



Technische Universität München  
Ingenieurfaculty Bau Geo Umwelt  
Lehrstuhl für Kartographie  
Leitung Univ.-Prof. Dr.-Ing Liqiu Meng

# Masterarbeit

## Visualisierung von Unsicherheiten in Onroad und Offroad Trajektorien

Sebastian Scherer

**Bearbeitung:** 31. 01. 2018 - 31. 07. 2018

**Studiengang:** Geodäsie und Geoinformation (Master)

**Betreuer:** Dr.-Ing. Christian Murphy

2018



## Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Master's Thesis selbständig und ohne unzulässige fremde Hilfe angefertigt habe. Die verwendeten Literaturquellen sind im Literaturverzeichnis vollständig aufgeführt.

München, den 31. 07. 2018

---

Sebastian Scherer



## Zusammenfassung

GPS-fähige Geräte werden heutzutage täglich verwendet. Einige Beispiele für diese Geräte sind Smartphones, GPS-Uhren und Navigationsgeräte. Das Vertrauen in die Geräte ist dabei meist sehr hoch. Doch wie genau sind eigentlich die GPS-Verortung von Navigationsgeräten, oder wie exakt kann die Distanz einer Joggingroute mit der Tracking-Funktion einer Fitness-Uhr aufgezeichnet werden? Das fehlende Wissen über solche Genauigkeiten und andere Informationen bezeichnet man als Unsicherheiten in Datensätzen. Dabei existieren Unsicherheiten sowohl in Onroad- als auch in Offroad-Daten.

Die vorliegende Arbeit behandelt das Thema der Visualisierung von Unsicherheiten in Onroad- und Offroad-Trajektorien. Dafür werden anhand von zwei Datensätzen (ein Onroad- und ein Offroad-Datensatz) spezifische Fallbeispiele für Unsicherheiten gesucht. Die Onroad-Daten beschreiben Taxifahrten in New York City und die Offroad-Daten enthalten Informationen über die GPS-Flugrouten von Störchen. Aus den beiden Beispielen werden Routen erstellt, die anschließend mit ihren Unsicherheiten in Karten visualisiert werden. Die Unsicherheiten bestehen dabei immer bei der Wegführung zwischen zwei Punkten. Bei den Taxidaten ist es die unbekannte gefahrene Route zwischen zwei Punkten (nur Start- und Endpunkt der Route bekannt) und für die Storchdaten ist es der unsichere Verlauf der Trajektorie in einer GPS-Lücke. Es werden verschiedene Methoden getestet und auf die Eignung für die Unsicherheitsvisualisierung der beiden Datensätzen (Onroad-/Offroad-Datensatz) geprüft. Außerdem wird untersucht, ob signifikante Unterschiede bei der Auswahl und Durchführung der gewählten Designmöglichkeiten für Onroad- und Offroad-Trajektorien bestehen.

Die Ergebnisse der Arbeit klären die Frage über die Eignung und die Unterschiede der gewählten Unsicherheitsvisualisierungsmethoden für Onroad- und Offroad-Trajektorien. Ein Unterschied bei der Unsicherheitsvisualisierung von Onroad- und Offroad-Wegführungen ist bei der Methode der Unsicherheitskorridore zu sehen. Für die Offroad-Visualisierung ist diese Methode gut geeignet, da der Korridor einen Bereich abgrenzt in welchem sich der Storch in einer GPS-Lücke mit höchster Wahrscheinlichkeit befindet. Die Unsicherheiten einer gefahrenen Onroad-Route können mit dieser Methode nicht sinnvoll dargestellt werden, da die Unsicherheiten nicht die Route an sich betreffen (Straßenführung ist bekannt), sondern lediglich nicht bekannt ist welche Route tatsächlich gefahren wurde. Eine weitere Erkenntnis ist, dass es keine allgemeingültige Visualisierungsmethode für Unsicherheiten gibt.



## Summary

Nowadays, GPS-enabled devices are used daily. Some examples are smartphones, GPS watches and navigation systems. The confidence in those devices is usually very high. But how accurate is the GPS-positioning of navigation systems, or how good can the distance of a jogging route be recorded with the tracking function of a fitness watch. The lack of knowledge about those accuracies and other aspects is called uncertainty in datasets. There are uncertainties in onroad data and offroad data.

This thesis deals with the topic of visualization of uncertainties in onroad and offroad trajectories. For this purpose, two records (onroad and offroad) are used to find specific cases with uncertainties. The onroad data describes taxi rides in New York City, while the offroad data contains information about GPS flight routes of storks. Several routes are created out of the two examples. Those routes are later visualized with their uncertainties in maps. The uncertainties always exist in the routing between two points. For the taxi data it is the unknown driven route (only start and end of the route are known) and for the stork data it is the uncertain trajectory in a GPS gap. Various methods are tested for their qualification for uncertainty visualization in both data sets (onroad/offroad data set). Furthermore, it will be examined if there are significant differences in the selection and execution of those visualization techniques for onroad and offroad trajectories.

The results of this thesis solve the question of the qualification and differences of the selected design options. A difference in the uncertainty visualization of onroad and offroad trajectories can be seen in the method of the uncertainty corridors. This method is well suited for offroad visualization because the corridor describes an area where the stork would most likely be in a GPS gap. The uncertainties of a driven onroad route, however, cannot be represented with this method, since the uncertainties do not affect the route itself (road is not uncertain), but it is not known which route was driven. Another insight is that there is no universal visualization method for uncertainties.



## Inhalt

1. Einleitung.....	1
1.1 Aufgabenstellung und Motivation.....	1
1.2 Ziele.....	2
1.3 Methodik und Aufbau.....	2
2. Unsicherheiten in Daten.....	3
2.1 Unsicherheiten im Allgemeinen .....	3
2.2 Unsicherheiten in Raumdaten .....	5
2.2.1 Geometrische Unsicherheiten .....	6
2.2.2 Thematische Unsicherheiten .....	8
2.2.3 Temporale Unsicherheiten .....	9
2.3 Quellen von Unsicherheiten in GPS-Daten.....	10
2.4 Lückenschließung in GPS-Trajektorien mittels Kalman-Filter .....	13
2.5 Visuelle Darstellungsmöglichkeiten von Datenunsicherheiten.....	16
2.5.1 Notwendigkeit und Sinnhaftigkeit der Vermittlung und Darstellung von Datenunsicherheiten .....	16
2.5.2 Darstellungsmethoden für Unsicherheiten .....	19
2.5.2.1 Klassische Darstellungsmethoden für Unsicherheiten .....	19
2.5.2.2 Darstellungsmethoden für Unsicherheiten mit visuellen Variablen .....	22
2.5.2.3 Erweiterte Darstellungsmethoden für Unsicherheiten .....	27
3. Hypothesen zur Unsicherheitsvisualisierung in GPS-Trajektorien.....	33
4. Routenberechnung für Onroad-Daten und Lückenschließung für Offroad-Daten.....	39
4.1 Verwendete Daten.....	39
4.1.1 Onroad-Daten .....	39
4.1.1.1 Dateninhalt.....	39
4.1.1.2 Datenvorverarbeitung und spezifisches Fallbeispiel für Datenunsicherheiten des Onroad-Datensatzes .....	40
4.1.2 Offroad-Daten .....	42
4.1.2.1 Dateninhalt.....	42
4.1.2.1 Datenvorverarbeitung und spezifisches Fallbeispiel für Datenunsicherheiten des Offroad-Datensatzes.....	44
4.2 Berechnung der Onroad-Routen mit ArcGIS .....	45
4.3 Berechnung der Offroad-Route mit einem Kalman-Filter.....	48
5. Darstellungsmöglichkeiten von Unsicherheiten in GPS-Trajektorien anhand der berechneten Routen .....	51



5.1 Darstellung der Onroad-Routen .....	51
5.2 Darstellung der Offroad-Routen.....	63
6. Ergebnisse und Diskussion .....	75
6.1 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse und Hypothesen anhand der erstellten Karten .....	75
6.2 Vergleich von Onroad- und Offroad-Ergebnissen .....	83
7. Fazit .....	87
Quellenverzeichnis .....	89
Abbildungsverzeichnis.....	93
Tabellenverzeichnis .....	94



## 1. Einleitung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die zentrale Aufgabenstellung, die Ziele und den Aufbau der Arbeit.

### 1.1 Aufgabenstellung und Motivation

Fast täglich erfassen wir in unserem Leben Daten mit Raumbezug [Wick, 2013]. Dies geschieht zum Beispiel in „Social Media“- Plattformen, wie Instagram, wenn Nutzer Fotos mit einer Ortsmarke („geo tag“) erfassen [Wick, 2013]. Auch durch das Aufzeichnen der abendlichen Joggingroute mit dem Smartphone entstehen räumliche Daten [Wick, 2013]. Diese Entwicklung der immer mehr werdenden Raumdaten im letzten Jahrzehnt hat eine Vielzahl neuer Forschungsfelder eröffnet [Wick, 2013].

Einer dieser wissenschaftlichen Bereiche ist die Visualisierung von Unsicherheitsinformationen in Raumdaten. Durch die vermehrte Verwendung von immer größeren Datenquellen gerät der Aspekt der Unsicherheit immer mehr in den Fokus [Schiewe, 2016]. Für Fachexperten gibt es dabei bereits eine zwar überschaubare, aber dennoch breitgefächerte Behandlung der Modellierung und Visualisierung von Unsicherheiten [Schiewe, 2016]. Die Zielgruppe der Laien wird aber bei diesem Thema in den meisten Fällen kaum oder gar nicht berücksichtigt [Schiewe, 2016].

Dies liegt vor allem daran, dass keine übergreifende Strategie oder Regelwerke existieren, um räumliche Unsicherheiten darzustellen. Eine allgemeine Methode zur Visualisierung von Unsicherheiten ist aber auch kaum sinnvoll, da es nur eine effektive Lösung geben kann, wenn alle Aspekte, wie zum Beispiel die Art der Unsicherheit in den Daten und der Geometrietyp der darzustellenden Objekte, berücksichtigt werden. In dieser Arbeit sollen die Unsicherheiten von linienhaften Objekten erarbeitet werden. Dazu liegen zwei Datensätze vor. Ein an das Straßennetzwerk gebundener Datensatz von GPS-getrackten Taxis (Onroad-Daten) in New York City und ein Datensatz mit getrackten Zugvögeln (in diesem Fall Störche), welche an keine Straßennetzwerke gebunden sind (Offroad-Daten). Die Unsicherheiten in diesen Datenbeständen, welche größtenteils GPS-Lücken und ungeklärte Routen sind, sollen dazu zunächst geschlossen bzw. ermittelt werden um anschließend mit verschiedenen Methoden visualisiert zu werden. Dabei wird besonders auf die unterschiedlichen Herangehensweisen bei der Bearbeitung der Onroad- und Offroad-Daten geachtet.



## 1.2 Ziele

Das übergeordnete Ziel der Arbeit ist es Designmöglichkeiten von unsicheren Trajektorien in Abhängigkeit von Wahrscheinlichkeitsmodellen, Genauigkeiten sowie On-/Offroad-Wegführungen auszuloten. Hierbei wird explizit auf die Unterschiede zwischen den Onroad-Visualisierungen und den Offroad-Visualisierungen eingegangen. Die Ergebnisse werden dabei kritisch begutachtet und diskutiert. Außerdem werden Probleme erläutert die bei den einzelnen Visualisierungsmöglichkeiten auftreten. Neben den genannten Zielen wird die Arbeit die folgenden drei Hypothesen überprüfen:

- Gibt es geeignete Methoden für die Visualisierung von Unsicherheiten in Onroad-Wegführungen?
- Gibt es geeignete Methoden für die Visualisierung von Unsicherheiten in Offroad-Wegführungen?
- Gibt es signifikante Unterschiede bei der Auswahl und für die Durchführung verschiedener Visualisierungsmethoden von Unsicherheiten in Onroad- und Offroad-Wegführungen?

## 1.3 Methodik und Aufbau

Nach dem einführenden ersten Kapitel folgen in den nächsten Kapiteln die theoretischen Grundlagen für die Arbeit. Kapitel 2 beinhaltet dabei Definitionen und Erläuterungen von Fachbegriffen hinsichtlich Unsicherheiten. Des Weiteren werden Quellen, Darstellungsmethoden und die Notwendigkeit der Darstellung von Unsicherheiten behandelt. Im dritten Kapitel werden die zuvor erläuterten Visualisierungsmöglichkeiten explizit auf die Eignung für Unsicherheiten in räumlichen Daten untersucht. Die nachfolgenden Kapitel beziehen sich dann auf die eigens angefertigten Berechnungen und Visualisierungen. Das vierte Kapitel handelt dabei von den Berechnungen der Taxirouten bzw. von der Lückenschließung in den Storchdaten mittels eines Kalman-Filters. Im folgenden Kapitel werden die verschiedenen Visualisierungsmethoden auf die eigenen Fallbeispiele angewendet. In Kapitel 6 werden die Ergebnisse zusammengefasst und diskutiert. Dabei werden die Unterschiede zwischen Onroad- und Offroad-Visualisierung kritisch betrachtet. Abschließend wird in Kapitel 7 ein Fazit über die gesamte Arbeit abgegeben und ein Ausblick über mögliche zukünftige Arbeiten beschrieben.



## 2. Unsicherheiten in Daten

In diesem Kapitel werden die theoretischen Aspekte von Unsicherheiten in Datenbeständen näher beschrieben. Dazu erfolgt zunächst eine Definition des Begriffs „Daten“. Daten sind im Allgemeinen Angaben oder Werte, die durch Beobachtungen, Messungen und Umfragen erzeugt werden [Univation, 2018]. Aus solchen können dann Informationen über die jeweiligen Themen gewonnen werden [Univation, 2018]. Meist werden Daten auf Festplatten von Rechensystemen gespeichert, auf welchen diese dann weiterverarbeitet werden können [Univation, 2018].

### 2.1 Unsicherheiten im Allgemeinen

„Data is a representation of real life. It’s an abstraction, and it’s impossible to encapsulate everything in a spreadsheet, which leads to uncertainty in the numbers“ [Yau, o.J]. Wie dieses Zitat von Nathan Yau verdeutlicht, ist es nicht möglich alles in Daten zu beschreiben. Aus diesem Grund gibt es sogenannte Unsicherheiten in Datenbeständen. Unsicherheiten beschreiben hierbei immer ein Maß an fehlendem Wissen über das jeweilige Datengebiet [Kinkeldey, o.J].

Ein Beispiel um Unsicherheiten zu beschreiben sind Umfragen welche die ganze Weltbevölkerung betreffen. Wie wahrscheinlich ist es hierbei, dass die so gesammelten Daten der Wahrheit entsprechen [Yau, o.J]? Da immer nur eine bestimmte Anzahl an Personen befragt werden kann, ist nie sicher wie vertrauenswürdig die so gesammelten Daten sind [Yau, o.J].

Um die Frage der Genauigkeit der Umfrage zu beantworten ist es also notwendig die Qualität der Daten zu bewerten. Hierbei kommen Unsicherheitsinformationen zum Einsatz. Unsichere Daten sind Daten, welche fehlerbehaftet sind. Ziel ist es die Fehler zu bewerten um somit die Unsicherheit in Daten einschätzen zu können. Somit kann die Qualität von Daten bewertet werden, was zur weiteren Verwendung der betroffenen Datenbestände von großer Bedeutung ist, da die vorhandenen Unsicherheiten so mit einbezogen und eingeplant werden können.

In der Literatur sind mehrere Kategorien und Unterteilungen der Unsicherheiten von Daten zu finden [Kinkeldey, o.J]. Eine Form der Kategorisierung von Unsicherheiten ist dabei die



Unterteilung in systematische Unsicherheiten und statistische Unsicherheiten (siehe Abb1.)  
[Kinkeldey, o.J].

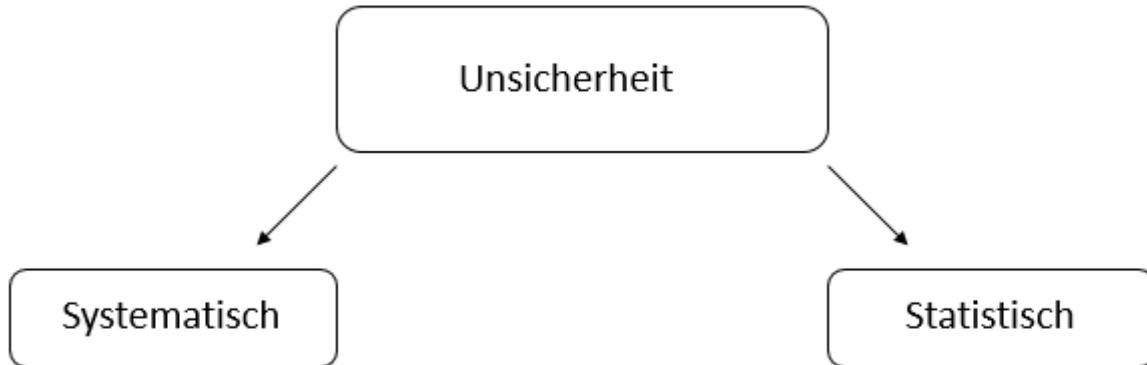


Abbildung 1: Allgemeine Kategorien für Unsicherheiten.

Quelle: Eigene Darstellung

Systematische Unsicherheiten sind hierbei Fehler, die einen bestimmten Grund haben und dieser prinzipiell auch immer zuteilbar ist [Kinkeldey, o.J]. Eine Systematische Abweichung ist dabei immer einseitig gerichtet [Kinkeldey, o.J]. Beispiele sind unzureichende Messungen, schlechte Datenmodelle oder fehlende Daten [Kinkeldey, o.J]. Diese Fehler sind aber alle reduzierbar bzw. teilweise ganz zu eliminieren, falls die Fehler bekannt sind und somit zum Beispiel durch bessere Messungen, mehr Informationen und bessere Modelle verringert werden können [Kinkeldey, o.J].

Statistische Fehler hingegen haben immer unterschiedliche Gründe, welche zufällig erscheinen [Kinkeldey, o.J]. Die Abweichung vom Erwartungswert kann dabei streuen und ist somit schwieriger zu begleichen [Kinkeldey, o.J]. Beispiele hierfür sind Fehler durch den Datensammler (falsches Ablesen von Werten), Fehler bei der Datenbeschaffung und äußere Einflüsse wie Erschütterungen oder andere Störungen während der Informationsbeschaffung [Kinkeldey, o.J]. In der Regel können diese Fehler nicht reduziert werden [Kinkeldey, o.J]. Ausnahme hierbei sind Messungen mit vielen Einzelmesswerten oder Erfahrungswerten, wodurch statistische Tests durchgeführt werden können um somit die Fehler rechnerisch abzuschätzen [Kinkeldey, o.J].



## 2.2 Unsicherheiten in Raumdaten

Auch Raumdaten sind von Unsicherheit betroffen. Raumdaten (auch Geodaten genannt) sind digitale Informationen, welche einen indirekten oder direkten Bezug zu einem bestimmten Standort auf der Erde haben [Inspire-Richtlinien, 2007].

Unsicherheiten in Geodaten umfassen dabei alle Fehler und andere Faktoren, welche Einfluss auf die Genauigkeit und Präzision von Daten und deren Resultaten haben [Kinkeldey, o.J.]. Die Gründe für die Unsicherheiten in Geodaten sind dabei vielzählig. Neben Defiziten bei den Messmethoden, der Durchführung der Messung und der Ausrüstung ist auch die Komplexität der Natur als einer der Gründe für Ungenauigkeiten von Geodaten zu nennen [Kinkeldey, o.J.]. Unzureichende Informationen über das zu überwachende Gebiet sind ebenfalls Fehlerquellen [Kinkeldey, o.J.]. Zuletzt sind fehlerhafte Modelle und Visualisierungsmöglichkeiten als Gründe für unsichere Daten zu erwähnen [Kinkeldey, o.J.].

Wie bei der allgemeinen Unterteilung von Unsicherheiten, gibt es auch bei Unsicherheiten in Geodaten mehrere Ansätze zur Kategorisierung der Fehler. In dieser Arbeit wird die weitverbreitete Objektmodellierungsart der Geoinformationssysteme (GIS) als Grundlage der Strukturierung verwendet [Glemser, 1999]. Die Grundidee liegt darin, die räumlichen Phänomene als Objekte dazustellen [Glemser, 1999]. Diese Objekte bestehen im Wesentlichen aus zwei Komponenten [Glemser, 1999]:

- Geometrie
- Thematik

Die Geometriekomponente enthält die charakteristische Eigenschaft des Raumbezugs, während alle beschreibenden Informationen als Attribute in der Thematikkomponente zu finden sind [Glemser, Klein, 1999]. Zusätzlich zu den beiden genannten Bestandteilen wird auch oft die Zeit (temporaler Aspekt) als dritte Dimension der Objektmodellierung verwendet [Kinkeldey, o.J.].

