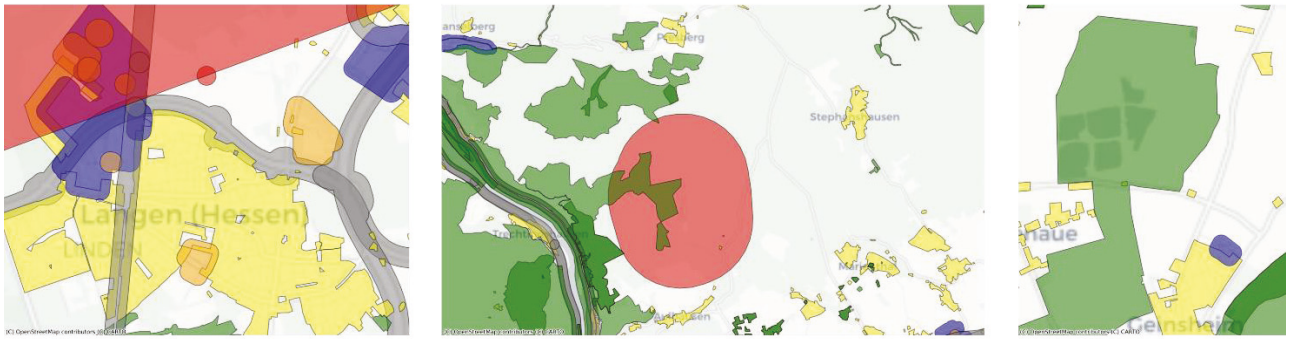
$$c_e((u, v)) = l(u, v) \cdot c_v(u) \cdot c_v(v).$$

Durch diese Formulierung werden Routen durch geografische Gebiete und hinterlegte Operationen mit höheren Kosten belegt als Routen durch unbelegte Bereiche. Die Multiplikation der Länge l mit den Knotenkosten c_v stellt dabei eine konsistente Skalierung der Kosten über unterschiedliche Größen von Operationsgebieten sicher. Der so definierte gewichtete Graph stellt die Grundlage für die Planung der optimierten Route dar.

3.3. Routenplanung

Für die Lösung des vorliegenden statischen, globalen und monokriteriellen Optimierungsproblems zur Bestimmung einer optimierten Route kommen gemäß Literatur verschiedene Algorithmen in Betracht. Zu den häufig eingesetzten und für diesen Anwendungsfall geeigneten Verfahren zählen insbesondere *A** [18], *Theta** [19] und *Lazy Theta** [20]. *A** stellt einen etablierten Suchalgorithmus dar, der durch die Verwendung einer heuristischen Schätzung der verbleibenden Distanz zielgerichtet den optimalen Pfad in einem gewichteten Graphen sucht. *Theta** und *Lazy Theta** erweitern *A** um sogenannte Any-Angle-Pfade, die unbelegte Bereiche direkt durchqueren und glattere Routen erzeugen. Für die Routenplanung stellt dies einen wesentlichen Vorteil dar. Allerdings erfordern beide Verfahren trotz

CC BY 4.0



(a) (b) (c)

BILD 4. Operationsgebiete Langen (a), Rheingau (b) und Geinsheim (c) als Testszenarien für die Routenplanung mit farblich hervorgehobenen geografischen Gebieten (Quellen: BMV/dipul, OpenStreetMap Contributors, CARTO)

vergleichbarer Grundkomplexität zusätzliche Sichtlinien- beziehungsweise Geometrieprüfungen. Experimentelle Untersuchungen mit vorläufigen Implementierungen von *A** und *Theta** in vier verschiedenen Testszenarien auf gleichmäßigem Raster zeigten für *Theta** 38 bis 77 % höhere Laufzeiten, während die resultierende Routenlänge um 3 bis 11 % verkürzt werden konnte.