In den folgenden Abschnitten werden nun anhand dieser drei Komponenten die Unsicherheiten in Geodaten beschrieben.



### 2.2.1 Geometrische Unsicherheiten

Um den Begriff der geometrischen Unsicherheiten zu klären, werden zunächst die Qualitätselemente von Geodaten hinsichtlich der Geometrie aufgezeigt.

Als erstes Element ist die Genauigkeit zu nennen. Sie ist ein Maß der Messungen, welches angibt, bis zu welchem Grad die Messung frei von Verzerrungen ist [Shi, 2010]. Es wird also angegeben, wie nah der gemessene Wert an den wirklichen Wert der realen Welt kommt. Laut der ISO 3534-1 (1993) gibt die Genauigkeit die Ähnlichkeit zwischen dem akzeptierten Referenzwert und dem Testwert an, welcher entweder aus Beobachtungen oder Messungen hervorgeht [Shi, 2010].

Ein weiteres Maß für Qualität ist die Präzision. Es wird beschrieben, wie oft Messungen durchgeführt werden können und immer noch einheitliche Ergebnisse geliefert werden. [Shi, 2010]. Statistisch gesehen ist die Präzision eine Größe für die Streuung und Abweichung der Beobachtungen vom Mittel aus mehreren Messungen [Shi, 2010]. Angegeben wird die Präzision meistens in Form der Standardabweichung [Shi, 2010]. Da es schwierig ist einen exakten Wert (z.B. Koordinate eines Objektes) zu bestimmen, wird häufig anstatt der Angabe von Genauigkeiten die Standardabweichung nach wiederholten Messungen als Maß der Qualität angegeben [Shi, 2010].

Die Zuverlässigkeit von Messungen ist ebenfalls ein wichtiger Faktor der Qualität. Sie gibt an, wie einheitlich einzelne Satzmessungen sind [Shi, 2010]. Somit können teilweise grobe Fehler gefunden und eliminiert werden, wenn eine Messung sich deutlich von den restlichen Messungen unterscheidet [Shi, 2010].

Das letzte Qualitätsmaß, welches hier aufgeführt werden soll, ist die Vollständigkeit der Messungen. Soll zum Beispiel ein Objekt eingemessen werden, müssen ausreichend viele Punkte beobachtet werden um die Geometrie des Objekts beschreiben zu können [Shi, 2010].

Die Qualität von Daten ist maßgebend für Unsicherheiten. Kommt es zu Mängeln bei der Qualität, sind stets die Unsicherheiten des Datensatzes davon betroffen. Durch Fehler kommt es zu schlechterer Qualität und somit zu Unsicherheiten. Oft wird der Begriff Fehler als Synonym für Unsicherheiten verwendet [Kinkeldey, o.J.]. Dies ist aber nicht völlig korrekt. Unsicherheiten können zwar durch Fehler, ebenso jedoch aufgrund von fehlenden Informationen entstehen. Der Begriff Unsicherheit ist also ein neutraler Ausdruck, der unter



anderem Fehler beinhaltet [Kinkeldey, o.J.]. Im Folgendem sollen Fehler bei Messungen als qualitätsmindernde Faktoren und somit als Ursache für Unsicherheiten dargestellt werden. Messfehler sind in drei Kategorien zu unterteilen. Diese sind zufällige Fehler, systematische Fehler und grobe Fehler [Shi, 2010].

Zufällige Fehler sind Abweichungen von Messwerten, die innerhalb von mehreren Messungen unter denselben Bedingungen auftreten [Shi, 2010]. Die Abweichungen entstehen durch Faktoren, welche die Messinstrumente beeinflussen, wie zum Beispiel Änderungen im Messumfeld [Shi, 2010]. Dabei ist es schwierig das Ausmaß der Fehler einzuschätzen, da diese kein regelmäßiges Muster haben [Shi, 2010]. Durch statistische Tests können aber bestimmte Charakteristiken bestimmt werden, falls ausreichend Messmaterial vorhanden ist [Shi, 2010].

Nach mehreren Messdurchläufen kann es zu Abweichungen kommen, welche ein bestimmtes regelmäßiges Muster aufweisen. Diese Art von Fehlern nennt man systematischen Fehler. Zurückzuführen sind die Abweichungen auf die Messausrüstung, wie zum Beispiel Unebenheiten des Lattenbodens bei Nivellierlatten. Normalerweise sind systematische Fehler eliminierbar und da diese meist größere Werte annehmen als zufällige Fehler, ist es auch dringend notwendig sie stets zu beachten. Gängige Methoden zum Reduzieren von systematischen Fehlern sind das Kalibrieren der Messgerätschaft, das Anbringen von Korrekturen und die Verwendung von genaueren Messgeräten. Somit soll die Verfälschung der beobachteten Werte möglichst geringgehalten werden [Shi, 2010].

Als grobe Fehler werden solche bezeichnet, welche durch menschliches Handeln während der Messung oder der Datenverarbeitung entstehen [Shi, 2010]. Auch grobe Fehler sind größer als zufällige Fehler und sind somit auch vorzubeugen. Beispiele für grobe Fehler sind Meterfehler oder Gradfehler beim Ablesen von Werten an den Messgeräten [Shi, 2010]. Ein weiteres Beispiel ist die falsche Übertragung von Werten bei der Datenverarbeitung [Shi, 2010]. Zu erkennen sind diese Abweichungen durch ihre einseitige Verzerrung, die teilweise sehr groß ausfallen kann [Shi, 2010]. Um falsche Ergebnisse im Rechenmodell auszuschließen ist ein sorgfältiger Bearbeitungsstil während der Messkampagne und auch während der Auswertung der Daten einzuhalten. Falls es trotzdem zu groben Fehlern kommt, können diese durch verschiedene Methoden aufgedeckt werden. Dies kann etwa durch Überbestimmung bei den Messungen geschehen oder auch durch robuste Schätzverfahren [Shi, 2010].



Die geometrische Unsicherheit ist also ein Maß für fehlendes Wissen in Hinsicht auf die geometrischen Aspekte von Geodaten, wie zum Beispiel Grenzverläufe, Position von Objekten oder GPS-Koordinaten. Diese sind meist auf die Messungen und Beobachtungen bei der Datensammlung zurückzuführen, können aber auch des Öfteren bei der Datenmodellierung entstehen [Kinkeldey, o.J].

Das Ausmaß der geometrischen Unsicherheit ist dabei im Vorfeld schwierig abzuschätzen, da die Ursachen dafür sehr vielfältig und komplex sind. Nach den Messungen und dem Erstellen des Rechenmodells kann aber über die Angabe der Genauigkeiten und Wahrscheinlichkeiten eine Aussage über die Qualität und somit auch indirekt über die geometrischen Unsicherheiten der gesammelten Daten getätigt werden.

### 2.2.2 Thematische Unsicherheiten

Wie auch die geometrische Unsicherheit ist die thematische Unsicherheit von verschiedenen Qualitätsfaktoren abhängig. Hier ist zunächst die attributive Genauigkeit zu nennen. Sie beschreibt die Abweichung des Attributwertes vom Wert des betroffenen Objekts in der realen Welt [Shi, 2010]. Attribute können dabei vielfältig sein. Handelt es sich bei dem beschreibenden Objekt um ein Gebäude, können die Attribute die Anzahl an Fenstern oder Türen beschreiben oder auch die Farbe des Gebäudes.

Als weiteres Merkmal für Qualität ist die Vollständigkeit aufzuzählen. Hier wird beschrieben ob alle wissenswerten und erforderlichen Attribute für die gewünschte Anwendung der Daten vorhanden sind [Shi, 2010].

Auch die Vertrauenswürdigkeit und die Subjektivität von Daten sind stets zu betrachten [Kinkeldey, o.J]. Bei der Verwendung von Daten, welche nicht selbst beobachtet worden sind, ist es immens wichtig, dass der Ersteller der Daten als vertrauenswürdig oder der Datensatz als plausibel erachtet werden kann, da sonst falsche Daten mit ebenso falschen Attributen zu Unsicherheiten im kompletten Datensatz führen können. Bei der Subjektivität ist dabei zu klären ob es sich bei den Attributen der Daten um Fakten oder Schätzungen handelt [Kinkeldey, o.J] und falls letzteres zutrifft, in welchem Maß diese angenommen werden können. Wenn alle Daten aus eigenen Beobachtungen und Recherchen stammen oder der Datensatz nach Überprüfungen als geeignet angesehen wird, können schlechte Qualität und somit auch die Unsicherheiten im Datensatz vermindert werden.



Thematische Unsicherheiten beschreiben also das Wissen bzw. die Unwissenheit über die nicht geometrischen Attribute von Raumdaten. Auch hier können Unsicherheiten sowohl bei der Datensammlung als auch bei der Verarbeitung dieser entstehen. Der Zusammenhang zwischen Qualität und Fehlern ist auch hierbei eng mit dem Begriff der thematischen Unsicherheit verbunden.

### 2.2.3 Temporale Unsicherheiten

Als letzte Kategorie von Unsicherheiten wird die temporale Unsicherheit aufgezeigt. Diese bezieht sich auf den zeitlichen Aspekt der Daten. Sowohl geometrische Attribute als auch alle anderen Attribute können mit der zeitlichen Dimension ergänzt werden. Dies bedeutet zum Beispiel, dass Grenzen nur zu einem bestimmten Zeitpunkt gültig sind oder dass sich die Anzahl an Fenstern bei einem Gebäude in der Bauphase ständig ändern kann. Der zeitliche Aspekt ist also durchaus wichtig und muss deshalb auch berücksichtigt werden.

Die Bedeutung der temporalen Unsicherheiten wird im Folgenden auch wieder anhand der Qualität und Fehler hinsichtlich zeitlicher Informationen angegeben. Hierbei ist wieder die Genauigkeit aufzuführen. Wie schon bei der geometrischen und temporalen Unsicherheit, ist die Genauigkeit auch hier ein maßgebender Faktor für die Unsicherheiten des zeitlichen Aspekts. Sie beschreibt die Abweichungen von zeitlichen Attributen und die Qualität von zeitlichen Zusammenhängen zwischen mehreren Eigenschaften [Shi, 2010]. Wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, sind weitere Qualitätselemente die Vollständigkeit, die Vertrauenswürdigkeit und die Subjektivität.

Die dritte Form der Unsicherheit zeigt also wiederum den Grad an fehlendem Wissen über zeitliche Informationen. Der zeitliche Aspekt steht dabei jedoch meist in Verbindung mit anderen Attributen, welche in den vorherigen Kapiteln aufgezeigt wurden, verliert aber trotzdem nicht an Wert hinsichtlich der Bewertung von Datensätzen und somit der Beschreibung der Unsicherheiten in den Daten.



## 2.3 Quellen von Unsicherheiten in GPS-Daten

Die Verwendung von GPS-Geräten ist mittlerweile für viele Menschen im Alltag nicht mehr wegzudenken. Sei es in Form des Navigationssystems, des Smartphones oder anderen Geräten, die Technologie des GPS ist in unserer Zeit allgegenwärtig.

Das Prinzip, welches hinter dem Namen des „GPS“ (Global Positioning System) steht ist dabei die Entfernungsbestimmung durch Laufzeiten [Abel, 2001]. Dabei senden Satelliten laufend Datenpakete aus, welche unter anderem die Sendezeit und die augenblickliche Position des Satelliten enthalten [Abel, 2001]. Der GPS-Empfänger auf der Erde bestimmt die Ankunftszeit des Signals und aus der Laufzeit ergibt sich die Entfernung des Satelliten zum Empfänger [Abel, 2001]. Aus drei dieser Messungen kann dann die Position des Empfängers auf der Erde in 2D bestimmt werden [Abel, 2001].

Trotz der raschen Verbreitung von GPS-Systemen, was auch auf die einfache Erfassung von Positionsdaten zurückzuführen ist, wird oft vergessen, dass die mit Hilfe von Satelliten erfassten Punktkoordinaten auf der Erdoberfläche mit Fehlerkomponenten behaftet sind [Wick, 2013]. Teilweise können sogar Lücken in GPS-Trajektorien entstehen. GPS-Trajektorien sind durch GPS aufgezeichnete Bewegungsverläufe. Damit kann die Bewegung eines GPS-Empfängers auf der Erde verfolgt werden. Falls dies an gewissen Standorten auf der Erde nicht möglich ist, entstehen dort Lücken in der GPS-Trajektorie. Das bedeutet wiederum, dass GPS-Daten stets mit Unsicherheiten behaftet sind. Die Quellen und Ursachen für die Unsicherheiten und Fehler werden im Folgenden beschrieben. Dabei wird auch die Erfassung von GPS-Trajektorien miteinbezogen und explizit darauf hingewiesen, welche Fehler zu Lücken in diesen GPS-Verläufen führen können.

### **Sichtbarkeit der Satelliten**

Um die Position eines Punktes auf der Erdoberfläche in 2D exakt zu bestimmen, ist es notwendig, dass das GPS-Gerät Messdaten von mindestens drei Satelliten empfängt [El-Rabbany, 2002]. Ist die dritte Dimension ebenfalls gewünscht werden mindesten vier Satelliten benötigt [El-Rabbany, 2002]. Dabei ist zu erwähnen, dass die Qualität der aufgezeichneten Punkte mit der Anzahl der zur Verfügung stehenden Satelliten steigt [El-Rabbany, 2002]. Kann die benötigte Anzahl and sichtbaren Satelliten nicht gewährleistet werden, ist es nicht möglich den Standort des GPS-Empfängers auf der Erde zu bestimmen.



Dies führt bei der Aufnahme von Bewegungsverläufen zu den vorher erläuterten Lücken in GPS-Trajektorien. Um Fehler und Unsicherheiten in den aufgezeichneten Daten zu verringern/vermeiden, ist also die Sichtbarkeit von ausreichend vielen Satelliten stets zu gewährleisten.

### **Fehlerfortpflanzung durch atmosphärische Effekte**

Da die von den Satelliten gesendeten Signale auf dem Weg zur Erdoberfläche bzw. dem GPS-Empfänger mehrere Schichten in der Atmosphäre durchlaufen, kommt es dabei zu einer Verlangsamung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Strahlen [Klobuchar, 1991]. Diese geschieht hauptsächlich in der Troposphäre und in der Ionosphäre durch die ionisierten Partikel [Klobuchar, 1991]. Der dadurch induzierte Fehler kann aber durch entsprechende Berechnungen, welche die Geschwindigkeitsveränderungen einfließen lassen, minimiert werden [Bhatta, 2010].

### **Uhrenfehler**

Trotz stattfindender Synchronisierung der Uhr des GPS-Empfängers mit den Atomuhren der Satelliten sind stets kleine Fehler in den Daten zu erkennen [Köhne & Wößner, 2014]. Diese sind darauf zurückzuführen, dass die Atomuhren deutlich genauer arbeiten als die Empfängeruhren [Köhne & Wößner, 2014].

### **Umlaufbahnfehler**

Die Umlaufbahnen von GPS-Satelliten sind zwar grundsätzlich äußerst präzise und genau, die Satelliten sind aber ständig den Gravitationskräften der Sonne und auch des Mondes ausgesetzt, weshalb es immer wieder zu Schwankungen der Umlaufbahnen kommt [Köhne & Wößner, 2014]. Durch die sogenannte „Master Control Station“ werden diese Schwankungen kontrolliert und Korrekturdaten berechnet, wodurch der Einfluss der fehlerhaften Umlaufbahnen minimiert werden kann [Köhne & Wößner, 2014].

### **Satellitengeometrie**

Als Satellitengeometrie wird die Anordnung der Satelliten zueinander verstanden [Köhne & Wößner, 2014]. Die Geometrie ist dabei ein kritischer Faktor für die Positionsbestimmung mit dem GPS-Verfahren [Köhne & Wößner, 2014]. So können bei ungünstigen Konstellationen schleifende Schnittpunkte der Signale entstehen, falls sich die verwendeten Satelliten in einer



ähnlichen Richtung hinsichtlich des GPS-Empfängers befinden [Köhne & Wößner, 2014]. Dadurch nimmt die Streuung des Signals zu und eine Punktbestimmung wird somit ungenauer und in manchen Fällen sogar unmöglich (Signalverlust) [Köhne & Wößner, 2014]. Falls mit dem Empfänger Bewegungsverläufe aufgezeichnet werden, führen Signalverluste zu Lücken in den betroffenen Trajektorien. Ein Maß für die Güte der Satellitengeometrie sind die DOP-Werte (Dilution of precision) [Köhne & Wößner, 2014]. Je nachdem welche Daten erzeugt werden sollen gibt es verschiedene DOP-Werte. Die Gesamtgenauigkeit wird dabei durch den GDOP (Geometric Dilution Of Precision) beschrieben [Köhne & Wößner, 2014]. Daneben gibt es noch weitere Werte wie den PDOP (Positional DOP) oder den HDOP und VDOP, welche die horizontale und vertikale Genauigkeit angeben [Köhne & Wößner, 2014].

### **Multipath-Effekt**

Der Multipath-Effekt ist vor allem in urbanem Gebiet wichtig, da dort durch die hohe Anzahl an Objekten der Effekt am stärksten Auftritt [El-Rabbany, 2002]. Beschrieben wird durch „multipathing“ die Reflektion der elektromagnetischen Wellen an Objekten in der Umgebung der GPS-Empfängers [El-Rabbany, 2002]. Dadurch wird das Signal verfälscht, da dieses zeitversetzt durch die verschiedenen Wege der Reflektionen an den Empfänger gelangen [El-Rabbany, 2002]. Dies wiederum wirkt sich auf die Laufzeitberechnung aus, welche die Grundlage für die Positionsbestimmung ist. Aus den beschriebenen Gründen kommt es deshalb insbesondere durch Gebäude und Vegetation zu teilweise beträchtlichen Fehlern in den Positionsdaten [El-Rabbany, 2002].

### **Relativistische Effekte**

Dadurch, dass sich die Satelliten mit ca. 12 000 km/h wesentlich schneller bewegen als Punkte auf der Erdoberfläche, laufen die Uhren der Satelliten von der Erde aus betrachtet langsamer als sie es tatsächlich tun [Köhne & Wößner, 2014]. Zusätzlich läuft die Zeit der Erde gemäß der Relativitätstheorie durch das Gravitationsfeld der Erde schneller [Köhne & Wößner, 2014]. Pro Tag würde diese Zeitverschiebung einen Fehler von ca. 10 Kilometern hervorrufen, weshalb diesem Effekt durch Korrekturen der Uhrenfrequenz entgegengewirkt wird [Köhne & Wößner, 2014]. Diese Korrekturen können die Zeitverschiebung vollständig kompensieren [Köhne & Wößner, 2014].



## 2.4 Lückenschließung in GPS-Trajektorien mittels Kalman-Filter

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, gibt es eine große Anzahl an möglichen Fehlerquellen und Unsicherheiten in GPS-Daten, die zu Signalverlusten führen können. In diesem Kapitel wird kurz eine Möglichkeit beschrieben, mit welcher so entstandene GPS-Lücken durch Berechnungen geschlossen werden können. Die dafür verwendete Methode ist der sogenannte Kalman-Filter. Im Folgenden werden seine Aufgaben und seine Funktionsweise erläutert.

Generell kann der Kalman-Filter in allen dynamischen Systemen eingesetzt werden, in welchen Unsicherheiten bestehen [bzarg, 2015]. Der Filter kann in solchen Fällen Prognosen über das Verhalten des Systems berechnen [bzarg, 2015]. Dazu werden verschiedene Zustände des Systems nacheinander bestimmt [Wasmeier (a),2016]. Dabei ist die Lösung aller Zustände von allen vorherigen Zuständen abhängig, kann aber durch die sogenannte Rekursion auf den Zustand direkt vorher abhängig gemacht werden [Wasmeier (a),2016]. Das Prinzip zur Berechnung der einzelnen Zustände basiert auf einem Filter, der die Zielfunktion durch die Verarbeitung der Eingangssignale (GPS-Messungen) approximiert [Wasmeier (a),2016].

Die folgenden Anwendungsmöglichkeiten sind mit dem Kalman-Filter zu lösen [Wasmeier (a), 2016]:

- Voraussage zukünftiger Zustände (z.B. Navigation)
- Einschränkung von Suchbereichen
- Rechenzeitkritische Anwendungen durch Rekursion (Echtzeit)
- Herausarbeiten relevanter Trends im Zeitbereich bei vorausgesetztem Bewegungsmodell (Filterung)
- Glättung von Messreihen
- Sequentielle Ausgleichung
- **Schließen von Beobachtungslücken durch Prädiktion**



Wie in der Auflistung hervorgehoben wurde, ist es mit dem Kalman-Filter möglich Lücken in GPS-Trajektorien zu schließen.

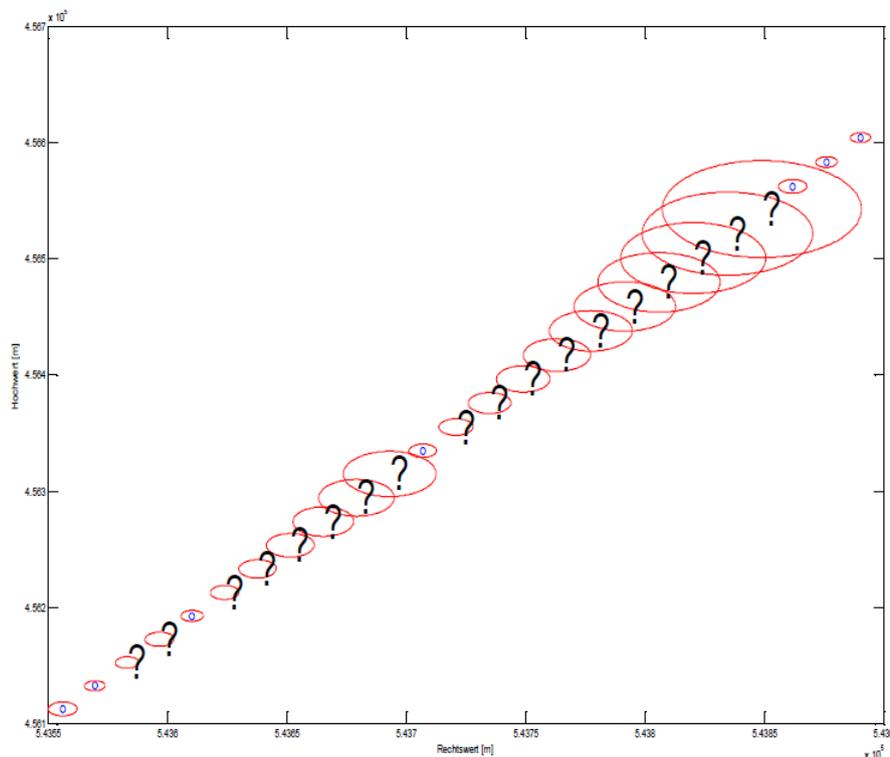


Abbildung 2: GPS-Trajektorie mit Lücken.  
Quelle: Wasmeier(b), 2016

In Abbildung 2 ist eine Trajektorie mit GPS-Punkten zu sehen. Die roten Kreise stellen dabei Fehlerellipsen dar, welche die Genauigkeit der jeweiligen Punkte widerspiegeln. Die Fragezeichen sollen die Lücken in der Trajektorie abbilden. An den Achsen der Graphik ist in x-Richtung der Rechtswert der Punktkoordinaten und in y-Richtung der Hochwert der Koordinaten angegeben. Rechts- und Hochwert werden in dieser Darstellung in Metern (m) angegeben. Ziel ist es die Lücken zu schließen und dabei Aussagen über die Genauigkeit der berechneten Punkte angeben zu können.

Durch einfache Extrapolation ist dies bereits in Echtzeit möglich. Ein Beispiel dafür sind GPS-Fahrzeugpositionen in einem Tunnel [Wasmeier (a), 2016]. Hierbei kann die Genauigkeitsprognose für die Prädiktion häufig sehr ungünstig ausfallen [Wasmeier (a), 2016]. Sobald aber wieder Messwerte eintreffen (am Ende des Tunnels), kann dann wieder sehr schnell die Ausgangsgenauigkeit erreicht werden [Wasmeier (a), 2016]. Ein großes Problem ist jedoch, dass die wahre Trajektorie immer unbekannt bleibt (lediglich Schätzungen sind möglich) [Wasmeier (a), 2016].



Im Postprocessing (Nachbearbeiten von Daten) kann eine Datenlücke durch Interpolation unterschiedlich geschlossen werden [Wasmeier (a), 2016]:

- Lineare Transformation (mit Anfangs- und Endpunkt der Lücke) der Prädiktion
- Polynom- oder Spline- Interpolation
- Kollokation
- **Vorwärts-Rückwärts-Strategie**

Im praktischen Teil dieser Arbeit wird die hervorgehobene Methode der Vorwärts-Rückwärts-Strategie zur Lückenschließung verwendet.

Abschließend soll nochmal der Ablauf eines Kalman-Filters zusammengefasst ausformuliert werden. Für die erste Epoche ist der Zustandsvektor des ersten Punktes bekannt [Pelzer, 1987]. Dieser Zustand wird in die nächste Epoche extrapoliert, was zu einem prädizierten Zustand führt, mit dessen Hilfe in einem zusätzlichen Schritt die Beobachtungsgrößen der aktuellen Epoche prädiziert werden können [Pelzer, 1987]. Somit erhält man einen prädizierten Beobachtungsvektor und kann diesen mit dem gemessenen Vektor vergleichen [Pelzer, 1987]. Aus der Differenz der beiden Vektoren entsteht der Innovationsvektor [Pelzer, 1987]. Mit Hilfe des Innovationsvektors kann dann vom prädizierten Zustand auf die neue Position geschlossen werden [Pelzer, 1987].



## 2.5 Visuelle Darstellungsmöglichkeiten von Datenunsicherheiten

In den beiden folgenden Kapiteln werden die Notwendigkeit der Vermittlung und die Darstellung von Datenunsicherheiten, sowie die möglichen Darstellungsmethoden für Unsicherheiten erläutert. Dabei wird die Thematik vorerst allgemein (bzw. anhand von Medienkarten) behandelt und erst in späteren Kapiteln wird explizit auf das vertiefte Thema der Darstellung von Unsicherheiten in Raumdaten eingegangen.

### 2.5.1 Notwendigkeit und Sinnhaftigkeit der Vermittlung und Darstellung von Datenunsicherheiten

„Without any indication of your confidence in a number, that number is meaningless“ [Holdgraf, 2014]. Wie dieses Zitat von Chris Holdgraf beschreibt sind Werte und Zahlen ohne Sicherheit nutzlos. Die Notwendigkeit der Darstellung bzw. der Vermittlung von Unsicherheiten in Daten wird deshalb im Folgenden anhand des Beispiels von Medienkarten erläutert.

Dazu werden zunächst die häufigsten Arten der Informationsvermittlung von Medienkarten erläutert, da der Informationstyp ein maßgebender Faktor für die Bedeutung der Unsicherheiten ist [Schiewe, 2016]. Die häufigsten Arten der Informationsvermittlung in Medienkarten sind in fünf Kategorien zu unterteilen [Schiewe, 2016]:

- Lokalisierung punkthafter Ereignisse
- Beschreibung von Grenzverläufen
- Beschreibung von räumlichen Bewegungen oder Verläufen
- Darstellung von räumlich verteilten Quantitäten
- Darstellung von räumlich verteilten Qualitäten

Bei der Lokalisierung von punkthaften Ereignissen handelt es sich um die Darstellung von Geschehnissen, welche an einem bestimmten Punkt auf der Erdoberfläche passiert sind, wie zum Beispiel der Ort eines Unglücks [Schiewe, 2016]. Die hier auftretenden Unsicherheiten sind geometrische Unsicherheiten [Schiewe, 2016].

Die Beschreibung von Grenzverläufen kann unter anderem Ländergrenzen oder Grenzen des Einflusses von religiösen Gruppen darstellen [Schiewe, 2016]. Dabei sind wiederum hauptsächlich geometrische Unsicherheiten inhärent [Schiewe, 2016].



Zur Beschreibung von räumlichen Bewegungen und Verläufen zählen zum Beispiel die Flugrouten von verunglückten Flugzeugen oder Trassen für geplante U-Bahnlagen [Schiewe, 2016]. Hier spielen sowohl die Geometrie, als auch die Zeit eine entscheidende Rolle. Daraus resultiert, dass geometrische und temporale Unsicherheiten vorliegen [Schiewe, 2016].

Informationen über räumlich verteilte Quantitäten beschreiben Wahlprognosen und ähnliches [Schiewe, 2016]. Dies bedeutet, dass hier hauptsächlich thematische/attributive Unsicherheiten vorliegen [Schiewe, 2016].

Als letzte Kategorie ist die Darstellung von räumlichen Quantitäten zu erläutern [Schiewe, 2016]. Diese beschreiben zum Beispiel Standorte von verschiedenen Geschäftstypen [Schiewe, 2016]. Hierbei sind in der Regel attributive Unsicherheiten ausschlaggebend [Schiewe, 2016].

Obwohl, wie gerade beschrieben, nahezu alle räumlichen Daten in Medienkarten von Unsicherheit betroffen sind, ist trotzdem vorab die Frage der Notwendigkeit der Vermittlung dieser zu klären. Wichtig ist es dabei, den Nutzungskontext von Unsicherheitsinformationen zu klären [Schiewe, 2016]. Dies ist notwendig für eine aufgaben- und nutzerorientierte Integration von Unsicherheiten in Medienkarten [Schiewe, 2016]. Außerdem ist stets zu klären, ob Informationen über Unsicherheiten verfügbar sind [Schiewe, 2016]. Im Gegensatz zu amtlichen Daten gibt es bei nutzergenerierten Daten häufig nur mangelnde Qualitätsangaben oder in manchen Fällen auch überhaupt keine Aussagen zur Qualität [Schiewe, 2016]. Doch gerade bei unklaren Quellen, wie bei OpenStreetMap oder Social Media wie Twitter, wären Angaben zur Qualität der Daten sinnvoll [Schiewe, 2016].

Ein weiterer Aspekt, welcher hinsichtlich Unsicherheitsinformationen zu beachten ist, ist die erhöhte Komplexität der Daten aufgrund des größeren Informationsgehalts [Schiewe, 2016]. In Medienkarten kann zu viel Komplexität bzw. Information zu einem „Information Overload“ führen, welcher den Betrachter überfordern bzw. den Überblick verlieren lassen kann [Schiewe, 2016].

Inwiefern es notwendig ist Unsicherheitsinformationen zu vermitteln ist auch eine Frage der Betroffenheit der Nutzer [Schiewe, 2016]. So ist es zum Beispiel bei einem Schiffsunglück für nicht betroffene Personen nicht von Bedeutung wo der exakte Unglücksort ist, sondern lediglich die Region des Unglückes und was geschehen ist [Schiewe, 2016]. In diesem Fall sind



Aussagen über Unsicherheiten der genauen Verortung des Schiffwracks nur für Experten und Betroffene von Interesse und sprechen somit nur eine kleine Gruppe der Gesellschaft an [Schiewe, 2016].

Als weiteres Kriterium ist es interessant zu wissen, welches Bewusstsein die Nutzer gegenüber Unsicherheiten in Daten besitzen [Schiewe, 2016]. Am Beispiel von Wettervorhersagen ist aus einer Studie von *Demuth* (2013) bekannt, dass ein gewisses Maß an Bewusstsein hinsichtlich Unsicherheitsinformationen besteht, dieses aber lediglich eine Schwankung von zwei Grad Fahrenheit beinhaltet [Demuth et al., 2013]. Weitere Einschätzungen der Wahrscheinlichkeit der Abweichung von Wetterberichten sind jedoch eher diffus [Demuth et al., 2013]. Abseits von Wettervorhersagen ist aber das Bewusstsein über Unsicherheiten eher noch geringer, was an einer Studie bezüglich der Aktualität von Google Maps Daten deutlich wird [Schiewe, 2016]. Hier konnten die Nutzer kaum einschätzen wie aktuell die Daten sind [Schiewe, 2013]. Hieraus wird ersichtlich, dass die Vermittlung von Unsicherheitsinformationen für viele Personen Neuland ist und somit mit Vorsicht zu behandeln ist.

Ein wichtiger Aspekt ist außerdem das Vertrauen des Nutzers in die Medienkarte oder letztlich in die Informationen selbst [Schweer, 2013]. Wichtiger wird das Vertrauen, wenn ein gewisses Risiko besteht [Schweer, 2013], zum Beispiel, wenn Entscheidungen aufgrund von Informationen getätigt werden [Schiewe & Schweer, 2013]. Daher werden Medien, welche Unsicherheitsinformationen angeben, als ehrlich und hilfreich betitelt [Schiewe & Schweer, 2013]. Allerdings fällt es Menschen generell schwer, unsichere Informationen in ihre Entscheidungen oder als Erkenntnis einzubinden [Schiewe, 2016]. Wird also eine gründliche Recherche in einem bestimmten Gebiet durchgeführt, können Unsicherheitsinformationen durchaus wichtig sein und das Vertrauen in die Daten erhöhen [Schiewe, 2016]. Für einfache Berichte ohne größeren Tiefgang in die Materie können solche Informationen über mögliche Ungenauigkeiten und Unsicherheiten aber dazu führen, dass die breite Masse Quellen mit Unsicherheitsinformationen misstraut [Schiewe, 2016].

Letztlich lässt sich keine eindeutige Antwort auf die Fragen der Notwendigkeit der Vermittlung und Darstellung von Unsicherheitsinformationen geben. Dies liegt daran, dass vor allem die Thematik und die angesprochene Zielgruppe entscheidet ob solche Informationen sinnvoll sind oder nicht. Wird durch die Angabe von Unsicherheiten das Verständnis für die Thematik



verbessert, so können Informationen darüber durchaus auch für die breite Masse interessant sein und nicht nur für Experten im jeweiligen Gebiet.

## 2.5.2 Darstellungsmethoden für Unsicherheiten

Da Unsicherheiten in fast allen Datensätzen existieren, ist es schwierig die Darstellung dieser eindeutig zu kategorisieren. In den folgenden Kapiteln wird dennoch eine Untergliederung in klassische Darstellungsmethoden, visuelle Darstellungsmethoden und erweiterte Darstellungsmethoden erstellt.

### 2.5.2.1 Klassische Darstellungsmethoden für Unsicherheiten

Die folgende Auswahl der Darstellungen für Unsicherheiten wurde aufgrund des häufigen Auftretens dieser Methoden während meiner Recherche im Bereich der Fehlervermittlung gewählt.

#### „Errorbars“

„Errorbars“ werden dazu benutzt, die Genauigkeit von Daten in einem bestimmten Bereich um den jeweiligen Datenpunkt anzugeben. Dabei sind sie als Erweiterung zu sehen, welche zum Beispiel „Scatterplots“ oder Balkendiagramme ergänzen [The Data Visualisation Catalogue, 2018]. Somit können zusätzliche Informationen über Unsicherheiten und Fehler aus den Darstellungen gewonnen werden [The Data Visualisation Catalogue, 2018].

Um diese Informationen zu visualisieren, werden ausgehend vom darzustellenden Punkt Linien gezeichnet (siehe Abb. 3), welche als Maß für die darzustellende Größe gelten. Meist werden Werte wie die Standardabweichung oder minimale und maximale Werte eines Datensatzes angegeben [The Data Visualisation Catalogue, 2018].

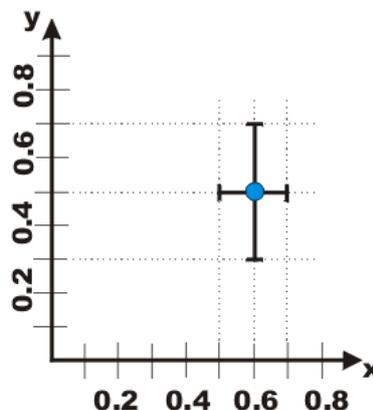


Abbildung 3: "Errorbar" um einen Punkt.  
Quelle: Faraday Physics, 2018



Diese Art der Unsicherheitsvisualisierung wird in der Statistik für thematische Unsicherheiten verwendet, kann aber auch für Darstellung von geometrischen Unsicherheiten verwendet werden.

### Box-Plots

Mit einem Box-Plot werden fünf verschiedene Bereiche dargestellt [Marktforschungs-Wiki, 2018]. In Abbildung 4 sind diese Quantile abgebildet. Diese sind das Minimum (0% - Quantil), das 25% - Quantil (unteres Quartil), der Median, das 75% - Quantil (oberes Quartil) und das Maximum (100% - Quantil) [Potter, 2010]. Meistens wird diese Art der Graphik zum Verteilungsvergleich in Datensätzen verwendet, kann aber auch zur Angabe von Unsicherheiten verwendet werden und somit können zum Beispiel Ausreißer dargestellt oder fehlerbehaftete Punkte erkannt werden [Marktforschungs-Wiki, 2018].

Bei den Box-Plots gibt es eine große Vielfalt an Variationen. So können unter anderem Informationen über die Dichte der Daten oder andere Datencharakteristika, wie zum Beispiel die Größe des Datensatzes, angegeben werden [Potter, 2010]. Box-Plots werden hauptsächlich zur Vermittlung von thematischen Unsicherheiten verwendet.

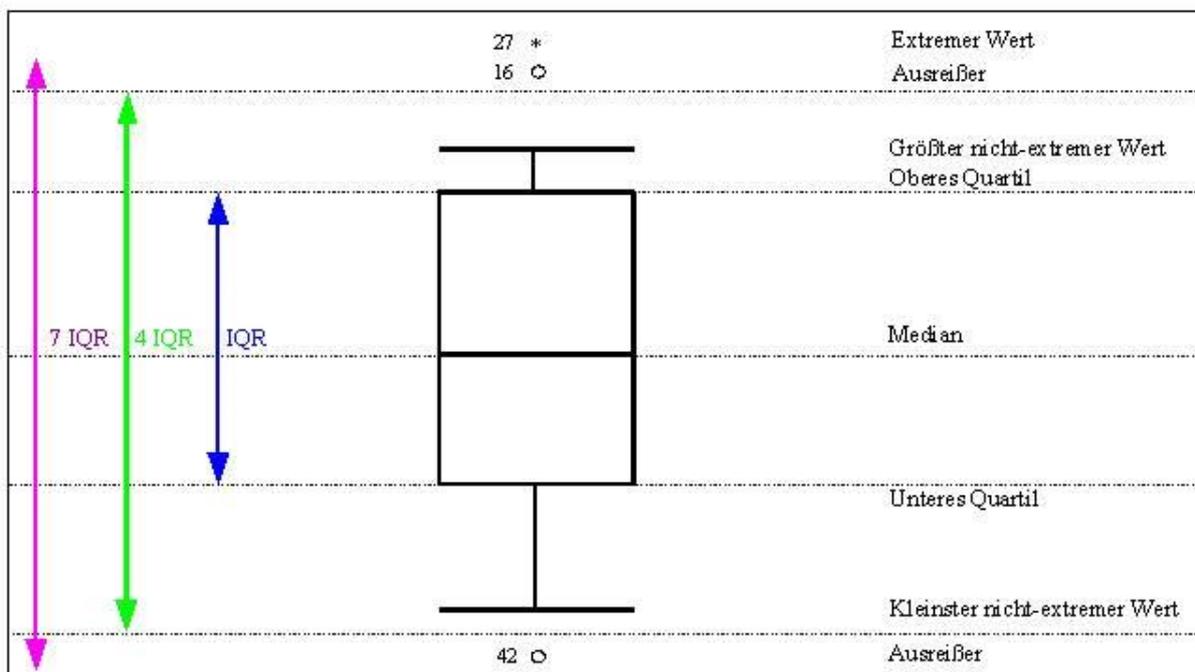


Abbildung 4: Aufbau eines Box-Plots.  
Quelle: Marktforschungs-Wiki, 2018

## Multiple-Outcome-Darstellung

Eine weitere Möglichkeit um Unsicherheiten in Daten darzustellen sind „Multiple Outcome“ – Graphiken [Yau, 2018]. Wie der Name schon beinhaltet zeigen diese Diagramme mehrere Ergebnisse, bzw. Ergebnisbereiche, an [Yau, 2018]. Die Darstellungen sind meistens Liniendiagramme (siehe Abb.5), welche sich in mehrere Linien aufspalten. Somit können Vorhersagen getroffen werden, wie zum Beispiel bei der Wettervorhersage. Vorhersagen sind aber immer mit Unsicherheiten verbunden, folglich werden dadurch auch Unsicherheiten dargestellt [Yau, 2018]. Am Beispiel der Wettervorhersage werden dann die möglichen Temperaturen oder Niederschläge anhand der Linien dargestellt [Yau, 2018]. In diesem Beispiel werden thematische Unsicherheiten vermittelt. Es ist aber auch möglich geometrische Unsicherheiten (z.B. unsichere Trajektorien) darzustellen.