Um die Laufzeit nur moderat zu erhöhen und gleichzeitig Routen mit weniger unnötigen Richtungswechseln bestimmen zu können, wird das Optimierungsproblem stattdessen mithilfe von *A** in Kombination mit einer nachgelagerten Pfadglättung [18] gelöst. Die Pfadglättung verbindet aufeinanderfolgende Knoten des bestimmten Pfads direkt miteinander, sofern keine Strukturen gekreuzt werden. Dieser Ansatz beschränkt die Sichtlinienprüfungen auf den bereits gefundenen Pfad im gewichteten Graphen und führt so zu einer deutlich geringeren Anzahl zu überprüfender Knoten. Für die heuristischen Schätzung der verbleibenden Distanz wird die euklidische Entfernung zum Zielknoten verwendet.

Die 4D-Routenplanung umfasst damit die folgenden Schritte:

1. Transformation der geografischen Gebiete und hinterlegten Operationen in ein kartesisches Koordinatensystem
2. Zerlegung der Strukturen in 2D-Ebenen
3. Erzeugung der triangulierten Graphen mittels *Delaunay-Triangulation*
4. Verknüpfung der triangulierten Graphen durch Übergangslogik
5. Berechnung der Kosten für Knoten und Kanten
6. Bestimmung des optimalen Pfades im gewichteten Graphen mittels *A**
7. Anwendung der nachträglichen Pfadglättung
8. Bereitstellung der geglätteten Route

Eine erste prototypische Implementierung (Python 3.12[1] mit den Bibliotheken NetworkX[2], Geopandas[3], SciPy[4], NumPy[5] und Shapely[6]) dient zur Validierung des vorgestellten Ansatzes sowie der Überprüfung der definierten Leistungsanforderungen. Dabei werden sämtliche beschriebenen Verfahrensschritte mit Ausnahme der Zerlegung der Strukturen (2) und der Verknüpfung der triangulierten Graphen (4) umgesetzt. Die Auswertung ist daher zunächst auf einzelne 2D-Ebenen beschränkt. Als Standardwerte für die Kostenparameter werden die in TABELLE 1 aufgeführten Abschätzungen verwendet, wobei eine Anpassung durch den Nutzer über eine grafische Benutzeroberfläche möglich ist.

Als Testszenarien werden die drei in BILD 4 dargestellten Operationsgebiete Langen, Rheingau und Geinsheim genutzt. Die Zuordnung der farblich hervorgehobenen geografischen Gebiete ist in TABELLE 1 aufgeführt. Die Operationsgebiete sind unterschiedlich komplex hinsichtlich Fläche und Anzahl der enthaltenen geografischen Gebiete. TABELLE 2 fasst die Merkmale der Testszenarien zusammen. Für jedes Testszenario wird im Rahmen dieser Auswertung eine 2D-Ebene betrachtet und optimierte Routen mittels *A** mit und ohne Pfadglättung bestimmt.

Szenario	Fläche	Gebiete
Langen	14,86 km²	23
Rheingau	94,01 km²	44
Geinsheim	11,37 km²	7

TABELLE 2 Merkmale der als Testszenarien genutzten Operationsgebiete

4. ERGEBNISSE

In allen drei der als Testszenarien verwendeten Operationsgebiete können mit der prototypischen Implementierung Lösungen für das Optimierungsproblem der Routenplanung berechnet werden. Die gefunden Routen sind in BILD 5 abgebildet. Die blauen Verläufe stellen Routen ohne nachgelagerte Pfadglättung dar, während die roten Verläufe die Routen mit nachgelagerter Pfadglättung zeigen. Für die Testszenarien Langen und Rheingau sind Start- und Zielpunkte so gewählt, dass die Operationsgebiete diagonal zu durchqueren sind und eine Kreuzung von geografischen Gebieten unvermeidlich ist. Im Testszenario Geinsheim liegen Start- und Zielpunkt in unmittelbarer Nähe zueinander. Die direkte Verbindung zwischen beiden