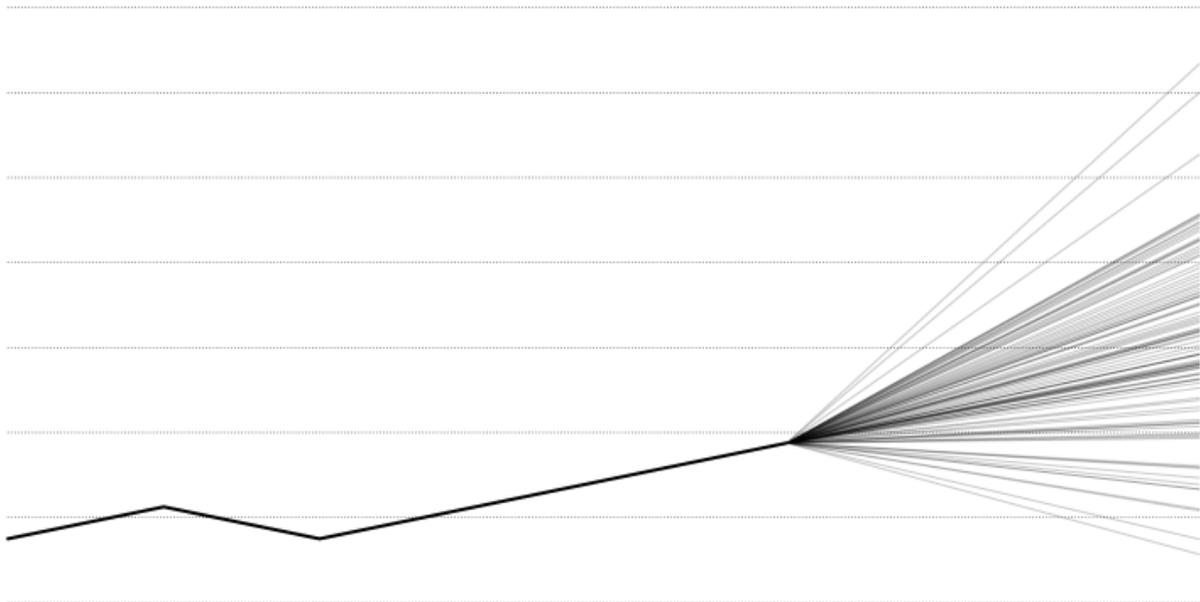


Abbildung 5: "Multiple Outcome" als Liniendiagramm.  
Quelle: Yau, 2018

Ein weiteres Beispiel, welches kein Liniendiagramm ist, ist Abbildung 6. Wie anhand von Abbildung 6 zu sehen ist, werden Prognosen von Abgeordnetenzahlen angezeigt. Neben dem erwarteten Mittelwert werden auch andere Werte durch die farbigen Symbole dargestellt. Dieser Bereich stellt die Unsicherheiten in den Daten dar, da nicht exakt bekannt ist wie hoch die Zahl der Abgeordneten genau sein wird. Auch hier werden thematische Unsicherheiten vermittelt.

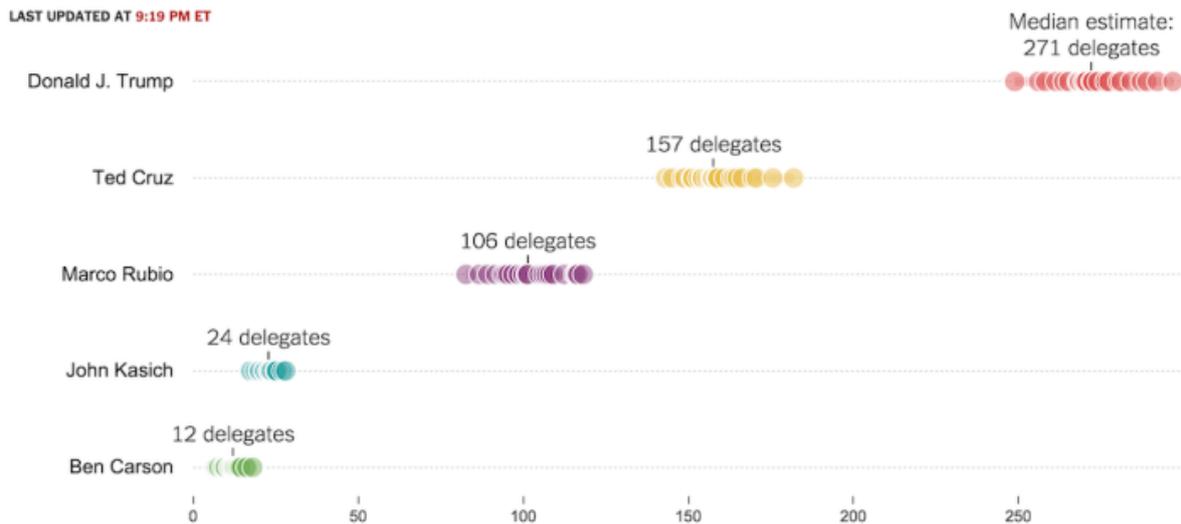


Abbildung 6: "Multiple Outcome" Graphik als Tabelle.  
Quelle: Yau, 2018

### 2.5.2.2 Darstellungsmethoden für Unsicherheiten mit visuellen Variablen

#### Farbton

Durch verschiedene Farbtöne kann die Qualität von Daten visualisiert werden [Tak & Toet, 2014]. Auch Unsicherheiten können durch Farbtöne dargestellt werden. Zwar gibt es keine eindeutig wahrnehmbare Ordnung bei Farbtonskalen wie der Regenbogenskala oder der spektralen Skala, aber bestimmte Farben werden von Betrachtern als mehr oder weniger wahrscheinlich angesehen, auch wenn dieselbe Information dargestellt wird [Tak & Toet, 2014]. Daraus ist ersichtlich, dass Farbskalen im geringen Umfang zur Visualisierung von Unsicherheiten verwendet werden können. Eine Studie belegt, dass dunkle und intensive Farben als sicherer angenommen werden [Tak & Toet, 2014]. Abhängig ist dies jedoch auch vom Kontrast zwischen dem Hintergrund und den dargestellten Informationen [Tak & Toet, 2014]. So werden Farben, die einen hohen Kontrast mit dem Hintergrund haben, als unsicherer angesehen als Farben in einer ähnlichen Farbtonskala [Tak & Toet, 2014]. Im Vergleich zur Sättigung und Helligkeit wird der Farbton aber eher selten zur Visualisierung von Unsicherheiten benützt, was auf die zuvor erwähnte mangelnde Ordnung der Farbskalen zurückzuführen ist [Tak & Toet, 2014]. Grundsätzlich kann aber jegliche Art von Unsicherheit dargestellt werden. Sowohl geometrische, als auch thematische und temporale Unsicherheiten können mit dieser Art der Unsicherheitsvisualisierung vermittelt werden.



## Farbsättigung

Diese Eigenschaft von Farben beschreibt die Qualität der Farbwirkung. Farbsättigung kann ebenfalls zur Darstellung von Unsicherheiten verwendet werden. Das liegt daran, dass eine Verringerung der Farbreinheit automatisch auf minderwertige oder schlechtere Datenqualität schließen lässt (matte Farben werden oft mit unsicheren Daten assoziiert) [Tak & Toet, 2014]. Ein Problem ist aber, dass manchmal gleich stark gesättigte Farbtöne nicht als gleich sicher wahrgenommen werden [Tak & Toet, 2014]. Dies führt dazu, dass der Sättigungsgrad immer an den Farbton angepasst werden muss und keine allgemeinen Werte hinsichtlich der Farbsättigung verwendet werden können [Tak & Toet, 2014]. Zu sehen ist dieser Effekt in Abbildung 7. Betrachtet man den Farbkreis am Rand, ist dort die Farbsättigung maximal. Trotzdem ist die Farbe Grün ein allgemeiner Indikator für „richtig“ oder „gut“. Rot hingegen, auch bei gleicher Sättigung, steht im Gegensatz dazu oft für „falsch“. Wie auch beim Farbton kann durch die Farbsättigung als Visualisierungsmethode für Unsicherheiten, alle 3 Arten von Unsicherheiten dargestellt werden.

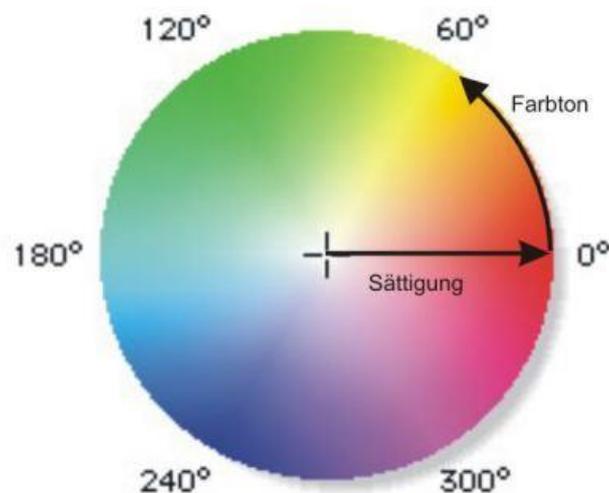


Abbildung 7: Farbkreis mit Sättigung und Farbton.  
Quelle: Homepages, 2018

## Farbhelligkeit

Die Helligkeit einer Darstellung vermittelt intuitiv den Eindruck von Sicherheit oder Unsicherheit [Tak & Toet, 2014]. Es ist bewiesen, dass durch Farbhelligkeit geordnete Datenstrukturen wiedergegeben werden können und außerdem ist bekannt, dass hellere Farben einen sichereren Eindruck hinterlassen als dunklere Farben [Tak & Toet, 2014]. Mit der



Kombination von Farbtönen, welche die Informationen und Werte der Daten darstellen, und der Farbhelligkeit, ist es also möglich mit einfachen Mitteln den Eindruck von sicheren oder auch unsicheren Daten zu vermitteln [Tak & Toet, 2014]. Dabei ist die Darstellung von geometrischen, thematischen und temporalen Unsicherheiten möglich.

### **Transparenz**

Durch das Gestalten von Objekten mit einer gewissen Durchsichtigkeit ist es möglich mit einer gewissen Transparenz geometrische, thematische und temporale Unsicherheiten darzustellen [Jaarsveld, o.J.]. Diese Methode ist vor allem deswegen nützlich, da es zu keiner Überfüllung oder Unordnung in Abbildungen kommt. Zusätzlich erlaubt Transparenz dem Beobachter durch das Element hindurch zu sehen, was dem Nutzer zu mehr visuellen Informationen verhilft [Jaarsveld, o.J.]. Außerdem ist es einfach die Grenze zwischen genauen und ungenauen/unsicheren Daten und Objekten zu veranschaulichen [Jaarsveld, o.J.]. In Abbildung 8 ist eine mittelalterliche Kirche abgebildet, welche auf ihren jetzigen Ruinen steht. Es ist für den Nutzer ersichtlich, dass die Ruinen auf sicheren Daten basieren und die modellierte Kirche aufgrund der Transparenz als unsicher anzunehmen ist [Jaarsveld, o.J.]. Diese Darstellungsmethode ist vor allem zum Schließen von Lücken in Objekten nützlich [Jaarsveld, o.J.]. Der Nutzer kann das Objekt durch die transparente Ergänzung als eine Einheit erkennen, merkt aber auf den ersten Blick, dass der transparente Teil aus unsicheren Daten stammt [Jaarsveld, o.J.].



*Abbildung 8: Transparente Darstellung einer mittelalterlichen Kirche.  
Quelle: Jaarsveld, o.J.*



## Auflösung

Durch niedrige Auflösung kommt es zu einer verpixelnden Darstellung. Für das menschliche Auge ist dies ein Indiz dafür, dass etwas nicht stimmt [Jaarsveld, o.J.]. Daher assoziieren Nutzer verringerte Auflösung automatisch mit unsicheren Daten [Jaarsveld, o.J.]. Die Visualisierung von mehr oder weniger großen Unsicherheiten lässt sich mit dem Grad der Unschärfe ebenfalls leicht aufzeigen [Jaarsveld, o.J.]. In Abbildung 9 ist dieser Effekt verdeutlicht. Links sieht man einen Flussverlauf, der deutliche Grenzverläufe hat, in einer größtenteils hohen Auflösung. Die niedrige Auflösung auf der rechten Seite lässt die Grenzen verschwimmen und vermittelt so den Eindruck von ungenauen und unsicheren Informationen des Objekts.

Die Methode der Auflösung zur Unsicherheitsvisualisierung wird hauptsächlich für geometrische Unsicherheiten verwendet. Hier werden vor allem Unsicherheiten in Grenzverläufe oder Bewegungsverläufe dargestellt.

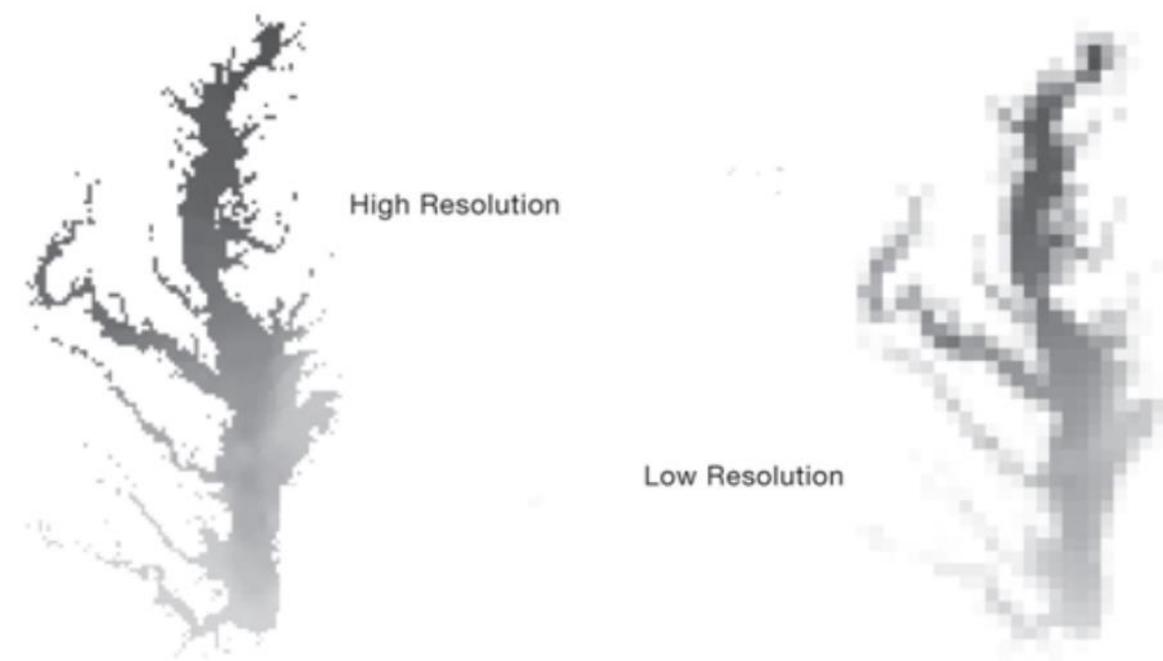


Abbildung 9: Flussverlauf in hoher und niedriger Auflösung.  
Quelle: MacEachren, 1992



## „Fog“ (Nebel)

Indem man unsichere Stellen (z.B. in Karten) schlechter sichtbar macht, kann der Eindruck von Unsicherheiten übermittelt werden [MacEachren, 1992]. Dazu wird ein sogenannter Nebel verwendet. Je dichter dieser ist, desto unsicherer sind die Daten im überdeckten Bereich [MacEachren, 1992].

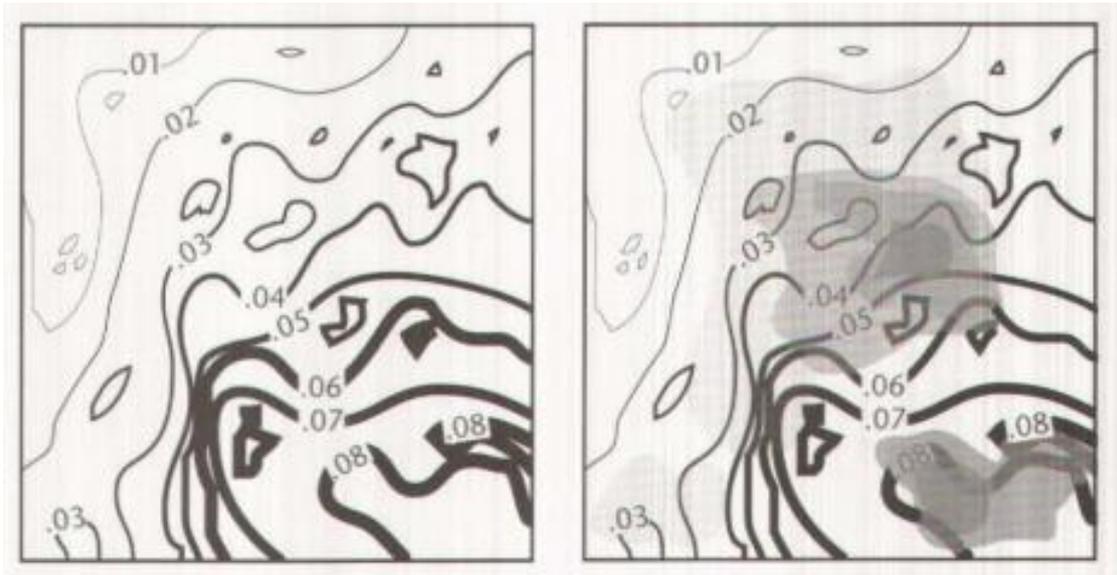


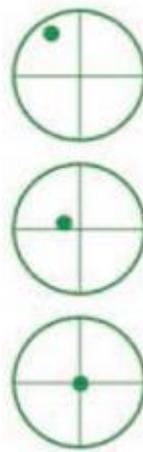
Abbildung 10: Darstellung einer Karte mit und ohne Nebel.  
Quelle: MacEachren, 1992

In Abbildung 10 wird dieser Effekt durch die Gegenüberstellung einer Karte ohne Nebel mit einer Karte, in welcher Nebel vorzufinden ist, veranschaulicht. Für einen Nutzer ist es in der rechten Karte deutlich zu erkennen, dass sich in den überdeckten Bereichen geometrische Unsicherheiten befinden. Ebenfalls wird durch den Grad der Überdeckung die Größe der Unsicherheit wiedergegeben. Durch Nebel werden hauptsächlich geometrische Unsicherheiten dargestellt.

### 2.5.2.3 Erweiterte Darstellungsmethoden für Unsicherheiten

#### **Glyphen**

Glyphen sind Symbole die zur Visualisierung von Parametern wie Ort, Größe, Form oder Orientierung verwendet werden [Jaarsveld, o.J.]. Aufgrund der Vielfältigkeit der Symbole können diese auch zur Darstellung von Unsicherheiten verwendet werden. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 11 zu sehen. Die Genauigkeit der Position des darzustellenden Punktes wird durch das Fadenkreuz angegeben. Somit ist ersichtlich, dass das dargestellte Objekt mit geometrischen Unsicherheiten behaftet ist.



*Abbildung 11 Genauigkeitsangabe mit Hilfe einer Glyphe.  
Quelle: Kinkeldey, o.J.*

Betrachtet man das oberste Symbol, ist zu erkennen, dass bei diesem der Punkt am weitesten von der Mitte des Fadenkreuzes entfernt ist. Das bedeutet wiederum, dass die geometrische Unsicherheit bei dieser Position am größten von den drei abgebildeten Glyphen ist. Je näher also der Punkt in der Mitte des Fadenkreuzes ist, desto weniger sind die Daten in diesem Bereich mit geometrischen Unsicherheiten behaftet.

Aufgrund der Vielfältigkeit von Glyphen ist es auch möglich thematische und temporale Unsicherheiten in Daten darzustellen.



## Füllmuster

Ein weiteres Beispiel ist es Objekte mit Texturen zu versehen. In Abbildung 12 ist diese Möglichkeit der Unsicherheitsvisualisierung dargestellt. Die Striche in den Kreisen werden dabei von oben nach unten immer gleichmäßiger und lassen so einen geordneten und sichereren Eindruck entstehen. Durch die ungeordnete Textur des oberen Kreises lässt sich somit der Eindruck von unsicheren Daten übermitteln.



Abbildung 12: Texturen zur Darstellung von unsicheren Daten.  
Quelle: Kinkeldey, o.J.