[1] https://www.python.org
[2] https://networkx.org/en/
[3] https://geopandas.org/en/stable/
[4] https://scipy.org/
[5] https://numpy.org/
[6] https://pypi.org/project/shapely/

CC BY 4.0

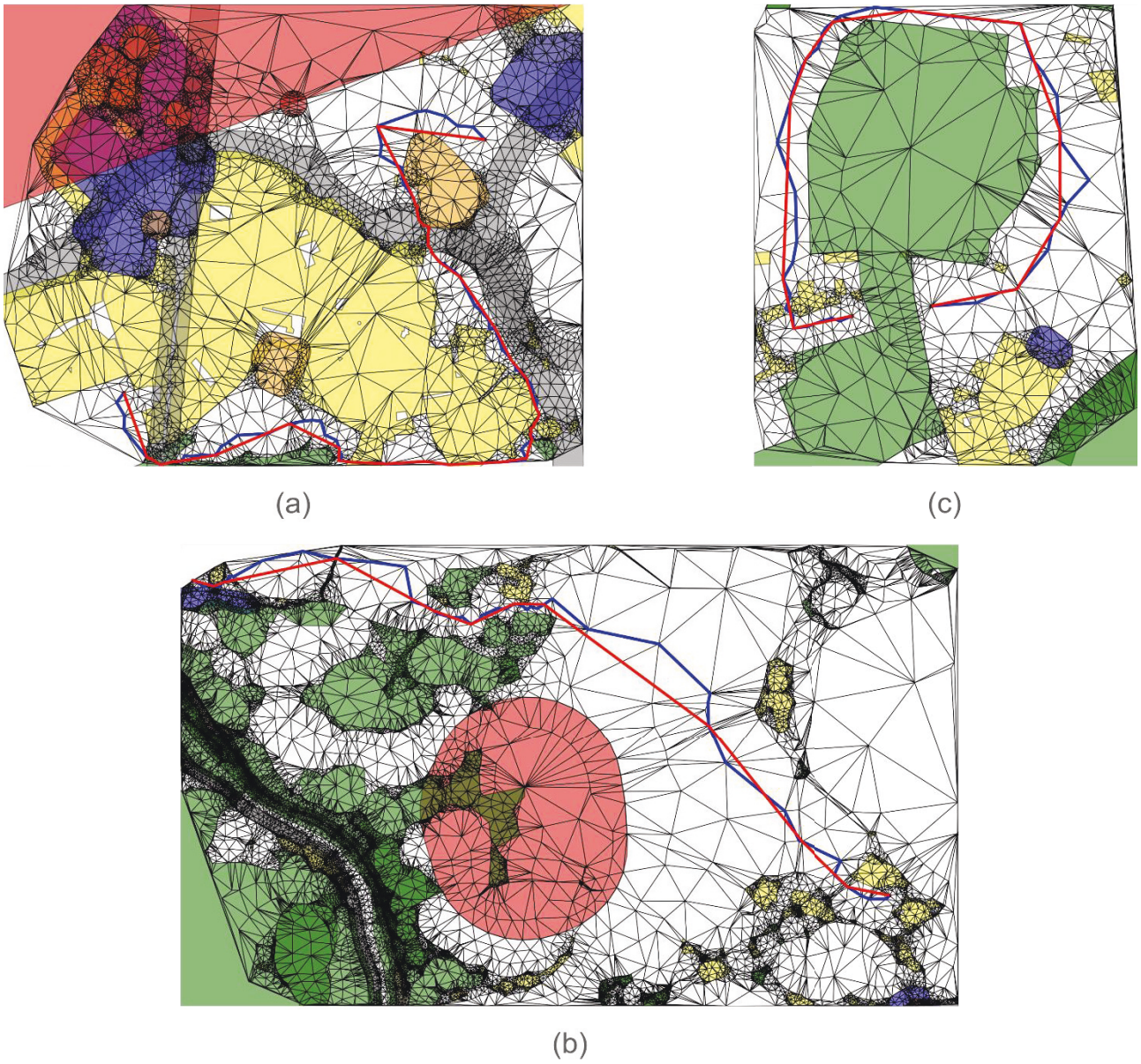


BILD 5. Ergebnisse der Routenplanung für die Operationsgebiete Langen (a), Rheingau (b) und Geinsheim (c), blaue Routen wurden durch *A** ohne Pfadglättung und rote Routen durch *A** mit Pfadglättung bestimmt (Quelle: BMV/dipul)