Eine Methode, welche ebenfalls unter die Rubrik der Füllmuster fällt, ist die „Fill Clarity“ (Klarheit der Objektfüllung). Diese ist eine Abwandlung von Texturen. Dabei werden scharfe und geordnete Muster zur Darstellung von sicheren Daten verwendet und im Gegensatz dazu weniger definierte und geordnete Muster zur Darstellung von Unsicherheiten in den jeweiligen Daten verwendet (siehe Abb. 13) [MacEachren, 1992].

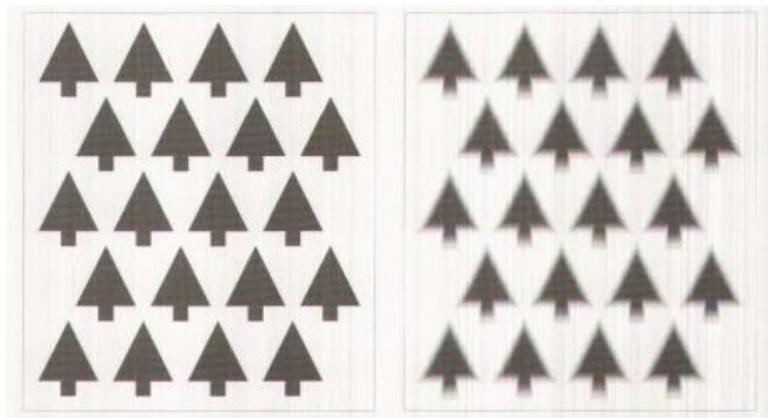


Abbildung 13: Beispiel für die "Fill Clarity".  
Quelle: MacEachren, 1992

Füllmuster werden meist zur Visualisierung von geometrischen und thematischen Unsicherheiten verwendet.

## Konturen

Konturen folgen Linienverläufen von spezifischen Datenwerten [Potter, 2010]. Dies können zum Beispiel Geländekarten oder Grenzverläufe sein [Potter, 2010]. Zur Vermittlung von geometrischen Unsicherheitsinformationen ist die Methode der „Contur Crispness“ hilfreich, da dem Nutzer durch einfache Mittel (z.B. verschwommene Grenzverläufe) unsichere Daten veranschaulicht werden können [MacEachren, 1992]. Abbildung 14 zeigt einen solchen verschwommenen Grenzverlauf („fuzzy borders“).



Abbildung 14: Verschwommener Grenzverlauf zur Darstellung von Unsicherheiten.  
Quelle: Kinkeldey, o.J.

Eine weitere Möglichkeit mit Konturen unsichere Daten darzustellen ist die sogenannte „sketchiness“ [Kinkeldey, o.J.]. Dabei werden ähnlich wie bei „fuzzy borders“ Linien verändert. Sie werden aber nicht verschwommen dargestellt, sondern „unsauber“ nachgezogen, so dass sie von den sicheren Daten leicht abzugrenzen sind (Abb. 15).

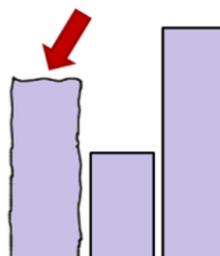


Abbildung 15: "sketchiness" in einem Diagramm.  
Quelle: Kinkeldey, o.J.

In Abbildung 15 werden thematische Unsicherheiten dargestellt.

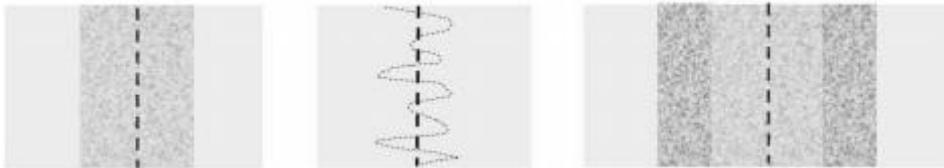


Sollen unsichere Linien (z.B. Grenzlinien oder Verläufe) dargestellt werden, ist die übliche Assoziation die gestrichelte oder gepunktete Linie [Schiewe, 2013]. Generell sollen unsichere Linien nicht scharfe bzw. durchgehend dargestellt werden [Schiewe, 2013].

Aus den genannten Beispielen ist ersichtlich, dass sowohl geometrische als auch thematische Unsicherheiten durch das Verändern von Konturen möglich ist. Es ist aber ebenso möglich temporale Unsicherheiten zu vermitteln.

### **Unsicherheitskorridor**

Gibt es noch weitere Informationen zur Abweichung der unsicheren Linie, so ist es möglich die geometrische Unsicherheit anhand von Unsicherheitskorridoren darzustellen [Schiewe, 2013]. Als Unsicherheitskorridor bezeichnet man dabei Bereiche, in welchen sich unsichere Linien befinden können. Es wird also das Ausmaß der Unsicherheit durch die Form und Art des Korridors angegeben.



*Abbildung 16: Verschiedene Unsicherheitskorridore.  
Quelle: Schiewe, 2013*

In Abbildung 16 werden drei verschiedenen Möglichkeiten dargestellt, wie ein solcher Unsicherheitskorridor visualisiert werden kann. Der erste Korridor ist dabei ein einfacher Unsicherheitskorridor der durch eine texturierte Fläche abgebildet wird [Schiewe, 2013]. Im mittleren Fall wird der Korridor durch den gezackten Linienvorlauf dargestellt [Schiewe, 2013]. Und das Bild ganz Rechts, beschreibt einen abgestuften Korridor, in welchem die geometrische Unsicherheit nach außen zunimmt [Schiewe, 2013].



## Vektoren

Vektoren können eine Verschiebung darstellen und werden häufig als Vektorfelder in Medienkarten verwendet um Richtungen von Bewegungen anzugeben [Mikael, Aro, o.J.]. Vektoren sind aber auch mit Unsicherheiten behaftet [Mikael, Aro, o.J.]. Diese wirken sich auf die Richtung und Größe der Vektoren aus, die meist durch Pfeile dargestellt werden [Mikael, Aro, o.J.] In Abbildung 17 sind verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt, wie Vektorpfeile so dargestellt werden können, damit der Nutzer sieht, dass es sich um unsichere Daten handelt. So wird in der letzten Zeile durch den umrandeten Pfeil verdeutlicht, dass sich die Bewegung in die Richtung dieses Sektors stattfindet. Durch den nicht gradlinigen Pfeilhals in der zweiten Zeile soll dargestellt werden, dass die Größe der Bewegung nicht eindeutig bekannt ist.



Abbildung 17: verschiedene Darstellungsmöglichkeiten von Unsicherheiten für Vektorpfeile.  
Quelle: Mikael, o.J.





### 3. Hypothesen zur Unsicherheitsvisualisierung in GPS-Trajektorien

Die folgenden Kapitel werden sich nur noch mit der Thematik der geometrischen Unsicherheiten in linienhaften Objekten beschäftigen, da diese das Hauptaugenmerk der Visualisierungstechniken dieser Arbeit sein sollen. Dazu werden die in Kapitel 2 beschriebenen Visualisierungsmethoden hinsichtlich ihrer Effektivität und Nutzbarkeit für die Visualisierung von Unsicherheiten in GPS-Trajektorien getestet. Die Ergebnisse davon werden im praktischen Teil der Arbeit anhand von eigens erstellten Karten überprüft.

Da „Errorbars“ in der Vermittlung von geometrischen Unsicherheiten nur für punkthafte Objekte verwendet werden können, wird diese Methode nicht weiter behandelt.

Die Verwendung von „Box-Plots“ ist generell als ungeeignet für die Visualisierung von Unsicherheitsinformationen in GPS-Trajektorien anzusehen. Die Anbringung eines „Box-Plots“ ist also für linienhafte Objekte nicht sinnvoll. „Box-Plots“ finden deshalb meist nur in der Statistik Anwendung.

„Multiple Outcome“-Darstellungen sind bedingt geeignet um räumliche Unsicherheiten in linienhaften Objekten darzustellen. Dabei können die verschiedenen Möglichkeiten so ausgelegt werden, dass sie den Bereich, in welchem sich das darzustellende Objekt wahrscheinlich befindet, abdecken und somit Unsicherheiten vermittelt werden können. Ein Beispiel dafür sind linienhafte GPS-Trajektorien. Wenn in einem bestimmten Abschnitt die Positionierung nicht mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden kann, können in diesem Abschnitt mehrere Trajektorien abgebildet werden um mögliche Verlaufsszenarien darzustellen. Es bleibt aber trotz der offensichtlichen Darstellung von Ungenauigkeiten und Unsicherheiten unklar, wie gravierend die dargestellten Fehler sind.

Verschiedene Farbtöne zur Visualisierung von GPS-Unsicherheiten zu verwenden ist die einfachste Methode unsichere Informationen in linienhaften Objekten zu vermitteln. Der Grund dafür ist (wie in Kapitel 2 schon beschrieben), dass für Nutzer durch intensivere Farben der Eindruck von sicheren Informationen entsteht, wobei weniger hervorstechende Farben dagegen als unsicher eingestuft werden [Tak & Toet, 2014]. Dies liegt wohl daran, dass intensive Farben mehr hervorstechen und somit leichter wahrgenommen werden als andere Farbtöne, welche teilweise erst bei genauerem Betrachten deutlich wahrgenommen werden können. Ein weiterer Faktor bei der Visualisierung mit Farbtönen ist der Kontrast zum



Hintergrund, wobei hier Farbtöne mit großen Kontrast zum Hintergrund als unsicher eingestuft werden [Tak & Toet, 2014]. Ein Vorteil der Visualisierung von GPS-Unsicherheiten mit Hilfe von verschiedenen Farbtönen ist, dass die Darstellungen sehr einfach gehalten werden können und somit die Abbildungen nicht überfüllt oder stark bearbeitet wirken. Der Nachteil dieser Methode ist aber unter anderem die fehlenden Abstufungen für mehr oder weniger unsichere Informationen. Da den Farbtönen eine geordnete Farbskala fehlt [Tak & Toet, 2014], ist es schwierig unsichere Informationen in Kategorien zu unterteilen, welche den Grad der Unsicherheit beschreiben würden. Aus den genannten Gründen wird der Farbton als Visualisierungsmethode für Unsicherheiten generell eher selten verwendet [Tak & Toet, 2014] und ist auch für die Visualisierung von GPS-Unsicherheiten nicht die beste Methode.

Ähnlich wie mit Farbtönen ist es auch bei der Verwendung der Farbsättigung möglich Unsicherheiten in GPS-Daten von linienhaften Objekten darzustellen. Die Farbsättigung wird auch oft als Farbreinheit bezeichnet und wenn diese verringert wird, werden die abgebildeten Objekte automatisch als schlechter oder als Objekte von minderwertiger Qualität bezeichnet [Tak & Toet, 2014]. Durch diesen Effekt ist es möglich Unsicherheiten darzustellen. Die schlechtere Qualität wird als Indikator für Unsicherheiten in den GPS-Trajektorien verwendet. Das bedeutet, je niedriger die Farbsättigung des Objekts ist, desto höher ist auch die Unsicherheit des Objekts. Der Vorteil dieser Visualisierungsmethode ist die intuitive Wahrnehmung der Unsicherheit durch die Farbreinheit von Objekten [Tak & Toet, 2014]. Es sind also keine aufwendigen Methoden zur Darstellung von unsicheren Informationen notwendig. Im Gegensatz zum Farbton, ist hier ein geordneter Übergang von hoher zu niedriger Farbsättigung vorhanden. Das Problem hierbei ist, dass selbst bei gleichem Sättigungsgrad die Objekte abhängig vom Farbton als unterschiedlich sicher bzw. unsicher angesehen werden (Erklärung dazu in Abschnitt 2.5.2.2) [Tak & Toet, 2014]. Es ist also festzuhalten, dass durch Farbsättigung gewisse Grade von Unsicherheiten in GPS-Trajektorien vermittelt werden können, aber dass es trotzdem zu Problemen kommen kann, falls die Wahl der Farbtöne ungünstig ausfällt.

Da es bewiesen ist, dass durch Farbhelligkeit geordnete Datenstrukturen wiedergegeben werden können [Tak & Toet, 2014], ist es auch möglich Unsicherheiten in Raumdaten zu vermitteln, da diese Informationen ebenfalls geordnet sind. Dabei ist es möglich Unsicherheiten in linienhafte Objekten darzustellen. Hellere Objekte werden dabei als



sicherer angenommen als dunklere Objekte [Tak & Toet, 2014]. Der Vorteil dieser Methode ist, wie bei den vorherigen Methoden auch, die einfache Darstellung der Unsicherheiten, ohne die Abbildung stark zu beeinflussen. Negativ zu betrachten ist die Tatsache, dass auch hier nur Wertebereiche der Unsicherheiten der Objekte durch die Skalierung der Helligkeit beschrieben werden können.

Als nächste Visualisierungsmethode soll die Farbtransparenz auf ihre Nutzbarkeit hinsichtlich der Unsicherheitsvermittlung in GPS-Trajektorien überprüft werden. Durch die transparente Darstellung der Objekte wird der Eindruck von Unsicherheiten vermittelt [Jaarsveld, o.J.]. Diese Methode ist für Unsicherheiten von GPS-Trajektorien geeignet. So können zum Beispiel GPS-Trajektorien je nach Unsicherheit in den betroffenen Bereichen transparenter oder weniger transparent dargestellt werden. Auch hier wird die Abbildung an sich nicht verändert, sondern lediglich das betroffene Objekt angepasst. Die Vorteile dieser Methode sind also der geringe Bearbeitungsaufwand der Abbildung, vermehrte visuelle Information (da durch das Objekt hindurchgeschaut werden kann) und klare Abgrenzung zwischen den unsicheren und sicheren Objekten [Jaarsveld, o.J.]. Des Weiteren kann der Nutzer, im Beispiel der GPS-Trajektorie, die Linie trotzdem als ein gesamtes Objekt ansehen und gleichzeitig ist ersichtlich, dass der transparente Teil mit Fehlern behaftet ist. Der große Nachteil dieser Methode ist wieder, dass den mit Unsicherheiten behafteten Objekten nur schwer genaue Werte für die jeweiligen Fehler zugewiesen werden können.

Eine weitere schon erläuterte Methode zur Unsicherheitsvisualisierung ist die Auflösung von Objekten. Auch diese Methode ist für die Unsicherheitsvisualisierung von Raumdaten von linienhaften Objekten geeignet. Dabei dient geringe Auflösung als Indikator für unsichere Objekte und somit von Unsicherheit in den Raumdaten [Jaarsveld, o.J.]. Durch mehr oder weniger hohe Auflösungsgrade ist auch eine Skalierung der Unsicherheit möglich. Mit dieser ist es aber wieder nicht möglich, genaue Werte für Unsicherheiten wiederzugeben.

Mit Überdeckungen in bestimmten Bereichen (Nebel) kann der Effekt von Unsicherheit in GPS-Routen ebenfalls vermittelt werden. Nebel kann also in der Visualisierung für linienhafte Objekte verwendet werden. Als Beispiel kann wieder die GPS-Trajektorie verwendet werden, welche durch eine Linie dargestellt wird. Unsichere Bereiche der Trajektorie werden dann einfach mit einem mehr oder weniger dichten Nebel (abhängig vom Grad der Unsicherheit) überdeckt, um so die unsicheren Objekte/Bereiche zu markieren [MacEachren, 1992]. Ein

Vorteil dieser Methode ist, dass schon auf den ersten Blick ersichtlich ist, dass im überdeckten Bereich Fehler vorliegen [MacEachren, 1992]. Ein Nachteil des Nebels ist aber, dass Objekte dadurch verdeckt werden und nicht mehr gut zu erkennen sind. Dies ist aber meistens kein großes Problem, da unsichere Daten stets mit Vorsicht zu betrachten werden müssen [MacEachren, 1992].

Da Glyphen sehr vielfältig sind, ist auch die Verwendung dieser zur Visualisierung von Unsicherheiten in GPS-Daten von linienhaften Objekten möglich. Ein Beispiel dazu zeigt Abbildung 18. Dort ist ein Ausschnitt von einem Straßennetzwerk zu sehen. Durch die Glyphe (das eingerahmte Ausrufezeichen) wird die Unsicherheit über den genauen Verlauf der Straße beschrieben [Krämer et al., 2011]. Der Vorteil von Glyphen ist die flexible Einsatzweise in der Visualisierung. Ein Nachteil wiederum ist, dass zusätzliche Objekte, in Form von Glyphen, in die Abbildungen eingefügt werden müssen und so zusätzliche visuelle Informationen aufgenommen werden müssen, welche zu einer zu großen Menge an Informationen führen kann.



Abbildung 18: Glyphe zur Darstellung von Unsicherheiten.  
Quelle: Krämer et al., 2011



Die nächste zu klärende Kategorie, ist die der Füllmuster („interior“). Da diese nur für Objekte mit Füllung (Flächen) verwendet werden kann, wird diese Methode nicht weiter behandelt.

Das Gegenstück zu den Füllmustern sind die Konturen („exterior“). Mit Hilfe von dieser Methode können ebenfalls Unsicherheiten in linienhaften Objekten dargestellt werden. Die aufgeführten Methoden in Kapitel 2 der Kategorie Konturen sind dabei „fuzzy borders“, „sketchiness“ und durch gepunktete/gestrichelte Linien. Bei allen drei Methoden wird durch das Ändern der Kontur des Objekts der Eindruck von Unsicherheiten vermittelt (Siehe Abschnitt 2.5.2.3). Der Vorteil dieser Visualisierungsmöglichkeiten ist die geringe Veränderung, die benötigt wird um in der Abbildung die vorhandenen Unsicherheiten darzustellen. Wie in den meisten anderen Unsicherheitsdarstellungen können hier aber auch wieder keine exakten Werte abgebildet werden. Außerdem muss darauf geachtet werden, dass die veränderten Konturen auch leicht ersichtlich sind, sodass sie den anderen (nicht mit Unsicherheiten behafteten) Konturen nicht zu ähnlich sind.

Unsicherheitskorridore sind ebenfalls dafür geeignet um Unsicherheiten in GPS-Trajektorien aufzuzeigen. Diese Methode wird hauptsächlich für linienhafte Objekte verwendet. Im Beispiel der GPS-Trajektorie wird um die Linie ein Bereich festgelegt, in welchem sich die Trajektorie mit höchster Wahrscheinlichkeit befindet. Somit können Unsicherheiten der Trajektorie dargestellt werden. Der Vorteil dieser Methode ist, dass die Breite des Korridors die Größe der Ungenauigkeit angeben kann. Falls sich mehrere Linien mit Unsicherheiten in einen kleinen Bereich befinden, oder sogar schneiden, wird es aber schwierig die einzelnen Korridore der Trajektorien auseinanderzuhalten.

In Kapitel 2 wurden ebenfalls Vektoren beschrieben. Obwohl diese grundsätzlich zur Visualisierung von Unsicherheiten in Bewegungssystemen verwendet werden können, sind sie für GPS-Trajektorien nicht geeignet.



In Tabelle 1 wird zur Veranschaulichung nochmal dargestellt, welche Methoden zur Unsicherheitsvisualisierung von linienhaften Objekten geeignet sind und welche nicht:

*Tabelle 1: Übersicht von geeigneten und nicht geeigneten Visualisierungsmethoden für geometrische Unsicherheiten in linienhaften Objekten*

<b>Visualisierungsmethode</b>	<b>geeignet</b>	<b>nicht geeignet</b>
<b>„Errorbars“</b>		X
<b>BoxPlot</b>		X
<b>Multiple Outcome</b>	X	
<b>Farbton</b>	X	
<b>Farbsättigung</b>	X	
<b>Farbhelligkeit</b>	X	
<b>Transparenz</b>	X	
<b>Auflösung</b>	X	
<b>Nebel</b>	X	
<b>Glyphen</b>	X	
<b>Füllmuster</b>		X
<b>Konturen</b>	X	
<b>Unsicherheitskorridore</b>	X	
<b>Vektoren</b>		X



## 4. Routenberechnung für Onroad-Daten und Lückenschließung für Offroad-Daten

In Kapitel 4 werden die verwendeten Datensätze, die Vorverarbeitung dieser und die Routenberechnung bzw. die Lückenschließung in den jeweiligen Datensätzen beschrieben.

### 4.1 Verwendete Daten

#### 4.1.1 Onroad-Daten

Der verwendete Onroad-Datensatz beinhaltet Informationen über Taxifahrten aus dem Jahr 2017 in New York City. Heruntergeladen wurden die Daten von der offiziellen Internetseite der Stadt New York City. Die Daten liegen als zwei verschiedene Excel-Dateien vor. Die eine beinhaltet Informationen über die gelben Taxis in New York City und die andere Datei beschreibt die grünen Taxis (zwei unterschiedliche Taxi-Unternehmen). Aufgrund der Großen Datenmenge der gelben Taxis (über 12 Gigabyte), wurden die grünen Taxis (ca. 2 Gigabyte Datenmenge) als Onroad-Datensatz für diese Arbeit gewählt.