Punkten verläuft jedoch durch eine Naturschutzfläche. Eine Route durch unbelegte Bereiche, die eine Kreuzung geografischer Gebiete vermeidet, ist möglich, fällt allerdings deutlich länger aus.

Die gefundenen Lösungen verdeutlichen, dass die Routenplanung grundsätzlich die in ABSCHNITT 3.1 genannten Kriterien für eine effizienten Route im Rahmen der gegeben Randbedingungen erfüllt. Unbelegte Bereiche werden nach erfolgter Pfadglättung möglichst direkt durchquert. Vermeidbare Kreuzungen mit geografischen Gebieten werden umgangen und unvermeidbare Kreuzungen sind auf ein Minimum reduziert. Geografische Gebiete mit geringerem zu erwartenden Genehmigungsaufwand werden bevorzugt. Dieses Verhalten zeigt sich besonders deutlich im Testszenario Geinsheim.

Szenario	Laufzeit	Länge
Langen	0,31 s	11,99 km
Rheingau	1,59 s	23,69 km
Geinsheim	0,08 s	12,23 km

TABELLE 3 Ergebnisse triangulierter Graph mittels A* ohne Nachglättung für eine 2D-Ebene

Szenario	Laufzeit	Länge
Langen	0,34 s	11,28 km
Rheingau	1,63 s	20,93 km
Geinsheim	0,09 s	11,71 km

TABELLE 4 Ergebnisse triangulierter Graph mittels A* mit Nachglättung für eine 2D-Ebene

CC BY 4.0

Die Route wird um die mit hohen Kosten verbundene Naturschutzfläche herum geplant, obwohl daraus eine längere Route resultiert. Dieses Ergebnis ist eine direkte Konsequenz aus der gewählten Kostenverteilung. Sollte im jeweiligen Einzelfall eine Querung der Naturschutzfläche erwünscht sein, beispielsweise weil eine Genehmigung bereits vorliegt, könnte der Nutzer den Kostenparameter für Naturschutzflächen gezielt reduzieren und erhielte dann einen entsprechend angepassten Routenvorschlag.

Die Laufzeiten und Routenlängen für die gefundenen Lösungen mit und ohne Pfadglättung sind in TABELLE 3 und TABELLE 4 zusammengefasst. Für die beiden kleineren Testszenarien Langen und Geinsheim erfolgt die Berechnung der Route mit Pfadglättung in der 2D-Ebene mit 0,34 s und 0,09 s deutlich unter einer Sekunde. Beim größeren und komplexeren Testszenario Rheingau liegt die Laufzeit mit Pfadglättung in der 2D-Ebene bei 1,63 s und damit deutlich höher. Die Pfadglättung führt zu 3 bis 13 % höheren Laufzeiten, wobei die resultierende Routenlänge um 4 bis 10 % verkürzt wird. Insbesondere im Testszenario Rheingau ist erkennbar, wie stark die Route in unbelegten Bereichen des Operationsgebiets geglättet und somit verkürzt wird.