##### 4.1.1.1 Dateninhalt

Die Excel-Datei der grünen Taxis ist in mehrere Spalten aufgeteilt, welche verschiedene Informationen über die Fahrten der Taxis beinhalten. In der Datei sind dabei über eine Million Taxifahrten aufgezeigt. Die Spalten beinhalten verschiedenste Informationen. Zum Beispiel werden Angaben über den Zeitpunkt des Beginns und dem Ende der Taxifahrt angegeben. Außerdem sind die Fahrtdistanz, die Anzahl der Passagiere und die Zahlungsmethode aufgeführt. Neben den gerade aufgezählten Informationen, sind auch die Koordinaten der Standorte zu Beginn und nach Beendigung der Taxifahrt in der Excel-Tabelle enthalten. Die Angaben dazu sind in die geographischen Länge (longitude) und Breite (latitude) unterteilt. Daraus ergeben sich folgende vier Spalten:

- Start Länge
- Start Breite
- End Länge
- End Breite



#### 4.1.1.2 Datenvorverarbeitung und spezifisches Fallbeispiel für Datenunsicherheiten des Onroad-Datensatzes

Da viele der gerade vorgestellten Informationen für diese Arbeit nicht von Bedeutung sind und die Größe der Daten bei den Berechnungen zu Problemen führen könnten, wird als nächster Schritt die Vorverarbeitung des Datensatzes der grünen Taxis aus New York City durchgeführt.

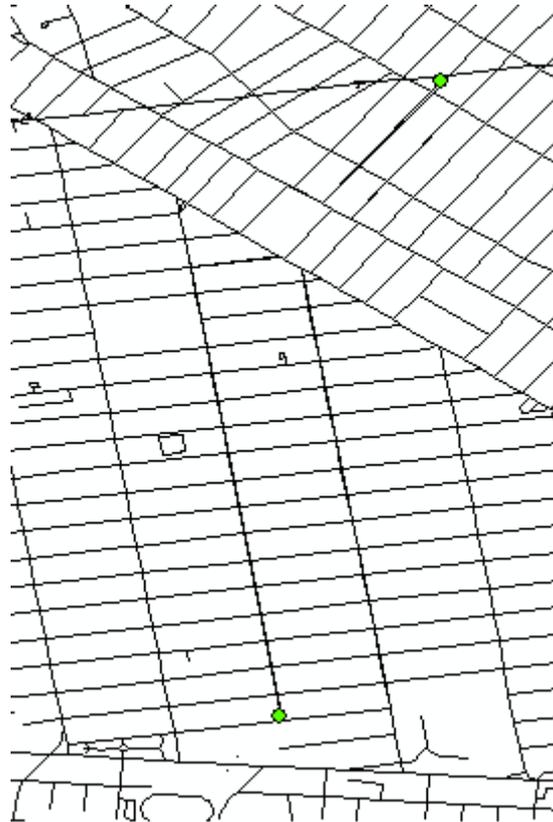
Als erstes wird versucht, die Excel-Datei in eine Shape-Datei umzuwandeln. Aufgrund der großen Datenmenge ist dies aber nicht möglich. Deshalb muss zunächst die Datenmenge verringert werden. Dazu wird mit Hilfe des Programms FME Workbench ein Filter angewendet, welcher die nicht benötigten Attribute (Spalten) eliminiert. Des Weiteren wird, ebenfalls mit FME Workbench, den einzelnen Taxifahrten das Attribut „UUID“ (Universally Unique Identifier) zugeordnet, sodass jede Fahrt seiner ID eindeutig zugewiesen werden kann.

Nachdem nun ein überschaubarer Datensatz erstellt wurde, wird als nächstes das Straßennetzwerk von New York City als Shape-File besorgt (OpenStreetMap-Daten). Dieses Netzwerk wird anschließend in ArcMap geladen und dargestellt. Um einen Überblick zu erhalten in welchen Teilen von New York City sich die Taxifahrten befinden, werden einige Punktpaare (Start und Ende der jeweiligen Route) als Shape-File erstellt, um diese dann ebenfalls in ArcMap darzustellen. Zum Erstellen der Shape-Files werden Textdateien angefertigt, welche mit Hilfe von ArcMap in Shape-Files konvertiert werden können.

Als erstes Beispiel wird dann ein zufälliges Punktpaar gewählt um die Routenberechnungsfunktion von ArcMap zu testen. Dazu muss das Shape-File des Straßennetzwerkes von New York City in ein Netzwerk für ArcMap umgewandelt werden. Anschließend können mehrere „Stops“ mit Hilfe des „Network Analyst“-Werkzeugs erstellt werden und die schnellste Routen zwischen den „Stops“ berechnet werden. Bei diesem Schritt tritt aber eine Fehlermeldung auf, welche beschreibt, dass sich der Start- und Endpunkt der Route in nicht befahrbaren Bereichen befinden. Nach genauerer Betrachtung des Straßennetzwerkes wird dann klar, dass die Kanten und Knoten der Straßen an den Kreuzungen nicht an jeder Stelle übereinstimmen (einen Schnittpunkt besitzen). Aus diesem Grund wird das Netzwerk auf Gebiete untersucht, in welchen die Kanten und Knoten relativ gut zusammenpassen. Anhand dieser Analyse wird dann ein Punktpaar gewählt, welches sich in diesem Teil des Netzwerkes befindet. Um die Berechnungsdauer zu verkürzen, wird nun das Netzwerk auf einen kleinen Teil um das Punktpaar herum zugeschnitten. Dazu wird in ArcMap



ein Rechteck um die beiden Punkte gezeichnet, welches als Shape-Datei gespeichert wird. Mit diesem Rechteck wird das Straßennetzwerk zugeschnitten, sodass nun nur noch ein kleineres Straßennetzwerk übrigbleibt. In Abbildung 19 ist dieser Ausschnitt zu sehen. Das Straßennetzwerk wird durch die schwarzen Linien abgebildet und die beiden grünen Punkte markieren den Start- bzw. Endpunkt der Route.



*Abbildung 19: Ausschnitt des New York City Straßennetzwerkes mit dem ausgewählten Punktpaar.  
Quelle: Eigene Darstellung*

Die weitere Bearbeitung des Straßennetzwerkes wird in Kapitel 4.2 „Berechnung der Onroad-Routen mit ArcGIS“ beschrieben, da die Bearbeitung maßgebend für die Berechnungen der Routen ist.



#### 4.1.2 Offroad-Daten

Der verwendete Offroad-Datensatz beschreibt die Trajektorien von mehreren Zugvögeln (Störchen) aus Bayern, welche in südliche Länder fliegen. Die Daten stammen aus den Jahren 2014/2015 und beinhalten über mehrere Millionen GPS-Messungen. Die Zeitspanne in welcher die GPS-Messungen aufgenommen worden sind beträgt dabei im Schnitt ca. zehn bis vierzehn Monate. Diese Daten sind vom Lehrstuhl für Kartographie der technischen Universität München bezogen. Der Erfasser der Daten kann leider nicht ausgemacht werden. Im Gegensatz zu den Taxidaten liegen die Storchdaten als Shape-Daten vor. Diese sind in punkthafte und linienhafte Shape-Daten unterteilt. Da für die Storchtrajektorien Lücken im Flugverlauf gesucht werden (Unsicherheiten in den Daten) und diese in linienhaften Verläufen nicht sichtbar sind, werden für die Lückensuche die Shape-Daten mit den Punkten gewählt, in welchen Lücken in den Trajektorien leichter festgestellt werden können.

##### 4.1.2.1 Dateninhalt

Mit etwas mehr als vier Gigabyte Datenvolumen sind auch die Storchdaten recht groß. Öffnet man die Attributtabelle der Punkt-Shape-Daten in ArcMap, sind dort 30 Spalten in der Tabelle zu sehen. Neben der FID, mit welcher jeder einzelne Punkt eindeutig identifiziert werden kann, sind unter anderem ein Zeitstempel, die Koordinaten des Punktes als geographische Länge (longitude) und geographische Breite (latitude), die Geschwindigkeit im jeweiligen Punkt und der Name des Storches, welcher den GPS-Empfänger trägt, angegeben. Zu großen Teilen ist in den Trajektorien alle fünf Minuten ein GPS-Punkt vorhanden. In manchen Gebieten sind aber auch Zeitintervalle von 20 Minuten zu finden. Ebenfalls kommt es vor, dass Punkte im Sekundentakt auftreten, was zu einer Ansammlung von zahlreichen GPS-Punkten an einem Ort führt. Bei einzelner Betrachtung der Storchtrajektorien erscheinen die Störche Jutta, ZiegenTom und Sepp am geeignetsten (aufgrund der stimmigen Koordinatenzuweisung) für die weitere Bearbeitung der Daten. Bei den weiteren Bearbeitungsschritten wird sich daher auf diese drei Trajektorien konzentriert. In Abbildung 20 sind die drei Flugrouten dargestellt. Die grüne Trajektorie beschreibt dabei Jutta, welche aus Bayern in Deutschland startet und über Frankreich und Spanien nach Marokko fliegt, bevor sie wieder über Portugal und Spanien zurück nach Frankreich fliegt. Durch die gelbe Flugroute wird Sepp beschrieben. Dieser fliegt von Deutschland in Richtung Türkei, von wo er weiter nach Nordafrika fliegt bis er letztlich sein Ziel in Libyen erreicht hat. Die Route von ZiegenTom wird durch die blaue Linie dargestellt.



Seine Route führt in, ausgehend von Deutschland, zunächst durch Südeuropa und dann über Osteuropa nach Afrika.



Abbildung 20: Flugrouten der Störche Jutta (Grün), ZiegenTom (Blau) und Sepp (Gelb).  
Quelle: Eigene Darstellung



#### 4.1.2.1 Datenvorverarbeitung und spezifisches Fallbeispiel für Datenunsicherheiten des Offroad-Datensatzes

Aus dem oben genannten Grund werden die Störche Jutta, ZiegenTom und Sepp mit Hilfe eines Attributfilters in FME Workbench von den anderen Daten abgesondert. Die drei Trajektorien werden danach nach GPS-Lücken untersucht, welche sich größtenteils linear verhalten, da dort der Kalman-Filter am besten funktioniert. Bei der visuellen Sichtung einer GPS-Lücke wird dann die FID des letzten Punktes vor der Lücke ermittelt, um in der Attributtabelle des jeweiligen Storches zu überprüfen, ob tatsächlich eine GPS-Lücke vorhanden ist oder ob der Vogel lediglich schneller flog und somit der Abstand zwischen den einzelnen GPS-Punkten größer ist. Dazu wird der Zeitstempel des letzten Punktes vor der Lücke mit dem nächsten Punkt verglichen. Falls dort der Abstand größer als fünf Minuten ist, kann von einer GPS-Lücke ausgegangen werden. In der Trajektorie des Sepp ist dann schließlich eine passende Lücke gefunden worden, weshalb die anderen beiden Trajektorien für die restliche Arbeit nicht mehr weiter berücksichtigt werden. Die Trajektorie wird dann auf einige Punkte vor und nach der GPS-Lücke zugeschnitten, damit das Datenvolumen verringert werden kann. Die GPS-Lücke umfasst dabei eine Zeit von zehn Minuten, was zwei fehlenden Punkten entspricht. Der nächste Schritt ist es, die Punktkoordinaten in Excel-Tabellen einzutragen, damit mit diesen die Berechnung der beiden Punkte der GPS-Lücke durchgeführt werden kann. Der genaue Vorgang dieser Berechnung wird in Kapitel 4.3 beschrieben.



## 4.2 Berechnung der Onroad-Routen mit ArcGIS

Ziel der Berechnung der Onroad-Routen für die Taxis ist es, verschiedene Ergebnisse in Form von unterschiedlichen Wegen, vom Start der Taxifahrt zum Ende dieser Fahrt, zu erhalten. Da es nur Auskunft über die Koordinaten der Anfangs- und Endpunkte der gefahrenen Distanz und der dazu benötigten Zeit gibt, ist nur begrenzt bekannt welchen Weg der Taxifahrer tatsächlich gefahren ist. Die Unsicherheit der Daten ist also die Ungewissheit der gefahrenen Route. Durch das Berechnen mehrerer möglicher Wege soll also durch den Vergleich der berechneten Distanzen mit der tatsächlich gefahrenen Distanz (im Datensatz vorhanden) die wahrscheinlichste Route errechnet werden können. Dazu sollen mit Hilfe von ArcMap verschiedene Routen mit den jeweiligen Distanzen rechnerisch ermittelt werden.

Das Problem der nicht zusammenpassenden Kanten und Knoten, welches in Kapitel 4.1.1.2 beschrieben wird, besteht aber immer noch. Es ist zwar ein Bereich gewählt worden, in welchem die Kanten und Knoten besser zusammenpassen, eine Routenplanung ist aber dennoch nicht möglich. Um dieses Problem zu beheben, muss also das Netzwerk bearbeitet werden. Dazu wird der Editor in ArcMap verwendet. Zunächst wird versucht alle Kanten und Knoten im ausgewählten Bereich so zu bearbeiten, dass sie alle miteinander verbunden sind und somit die Routenberechnung möglich ist. Da trotz langer Bearbeitungszeit der gewünschte Effekt nicht erzielt werden konnte, wird ein anderes Werkzeug in ArcMap benutzt um die Routenplanung zu ermöglichen. Das gewählte „Tool“ ist das „Straight Segment“. Durch das Werkzeug „Straight Segment“ können neue Kanten und Knoten erstellt werden. Mit diesem Werkzeug wird anschließend der Startpunkt mit dem Endpunkt der Taxifahrt verbunden, indem Segmente entlang des Straßennetzwerkes nachgezogen und somit neu erstellt werden. Dieser Vorgang wird noch weitere zwei Mal durchgeführt, sodass schließlich drei verschiedene Routen erstellt werden konnten. Die so vorgefertigten Routen müssen anschließend, wie schon in Kapitel 4.1.1.2 beschrieben, berechnet werden, damit diese als Shape-Datei vorliegen und zur weiteren Bearbeitung verwendet werden können. Die Arbeitsschritte, die dazu nötig sind, werden noch einmal kurz beschrieben:

1. Erstellen des Netzwerkes aus dem bearbeiteten Straßen Shape-File
2. Erstellen der „Stops“ am Anfangs- und Endpunkt
3. Berechnung der Route



Um die drei verschiedenen Routen zu erhalten, müssen „Zwischenstops“ so angelegt werden, dass diese eindeutig die vorgefertigten Routen beschreiben. Dies bedeutet, dass die erste Route einen „Zwischenstop“ benötigt, der seine anfängliche Bewegung in östliche Richtung beschreibt. Die zweite Route verläuft über eine Parallelstraße und braucht somit einen „Zwischenstop“ auf dieser. Die letzte Route beschreibt einen Weg, der sich weiter nördlich befindet als die anderen beiden Routen, und braucht somit an seinem nördlichsten Punkt einen „Zwischenstop“.

In Abbildung 21 sind die drei beschriebenen Routen abgebildet.

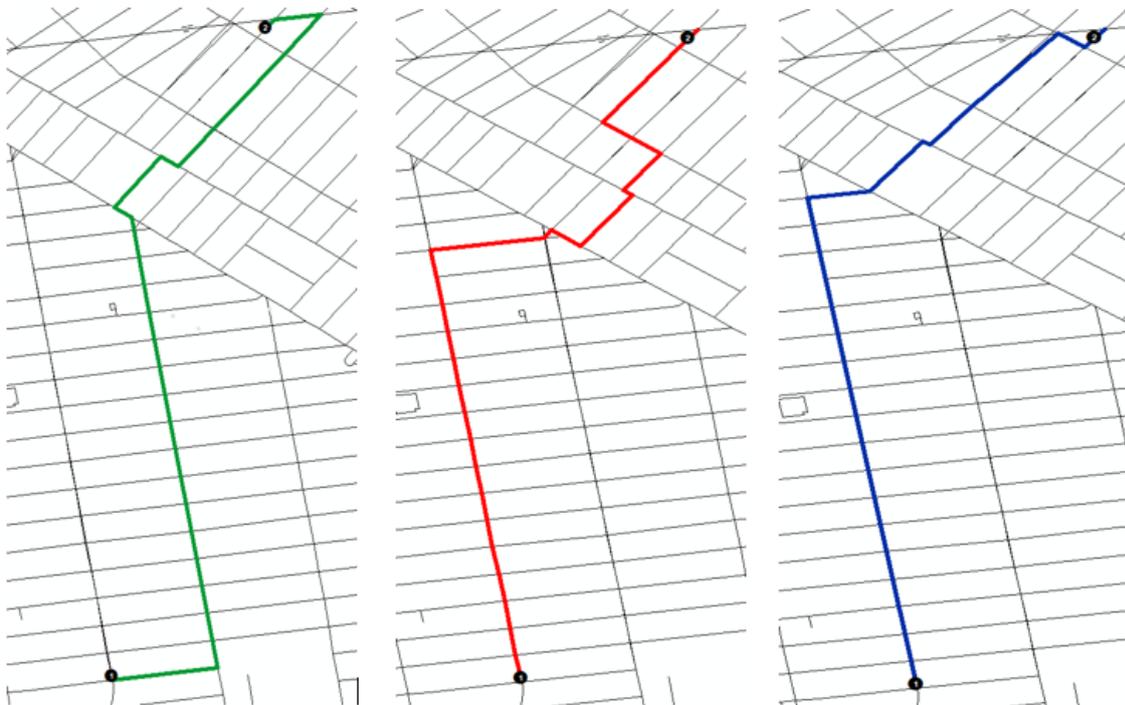


Abbildung 21: Route 1,2 und 3.  
Quelle: Eigene Darstellung

Zu sehen ist dabei jeweils der Startpunkt der Taxiroute im Süden und der Endpunkt der Route im Norden der Karte. Die jeweiligen Routen sind einmal als grüne Linie (Route 1), als rote Linie (Route 2) und als blaue Linie (Route 3) dargestellt.



Neben der Route als visuelle Darstellung liefert ArcMap ebenfalls eine Beschreibung der Route mit der gefahrenen Distanz. Dabei beträgt die zurückzulegende Strecke für die erste Route 2613,1 Meter, für die zweite Route 2570,7 Meter und für die dritte Route 2465,8 Meter. Wie am Anfang des Kapitels bereits beschrieben wurde, sollen diese berechneten Distanzen mit der tatsächlich gefahrenen Distanz von 2350 Metern verglichen werden. Die geringste Differenz erhält man dabei mit der Distanz aus Route 3. Route 3 soll also ab sofort als wahrscheinlichste Route behandelt werden. Der nächst wahrscheinliche Weg ist die Route 2. Als unwahrscheinlichste Trajektorie ist Route 1 zu bewerten.

In Abbildung 22 sind noch einmal alle drei Routen dargestellt. Als Hintergrund dient die Grundkarte „World Street Map“. In dieser sind auch die Straßen aus New York City abgebildet. Die berechneten Routen überlagern die Straßen der Grundkarte, womit klar wird, dass die Route auch sinnvoll berechnet wurden und an das Straßennetz von New York City gebunden sind. Diese Abbildung dient auch als Grundlage für die folgenden Visualisierungen.