Die aufgeführten Ergebnisse beziehen sich alle auf die Auswertung jeweils einer 2D-Ebene. Die in ABSCHNITT 2 genannten Leistungsanforderungen gelten hingegen für allgemeine 4D-Szenarien. Um hier eine geeignete Abschätzung treffen zu können, wird für das Testszenario Rheingau eine räumliche und zeitliche Zerlegung ähnlich zu BILD 2 angenommen. Für diese Zerlegung ist die Berechnung von insgesamt sechs 2D-Ebenen erforderlich, bei denen von einer vergleichbaren Komplexität ausgegangen wird. Die Laufzeit für die nicht implementierten Verfahrensschritte Zerlegung der Strukturen (2) und Verknüpfung der triangulierten Graphen (4) muss ebenfalls berücksichtigt werden und wird pauschal mit 10 % der Gesamtlaufzeit angesetzt. Damit ergibt sich für dieses hypothetische Testszenario einer 4D-Routenplanung eine geschätzte Laufzeit von 10,76 s. Die Leistungsanforderung von höchstens 12 s wird damit eingehalten. Das Testszenario Rheingau liegt allerdings mit einer Fläche von 94,01 km² und 44 geografischen Gebieten leicht unter den Anforderungen von 100 km² und 50 geografischen Gebieten. Die hochgerechnete Laufzeit unterschätzt daher tendenziell die tatsächliche Laufzeit. Neben den generellen Unsicherheiten dieser Abschätzung kann jedoch davon ausgegangen werden, dass eine finale Implementierung in einer nativ kompilierten Programmiersprache eine geringere Laufzeit aufweist als die hier getestete prototypische Implementierung.

Der vorgestellte Ansatz für die Routenplanung erfüllt damit grundsätzlich die ermittelten domänenspezifischen Kriterien und hält die gestellten Leistungsanforderungen ein. Dennoch gibt es Potential für eine Reihe von Verbesserungen.

Der hohe Generalisierungsgrad einzelner geografischer Gebiete wie bei Wohn- oder Industriegebieten schränkt die rechtliche Bewertung der Routenplanung ein. Aufgrund der vorhandenen Datenlage werden beispielsweise Siedlungen als ein zusammenhängendes Gebiet betrachtet, obwohl es rechtlich aus einzelnen Wohngrundstücken besteht. Zudem können nicht alle der in der Luftverkehrs-Ordnung genannten Voraussetzungen berücksichtigt werden. Die berechneten Routenvorschläge sind daher als planerische Unterstützung und nicht als rechtlich abschließende Bewertung zu verstehen.

Die endliche Auflösung des triangulierten Graphen sorgt dafür, dass nicht die theoretisch kürzeste Route gefunden werden kann. Eine Steigerung der Auflösung durch zusätzliche Iterationen der *Delaunay-Triangulation* ist umsetzbar, führt aber zu einer erhöhten Laufzeit. Einen möglichen Lösungsansatz mit geringerem Rechenaufwand könnte die dynamische Anpassung der Auflösung im Umfeld der ermittelten Route darstellen. Des Weiteren gelten die anpassbaren Kostenparameter in der aktuellen Umsetzung für ganze Klassen von geografischen Gebieten. In Einzelfällen kann es jedoch sinnvoll sein, die Kosten für individuelle Strukturen anpassen zu können und so die Routenplanung genauer zu steuern. Die Zusammenfassung der Kostenparameter kann auch dazu führen, dass eine kürzere Route, die mehrere geografische Gebiete kreuzt, besser bewertet wird als eine längere Route, die nur ein einziges geografisches Gebiet durchquert. Der Genehmigungsaufwand wäre für die kürzere Route allerdings potentiell höher. Eine mögliche Lösung für dieses Problem ist die Berücksichtigung der Anzahl von gekreuzten geografischen Gebieten in der Kostenfunktion.

Eine weitere Einschränkung resultiert aus der Transformation der geografischen Gebiete und hinterlegten Operationen in das kartesisches Web-Mercator-Koordinatensystem. Dabei treten geringe Verzerrungen auf, die bei den hier betrachteten Operationsgebieten bis zu einer Fläche von etwa 100 km² als vernachlässigbar angenommen werden können. Bei deutlich größeren Operationsgebieten in der Größenordnung von ganzen Bundesländern haben diese Verzerrungen jedoch signifikanten Einfluss auf die ermittelte Route. Der vorgestellte Ansatz sollte daher nur für lokale Routenplanungen verwendet werden.

5. FAZIT

Das vorstellte Konzept zur 4D-Routenplanung für UAS unter Berücksichtigung von Regulierungen im deutschen Luftraum erfüllt domänenspezifische Kriterien hinsichtlich einer effizienten Route und kann damit eine sinnvolle Unterstützung von Betreibern und Piloten bei der Operationsplanung darstellen. Eine erste prototypische Implementierung in einer interpretierten Programmiersprache mit reduzierten Funktionsumfang hält die gestellten Leistungsanforderungen für ein skaliertes Testszenario ein. Eine finale Implementierung in einer nativ kompilierten Programmiersprache lässt eine darüber hinaus verbesserte Leistungsfähigkeit erwarten

Für die Modellierung des Suchraums erwies sich ein triangulierter Graph auf Basis der Delaunay-Triangulation als geeignete Raumrepräsentation. Die Untersuchung zeigt, dass die Anzahl geometrischer Operationen einen wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Verfahrens besitzt. Aus diesem Grund wurde die Entwicklung des Prototypen auf einen triangulierten Graphen in Kombination mit A* fokussiert. Die Kombination mit dem A*-Algorithmus und einer nachgelagerten Pfadglättung ermöglicht die Berechnung natürlicher Flugrouten bei gleichzeitig geringen Laufzeiten.

Die anwendungsbezogene Heuristik zur Bewertung des Genehmigungsaufwands bildet einen fundierten Anfangswert für die Ableitung der Kostenparameter, die dem Optimierungsproblem zugrunde liegen. Im Einzelfall kann es für

CC BY 4.0

den Nutzer sinnvoll sein, diese Kostenparameter den individuellen Randbedingungen der Operationsplanung anzupassen. Die durch das vorgestellte Verfahren bestimmte Route ist als operationell und rechtlich unverbindlicher Vorschlag zu interpretieren.

Die Modellierung des 4D-Raums mit drei räumlichen und einer zeitlichen Dimension als gewichteter, triangulierter Graph auf Basis der *Delaunay-Triangulation* liefert eine effiziente und hochauflösende Repräsentation. In Verbindung mit dem optimalen Suchalgorithmus *A** und einer nachgelagerten Pfadglättung ermöglicht dieser Ansatz die performante Planung von optimierten glatten Routen.

Neben der Integration von bisher nicht implementierten Verfahrensschritten und den in ABSCHNITT 4 genannten Verbesserungspotentialen gibt es eine Reihe von Ansatzpunkten für die weitere Entwicklung des Konzepts. Die Route wird als Linie ohne räumliche Ausdehnung geplant und berücksichtigt damit keine Sicherheitsabstände zu geografischen Gebieten oder hinterlegten Operationen. Eine Modellierung der Route als Tunnel oder eine Beaufschlagung der Strukturen mit einem Sicherheitsabstand können diese Einschränkung adressieren und eine realitätsnahe Berücksichtigung operationeller Sicherheitsanforderungen ermöglichen. Des Weiteren ist die Ergänzung einer Strategie zur Kollisionsvermeidung in hinterlegten Operationsgebieten anderer UAS eine sinnvolle Erweiterung. Eine wichtige Voraussetzung dafür ist, dass die Routen der betroffenen UAS bekannt und beispielsweise durch eine Segmentierung zeitlich und räumlich modellierbar sind.

Das Konzept und die Implementierung der 4D-Routenplanung für UAS wird im Rahmen der Weiterentwicklung von *ZEUS* fortgeführt und auf eine zukünftige Integration in das Verkehrsmanagementsystem vorbereitet.

6. SCHRIFTTUM

[1] B. Weiß, R. Heidger & A. Kuenz (2024). Detection of UAS Conflicts in Air Traffic over Germany. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK). DGLR e.V.