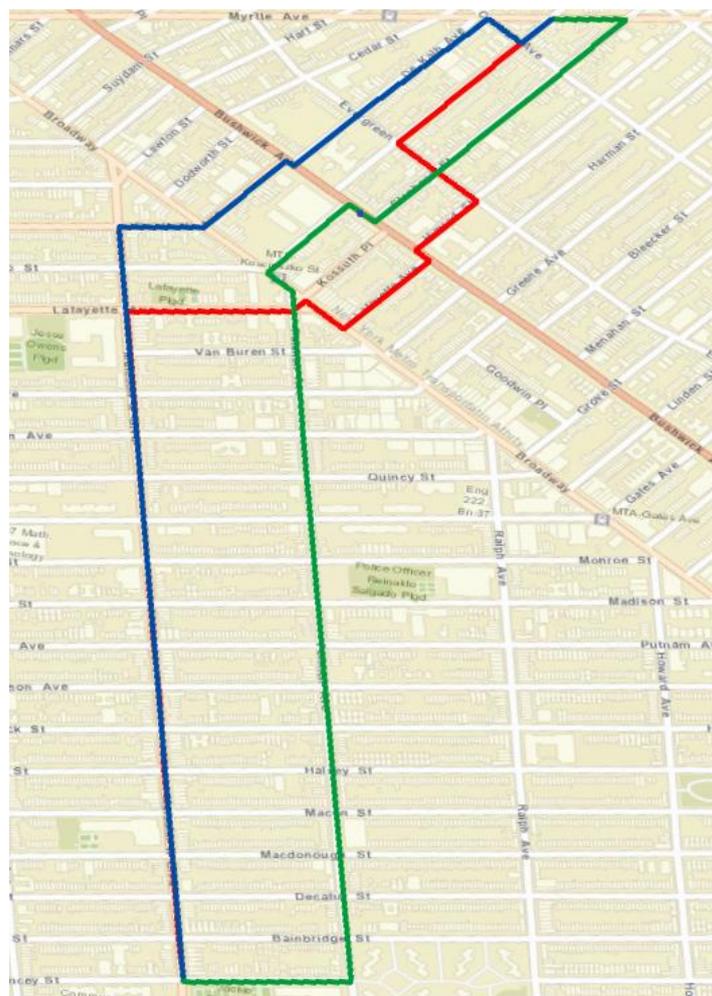


Abbildung 22: Alle möglichen Routen mit New York City Straßennetzwerk als Grundkarte.  
Quelle: Eigene Darstellung



### 4.3 Berechnung der Offroad-Route mit einem Kalman-Filter

Die Berechnung der Punkte in der GPS-Lücke wird mit Hilfe des Programms Matlab getätigt. Dazu soll ein Kalman-Filter benutzt werden, welcher von Herrn Dr.-Ing. Peter Wasmeier angefertigt worden ist. Zunächst werden dafür sechs Punkte um die GPS-Lücke herum (drei Punkte vor der Lücke und drei Punkte nach der Lücke) in eine Excel Tabelle geschrieben damit sie in Matlab eingelesen und verwendet werden können. Der Befehl zum Einlesen von Excel-Dateien lautet dabei „xlsread“. Da die Koordinaten der Störche als ellipsoidische Koordinaten angegeben sind, müssen diese zuerst in das Gauß-Krüger-Bezugssystem transformiert werden, da der verwendete Kalman-Filter für kartesische Koordinaten erstellt wurde. Die so berechneten Koordinaten müssen anschließend mit den restlichen Beobachtungen, welche für den Kalman-Filter benötigt werden, ergänzt und gedreht werden. Die Drehung der Tabelle ist deshalb notwendig, da der Kalman-Filter einzelne Punkte pro Spalte benötigt, die Transformation in Matlab aber die einzelnen Punkte zeilenweise benötigt. Die weiteren Beobachtungen sind die Geschwindigkeit in x- und y-Richtung und die Beschleunigung, ebenfalls in x- und y-Richtung. Diesen (Beschleunigung und Geschwindigkeit) wird zur Vereinfachung der Wert „0“ zugewiesen. Neben den Beobachtungen werden ebenfalls die Genauigkeiten der Beobachtungen zur Berechnung der GPS-Lücke benötigt. Des Weiteren muss angegeben werden, zwischen welchen Punkten sich die GPS-Lücke befindet. Wenn die erforderlichen Daten und Tabellen dann vorhanden sind, kann die Berechnung des Kalman-Filters mit der Vorwärts-Rückwärts-Methode beginnen. Das Verfahren dazu ist bereits in Kapitel 2.4 beschrieben worden. Das Besondere der Vorwärts-Rückwärts-Methode ist, dass der Filter einmal ausgehend vom ersten Punkt durchlaufen wird und anschließend rückwärts vom letzten Punkt. Aus der Mittelbildung der beiden Berechnungen erhält man dann die neuen Koordinaten, mit den entsprechenden Genauigkeiten, aller Punkte, inklusive der Punkte aus der GPS-Lücke. Da die schon vorhandenen Punkte der Storch-Trajektorie als fehlerfrei angenommen werden, werden nur die Punkte aus der GPS-Lücke aus den Berechnungen des Kalman-Filters weiterverwendet. Die errechneten Koordinaten (aus der GPS-Lücke) müssen dann wieder in ellipsoidische Koordinaten zurück gerechnet werden, damit sie in ArcMap die Lücke in den schon vorhandenen GPS-Punkten schließen können.

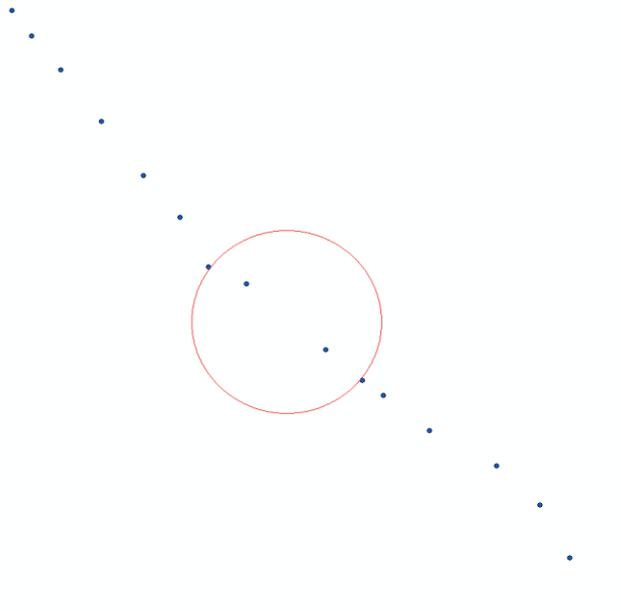


In Tabelle 2 sind die ellipsoidischen Koordinaten von den Punkten aus der Lücke der GPS-Trajektorie angegeben:

*Tabelle 2: neu berechnete Koordinaten der Punkte aus der GPS-Lücke mit ihren Genauigkeiten*

<b>Punktnummer</b>	<b>Geographische Länge</b>	<b>Geographische Breite</b>	<b>Standardabweichung in [cm]</b>
<b>1</b>	21,672792 E	45,863765 N	13,48
<b>2</b>	21,696773 E	45,842456 N	13,87

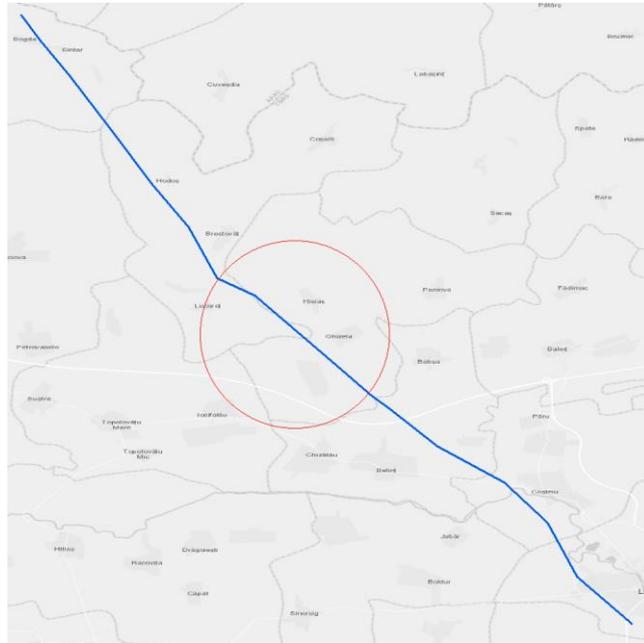
Die zurückgerechneten Koordinaten werden anschließend in eine Text-Datei geschrieben, welche wiederum in ArcMap in Shape-Dateien umgewandelt werden können. Die beiden Shape-Dateien können schließlich in ArcMap verbunden werden, damit eine geschlossene Route entsteht. In Abbildung 23 ist das vorläufige Ergebnis der punkthafte Darstellung der neuen Route zu sehen. Durch den roten Kreis wird der Bereich gekennzeichnet, in welchem sich die neu berechneten Punkte befinden.



*Abbildung 23: Punkthafte Trajektorie mit neu berechneten Punkten der GPS-Lücke.  
Quelle: Eigene Darstellung*



Da die Route noch aus mehreren Punkten besteht, sollen diese zu einer Linie als Trajektorie verbunden werden. Dazu muss die Route neu sortiert werden, damit das Werkzeug „Point to Line“ (in ArcMap) die Punkte in der richtigen Reihenfolge miteinander verbinden kann. Das Ergebnis davon ist in Abbildung 24, mit der Grundkarte „Light Gray Canvas“, zu sehen. Diese Darstellung ist auch gleichzeitig die Grundlage für die Visualisierungen der Offroad-Daten.



*Abbildung 24: Linienhafte Darstellung der Storchtrajektorie mit geschlossener GPS-Lücke.  
Quelle: Eigene Darstellung*



## 5. Darstellungsmöglichkeiten von Unsicherheiten in GPS-Trajektorien anhand der berechneten Routen

In diesem Kapitel werden die vorher berechneten Onroad-Routen, bzw. die vervollständigte Offroad-Route mit ihren Unsicherheiten visuell dargestellt und beschrieben. Dabei werden alle Möglichkeiten zur Visualisierung von Unsicherheiten, welche schon in den vorherigen Kapiteln beschrieben wurden, verwendet.

### 5.1 Darstellung der Onroad-Routen

Aus der Berechnung der Taxi-Routen sind drei verschiedene Wege entstanden. Die letztlich entstandene Karte ist in Abbildung 22 zu sehen. Diese Karte wird nun mit dem Zeichenprogramm Inkscape geöffnet um weitere Verarbeitungsschritte durchzuführen. Der erste Schritt ist es, das gesamte Bild so zu drehen, dass die Querstraßen parallel zur Querachse des Bildrandes verlaufen. Da die dritte und zweite Route ein wenig zu lang sind, müssen diese gekürzt werden, sodass alle drei Routen im selben Punkt enden. Dazu wird eine Bezier-Fläche um die jeweilige Route gezeichnet, welche die gesamte Route bis auf das abzutrennende Stück umrandet. Nun müssen die beiden Routen nur noch mit der jeweiligen Bezier-Fläche verschnitten werden und man erhält die gekürzten Routen. Zusätzlich wird das gesamte Bild auf eine kleinere Fläche zugeschnitten, damit keine unnötigen Gebiete abgebildet werden. Route zwei und Route drei verlaufen am Anfang auf derselben Straße und somit ist in Abbildung 24 nur die dritte Route zu sehen. Darum werden die beiden Routen leicht nach außen versetzt, sodass beide Wege sichtbar sind. Als letzter Verarbeitungsschritt des Ausgangsbildes wird nun noch ein Symbol für den Anfangs- und den Endpunkt der Route eingefügt. Das so entstandene Bild ist in Abbildung 25 zu sehen. Zu erkennen ist, dass nun alle Routen sichtbar sind und auch im selben Punkt beginnen und enden. Durch den leichten Versatz der zweiten und dritten Route, liegen die Wege zwar teilweise nicht mehr exakt auf den Straßen, aber es ist immer noch ersichtlich zu welcher Straße die jeweilige Route gehört. Hier wird nochmal erwähnt, dass die Wahrscheinlichkeit der Routen von links nach rechts abnimmt (Routennummer von links nach rechts: 3-2-1).

Die Unsicherheiten der Routen werden in allen Onroad-Karten anhand der Distanzdifferenzen aus den berechneten Distanzen der jeweiligen Route und den Distanzen aus dem Taxidatensatz angegeben.





## Farbton

Die erste verwendete Methode zur Unsicherheitsvisualisierung der Taxi-Routen ist der Farbton. Dazu wird das bearbeitete Ausgangsbild weiter angepasst, sodass die Unsicherheiten in der gefahrenen Route ersichtlich werden. Die gewählten Farben sind die einer Ampel (nur bei drei Routen möglich). Grün steht für die wahrscheinlichste Route, Orange für die zweitwahrscheinlichste Route und Rot für die unwahrscheinlichste Route. Neben den Veränderungen an den Farben der jeweiligen Routen, ist auch eine Legende notwendig. Diese beschreibt die einzelnen Objekte der Karte. Neben den drei Farben mit den Distanzdifferenzen zur Originaldistanz aus dem Datensatz der Routen, wird ebenfalls der Start- und Endpunkt der Routen aufgeführt. Die fertige Karte mit Überschrift und Legende ist in Abbildung 26 zu sehen.



Abbildung 26: Visualisierung von Unsicherheiten in gefahrenen Taxirouten anhand von Farbtönen.  
Quelle: Eigene Darstellung



## Farbsättigung

Als nächstes gilt es die Farbsättigung als Methode der Unsicherheitsvermittlung für die gefahrenen Taxirouten zu verwenden. Der gewählte Farbton ist dabei Grün. Um die Unsicherheiten in den Routen darzustellen, sollen jetzt die weniger wahrscheinlichen Wege auch mit einem weniger gesättigtem Grün dargestellt werden. Die Skala dazu ist in der Legende zu sehen. Dann muss nur noch die Kartenüberschrift angefertigt werden und an die passende Stelle mittig über der Karte bewegt werden. Die Methode der Farbsättigung ist in Abbildung 27 mit der passenden Überschrift und Legende zu sehen.



Abbildung 27: Visualisierung von Unsicherheiten in gefahrenen Taxirouten anhand von Farbsättigung.  
Quelle: Eigene Darstellung



## Farbhelligkeit

Eine weitere schon beschriebene Methode zu Visualisierung von Unsicherheiten in Raumdaten ist die Verwendung von verschiedenen Farbhelligkeiten. Dafür werden die Routen je nach Wahrscheinlichkeit in unterschiedlichen Helligkeiten dargestellt. Auch hier wird ein grüner Farbton als Ausgangsfarbe gewählt, da dort Helligkeitsunterschiede leicht zu erkennen sind. Außerdem passt der grüne Farbton gut zum gewählten Hintergrund der Karte, was einen harmonischen Eindruck entstehen lässt. Je heller die Route dargestellt wird, desto sicherer ist diese auch. Dunkle Routen werden also als unsicherer angenommen. Nun muss wieder die Legende und die Überschrift angepasst werden und man erhält so die in Abbildung 28 dargestellte Karte.



Abbildung 28:: Visualisierung von Unsicherheiten in gefahrenen Taxirouten anhand von Farbhelligkeit.  
Quelle: Eigene Darstellung



## Transparenz

Wie in Kapitel 3 beschrieben, ist es möglich Unsicherheiten von Objekten, in diesem Fall Taxirouten, durch eine transparente Darstellung zu vermitteln. Dazu werden die drei Routen je nach Grad der Unsicherheit mehr oder weniger transparent abgebildet. Das bedeutet, dass Route 1 der möglichen Taxirouten die höchste Transparenz aufweist, da dieser Weg die unsicherste Route beschreibt. Die Transparenz in Route 2 dagegen ist schon etwas geringer. Route 3 hingegen wird ohne jegliche Transparenz abgebildet, da dieser Weg der sicherste ist. Neben der Anpassung der Routen, werden auch hier wieder die Legende und die Überschrift der Karte bearbeitet und angepasst. In Abbildung 29 ist die fertiggestellte Karte mit der Unsicherheitsvisualisierung mittels Transparenz zu sehen.



Abbildung 29: Visualisierung von Unsicherheiten in gefahrenen Taxirouten anhand von Transparenz.  
Quelle: Eigene Darstellung



## Auflösung

Nun werden die Unsicherheiten der einzelnen Routen durch verminderte Auflösung der Trajektorien dargestellt. Für diese Methode wird eine Kombination von Farbtönen und Auflösung verwendet, da die Zuweisung der einzelnen Objekte in der Legende sich sonst als schwierig erweist. Die gewählten Farbtöne sind wieder die einer Ampel (siehe Absatz „Farbton“). Die grüne Trajektorie wird dabei nicht weiter verändert. Bei der gelben Trajektorie wird die Auflösung etwas verringert und bei der roten Trajektorie wird die Auflösung noch mehr verringert. Je geringer also die Auflösung des Objekts ist, desto höher ist die Unsicherheit des Objekts. In der Legende werden die Distanzdifferenzen den einzelnen Routen durch die Farbtöne zugewiesen, da für die kleinen Objekte in der Legende, die Verringerung der Auflösung nicht ausreichend ist um die Distanzdifferenzen der Routen den jeweiligen Wegen der Karte eindeutig zuzuweisen. In Abbildung 30 ist die fertige Karte dargestellt.



Abbildung 30: Visualisierung von Unsicherheiten in gefahrenen Taxirouten anhand von Auflösung.  
Quelle: Eigene Darstellung

## „Fog“ (Nebel)



Für den Nebel zur Visualisierung der Unsicherheiten in den Taxirouten werden zwei verschiedene Methoden getestet. Einmal umschließt der Nebel die jeweilige Route direkt und das andere Mal umschließt der Nebel alle drei Routen, ist aber unterschiedlich dicht bei den verschiedenen Wegen. Für die erste Methode wird von den beiden unwahrscheinlicheren Routen eine Kopie erstellt. Diese wird dann in einem dunklen Grauton dargestellt. Als nächstes wird die Schärfe der grauen Trajektorien verringert um somit den Eindruck eines Nebels entstehen zu lassen. Dabei ist die Unschärfe der zweiten Route höher, damit der Nebel nicht so dicht erscheint. Je dichter/dunkler also der Nebel ist, desto unsicherer ist die betroffene Route. Dieser Effekt ist in Abbildung 31 zu sehen.



Abbildung 31: Visualisierung von Unsicherheiten in gefahrenen Taxirouten anhand von Nebel (Methode 1).  
Quelle: Eigene Darstellung



Für die Durchführung der zweiten Methode wird ein Polygon erstellt, das alle Routen umgibt. Damit ein Nebel entsteht wird die Schärfe/Auflösung der Fläche verringert. Anschließend wird noch ein linearer Farbverlauf (in Grau) von links nach rechts erstellt, sodass die Route welche sich links befindet am wenigsten vom Nebel überdeckt wird und die Route ganz rechts am meisten vom Nebel überdeckt wird. Hier beschreibt also dichter Nebel eine höhere Unsicherheit in der jeweiligen Route. Für die Legende können nun die bisherigen Linien nicht mehr verwendet werden, um die Unsicherheiten der Routen zu beschreiben. Dazu wird jetzt ein kleines Rechteck erstellt, welches mit einem linearen Farbverlauf von oben nach unten gestaltet wird. Anhand dieses Rechteckes können die Distanzdifferenzen wieder den einzelnen Routen zugewiesen werden. Die zweite Methode ist in Abbildung 32 dargestellt.



Abbildung 32: Visualisierung von Unsicherheiten in gefahrenen Taxirouten anhand von Nebel (Methode 2).  
Quelle: Eigene Darstellung



## Glyphen

Zur Visualisierung der Unsicherheiten in den möglichen Taxirouten mit Hilfe von Glyphen werden drei verschiedene Symbole gewählt, welche die Distanzdifferenz, bzw. die Unsicherheit in der jeweiligen Route beschreibt. Diese sind ein grünes Häkchen für die wahrscheinlichste Route, ein blaues Fragezeichen für die zweit wahrscheinlichste Route und ein rotes Kreuz für die unwahrscheinlichste Route. Die Symbole sind so platziert, dass sie eindeutig der jeweiligen Route zugeordnet werden können. In der Legende werden die Symbole ebenfalls der richtigen Distanzdifferenz zugeordnet, sodass der Betrachter weiß wie unsicher oder sicher die verschiedenen Routen sind. Die erstellte Karte ist in Abbildung 33 zu sehen.



Abbildung 33: Visualisierung von Unsicherheiten in gefahrenen Taxirouten anhand von Glyphen.  
Quelle: Eigene Darstellung



## Konturen

Die Methode der „fuzzy borders“ wird im Abschnitt der Konturen nicht aufgeführt, da die visuelle Darstellung dort sehr ähnlich ist wie bei der Methode der Auflösung (Abb. 30). Dafür wird die Methode „sketchiness“ und die der unsicheren Linien angewendet. Zur Darstellung von „sketchiness“ werden mit Bezier-Linien die mittlere und rechte Route „zackig“ nachgebildet. Je unregelmäßiger und größer die Ausschläge von den originalen Routen abweichen, desto höher ist dort die Unsicherheit. Dies ist auch in der Legende angegeben. Die Originalrouten des mittleren und rechten Wegs werden dann entfernt, sodass nur noch die linke Route unbearbeitet bleibt, da diese als sicherste Route angenommen wird. Abbildung 34 zeigt die Methode der „sketchiness“ in der angefertigten Karte.



Abbildung 34: Visualisierung von Unsicherheiten in gefahrenen Taxirouten anhand von Konturen ("sketchiness").  
Quelle: Eigene Darstellung



Im Fall der unsicheren Linien werden die Muster der Konturen der jeweiligen Route angepasst. Dafür wird eine gepunktete Darstellung der Wege gewählt. Je größer dabei die Abstände zwischen den Punkten sind, desto unsicherer ist die betroffene Route. Die letzte visuelle Darstellung der Taxirouten ist in Abbildung 35 zu sehen.