[2] https://dipul.de/homepage/de/informationen/geografische-gebiete/rechtsgrundlagen aufgerufen am 10.07.2026

[3] V. Chiciudean & F. Oniga (2022). Pathfinding in a 3D Grid for UAV Navigation. 2022 IEEE 18th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP). IEEE.

[4] Y. Chen, M. Hu & L. Yang (2022). Autonomous planning of optimal four-dimensional trajectory for real-time en-route airspace operation with solution space visualisation. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 140, 103701.

[5] B. Chen, S. Lai, C. Chen, P. Shu, S. Chen, Z. Lai & L. Xu (2021). UAV path planning based on improved genetic algorithm. 3rd International Symposium on Robotics & Intelligent Manufacturing Technology (ISRIMT). IEEE.

[6] Y. Katada, T. Kato & N .Nakajima (2026). Route planning of an unmanned aerial vehicle using ant colony optimization for environment including a no-fly zone and obstacles. Artificial Life and Robotics, 31(1), 254-264.

[7] K. Yang & S. Sukkarieh (2008). Real-time continuous curvature path planning of UAVs in cluttered environments. 5th International Symposium on Mechatronics and its Applications. IEEE.

[8] F. Yan, Y. S. Liu & J. Z. Xiao (2013). Path planning in complex 3D environments using a probabilistic roadmap method. International Journal of Automation and Computing, 10(6), 525-533.

[9] M. Alymani, H. Alsolai, M. Maashi, A. Alhebri, H. Alshahrani, F. N. Al-Wesabi, A. Mohamed & M. A. Hamza (2023). Dispersal foraging strategy with cuckoo search optimization based path planning in unmanned aerial vehicle networks. IEEE Access, 11, 31365-31372.

[10] R. A. Saeed, E. S. Ali, M. Abdelhaq, R. Alsaqour, F. R. A. Ahmed & A. M. E. Saad (2023). Energy efficient path planning scheme for unmanned aerial vehicle using hybrid generic algorithm-based Q-learning optimization. IEEE Access, 12, 13400-13417.

[11] H. Bayerlein, M. Theile, M. Caccamo & D. Gesbert, (2020). Multi-UAV path planning for wireless data harvesting with deep reinforcement learning. arXiv preprint arXiv:2010.12461.

[12] A. Puente-Castro, D. Rivero, E. Pedrosa, A. Pereira, N. Lau & E. Fernandez-Blanco (2024). Q-learning based system for path planning with unmanned aerial vehicles swarms in obstacle environments. Expert systems with applications, 235, 121240.

[13] M. Nafees, T. Syeda, A. Ali, H. Farman & M. Tayyab (2026). An in-depth analysis of UAV path planning, including procedures, algorithms, optimization models, and emerging challenges. MethodsX, 103826.

[14] F. Fang-Yi Tan & N. Oded (2026). Counting the Wait: Effects of Temporal Feedback on Downstream Task Performance and Perceived Wait-Time Experience during System-Imposed Delays. Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI). Association for Computing Machinery, 9, 1–17.

[15] A. Li & M. Hansen (2020). Obstacle clustering and path optimization for drone routing. International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT). FAA/EUROCONTROL.

[16] R. Finkel & J. L. Bentley (1974). Quad Trees: A Data Structure for Retrieval on Composite Keys. Acta Informatica, 4 (1), 1–9.

[17] B. Delaunay (1934). Sur la sphère vide. Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS - Classe des Sciences Mathématiques et Naturelles, 6, 793–800.

[18] P. E. Hart, N. J. Nilsson & B. Raphael (1968). A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics (SSC), 4 (2), 100–107.

[19] K. Daniel, A. Nash, S. Koenig & A. Felner (2010). Theta*: Any angle path planning on grids. Journal of Artificial Intelligence Research, 39, 533–579.

[20] A. Nash, S. Koenig & C. Tovey (2010). Lazy Theta*: Any-angle path planning and path length analysis in 3D. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 24 (1), 147–154.

CC BY 4.0