Abbildung 35: Visualisierung von Unsicherheiten in gefahrenen Taxirouten anhand von Konturen (gepunktete Linie).  
Quelle: Eigene Darstellung



## 5.2 Darstellung der Offroad-Routen

In Abbildung 24 ist das Ausgangsbild aus den Berechnungen für die Storchroute dargestellt. Wie auch bei den Onroad-Darstellungen muss das Ausgangsbild zunächst bearbeitet werden, um als Grundkarte für die verschiedenen Visualisierungsmethoden dienen zu können. Dazu wird das Bild auf eine geringere Größe zugeschnitten, sodass die wichtigen Bereiche der zu erstellenden Karten im Fokus des Nutzers liegen. Außerdem wird die Größe der Routenlinie und der GPS-Punkte, bzw. Kalman-Punkte, vergrößert. Um die Kalman-Punkte von den GPS-Messungen unterscheiden zu können, werden diese blau gefärbt. Die anderen Punkte und die Linie der Trajektorie werden im selben Grauton wie bei den Onroad-Karten gestaltet. Damit der eingekreiste Teil der Route (Siehe Abb. 24) in Inkscape weiterbearbeitet werden kann, muss dieser Teil zunächst entfernt werden. Anschließend wird eine neue Linie in die Lücke eingepasst, sodass diese vom Anfang der GPS-Lücke über die beiden Kalman-Punkte zum Ende der GPS-Lücke verläuft. Nun wird nur noch ein schwarzer Rahmen um das gesamte Bild gelegt, damit die Karte einen ordentlichen Abschluss hat. Das Ergebnis ist in Abbildung 36 zu sehen.

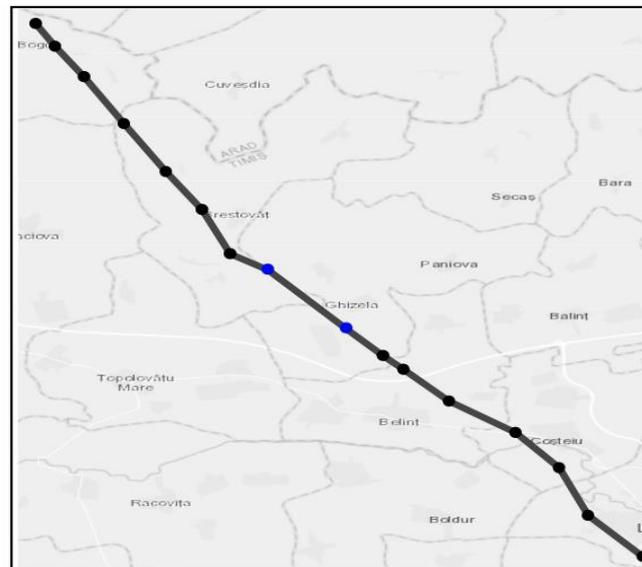


Abbildung 36: Bearbeitetes Ausgangsbild der Storchroute.  
Quelle: Eigene Darstellung

Generell wird die Unsicherheit in den Offroad-Karten durch die Standardabweichung der Kalman-Punkte angegeben. Eine Abweichung von 14 cm ist für eine GPS-Trajektorie über mehrere Tausend Kilometer aber utopisch. Die Fehler dürften sich wohl eher im Meterbereich aufhalten. Da es aber nur um die Veranschaulichung von metrischen Werten geht, werden die Standardabweichungen aus dem Kalman-Algorithmus als Indikator für die Unsicherheiten



verwendet und die GPS-Punkte, bzw. die Routen zwischen den GPS-Punkten, als fehlerfrei angenommen.

Im Fall der Storchroute ist die Darstellung von Unsicherheiten anhand von Glyphen schwierig. Wenn nur eine Route dargestellt wird, ist es nicht sinnvoll mehrere Glyphen zu platzieren um dort die Unsicherheiten in Form von Standardabweichung darzustellen. Eine Kombination mit einer Multiple-Outcome-Darstellung ist aber ebenfalls nicht zielführend, da dort die Abweichungen nicht an der richtigen Stelle angebracht werden können. Aus den genannten Gründen wird die Darstellung von Unsicherheiten anhand von Glyphen für die Offroad-Karten nicht berücksichtigt.

### Multiple-Outcome-Darstellung

Um die Multiple-Outcome-Graphik zu erstellen, werden die Linien der Routen wieder schmaler dargestellt. Außerdem wird die Linie aus der GPS-Lücke entfernt. An dieser Stelle werden dann sechs zufällige Wege vom Anfang bis zum Ende der GPS-Lücke erstellt. Ein weiterer Weg führt durch die beiden Kalman-Punkte. Der sichere Teil der Storchroute wird dann grün eingefärbt und die unsicheren Abschnitte in schwarz dargestellt. Nun wird noch ein Titel und die Legende für die Karte erstellt. Die Karte ist in Abbildung 37 zu sehen.

Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand einer Multiple-Outcome-Darstellung

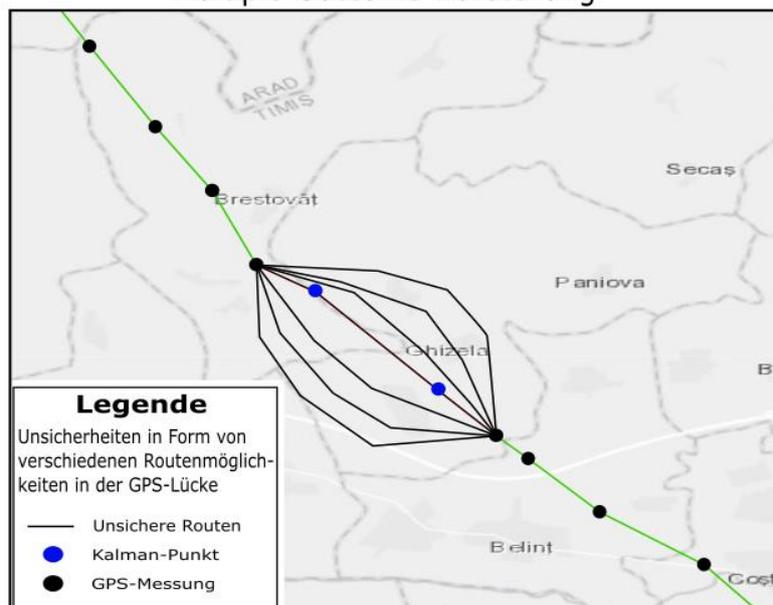


Abbildung 37: Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand einer Multiple-Outcome-Darstellung.

Quelle: Eigene Darstellung



## Farbton

Abbildung 38 zeigt die Visualisierung der Unsicherheiten in den Storchrouten anhand von verschiedenen Farbtönen. Dazu wird die Linie im Bereich der GPS-Lücke bearbeitet. Es wird ein Farbverlauf erstellt, der von der Farbe Grün über die Farbe Orange zur Farbe Rot verläuft. Dabei wird den einzelnen Farbtönen die jeweilige Standardabweichung (Indikator für die Unsicherheiten) in der Legende zugewiesen. Außerdem werden die GPS-Messungen und die Kalman-Punkte in der Legende angegeben. Die Anpassung des Kartentitels ist dann der letzte Arbeitsschritt für die Karte. Das Ergebnis ist in Abbildung 38 zu sehen.

## Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Farbtönen

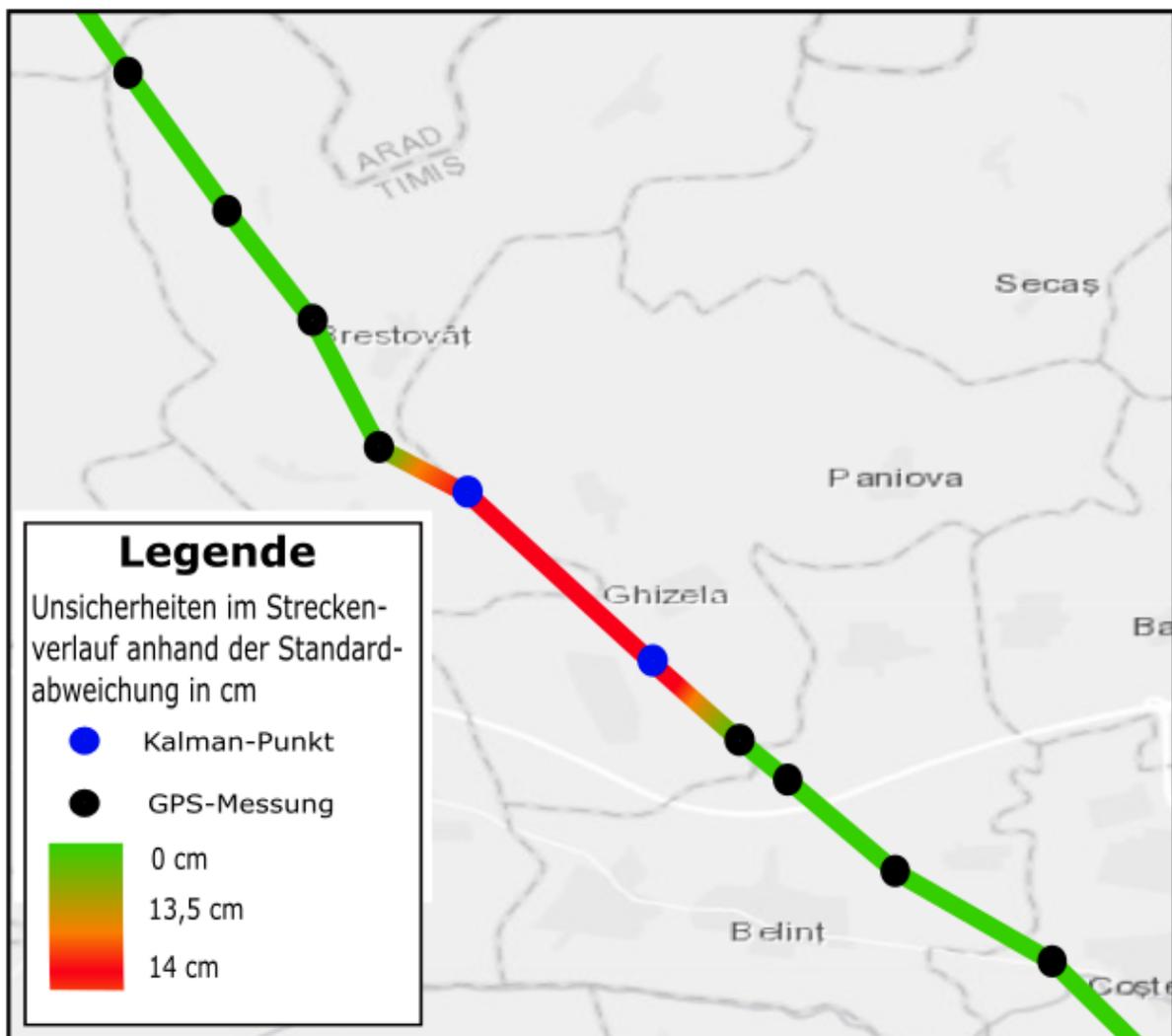


Abbildung 38: Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Farbtönen.  
Quelle: Eigene Darstellung



## Farbsättigung

Die nächste Karte zeigt die Farbsättigung als Methode der Unsicherheitsvisualisierung in GPS-Trajektorien. Dazu wird wieder die Linie im Bereich der GPS-Lücke abgeändert. Dieses Mal wird aber kein Farbverlauf einer Ampel imitiert, sondern der Farbverlauf wird nun durch verschiedene Sättigungsgrade der Farbe Grün visualisiert. Je niedriger der Sättigungsgrad an einer gewissen Stelle der Trajektorie ist, desto höher ist dort die Standardabweichung und somit auch die Unsicherheit des Punktes. Die Route zwischen den GPS-Messungen wird als fehlerfrei angesehen und wird durch ein voll gesättigtes Grün dargestellt. Es wird nun nur noch die Legende und der Titel der Karte angepasst. Das so entstandene Bild ist in Abbildung 39 zu sehen.

### Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Farbsättigung

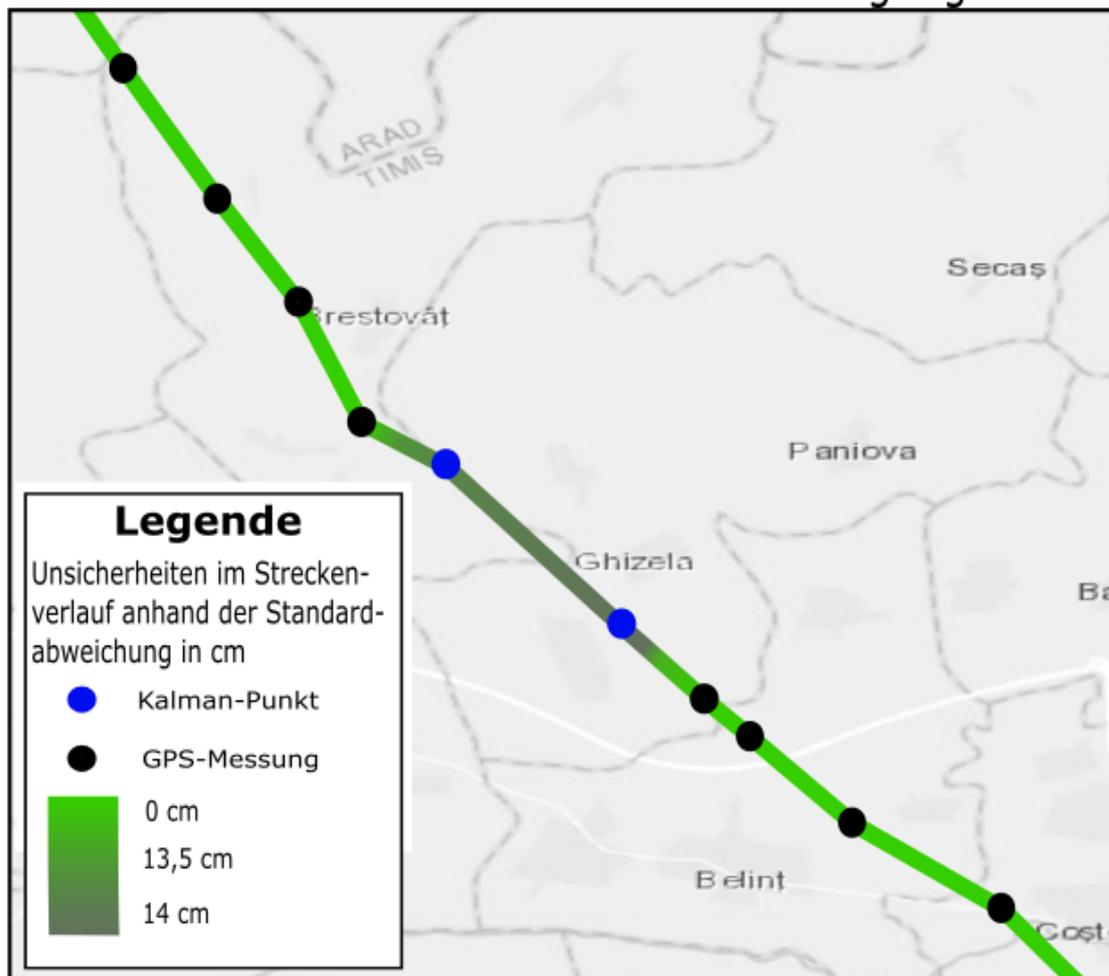


Abbildung 39: Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Farbsättigung.  
Quelle: Eigene Darstellung



## Farbhelligkeit

Nun wird die Farbhelligkeit verwendet, um die Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storchs darzustellen. Hier wird wieder ein grüner Farbton für die fehlerfreien Teile der Trajektorie des Storchs verwendet. Um Unsicherheiten darzustellen werden Bereiche abhängig von der Standardabweichung an diesem Ort verschieden hell, bzw. dunkel abgebildet. Dunkle Bereiche gelten dabei als unsicherer als helle Abschnitte. Nun werden wieder die Legende und der Titel der Karte angepasst. Das Ergebnis davon ist in Abbildung 40 zu sehen.

## Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Farbhelligkeit

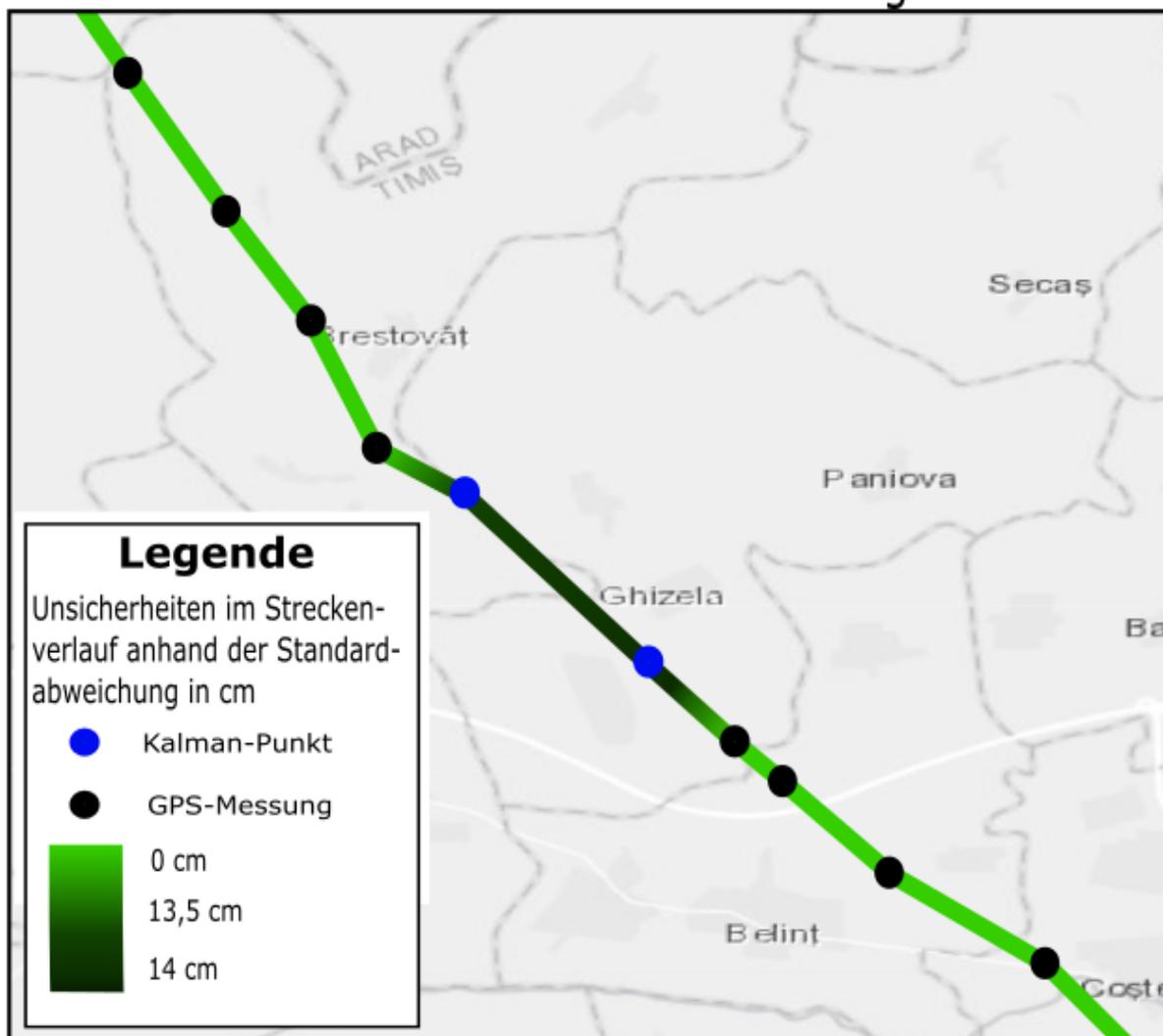


Abbildung 40: Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Farbhelligkeit.  
Quelle: Eigene Darstellung

## Transparenz

Als nächstes wird die transparente Darstellung von Abschnitten der Storchroute verwendet, um Unsicherheiten in diesen Bereichen zu vermitteln. Dazu wird die Linie der GPS-Lücke in manchen Teilen mehr oder weniger transparent abgebildet. Je transparenter die Linie dabei wird, desto unsicherer ist der betroffene Bereich. Möglich wird dies durch einen Farbverlauf der Trajektorie. Dabei wird aber nicht die Farbe angepasst, sondern die Deckkraft in den jeweiligen Gebieten. In der Legende wird angezeigt, wie hoch die Standardabweichung bei den jeweiligen Grautönen ist. Das Ergebnis ist in Abbildung 41 zu sehen.

## Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Transparenz

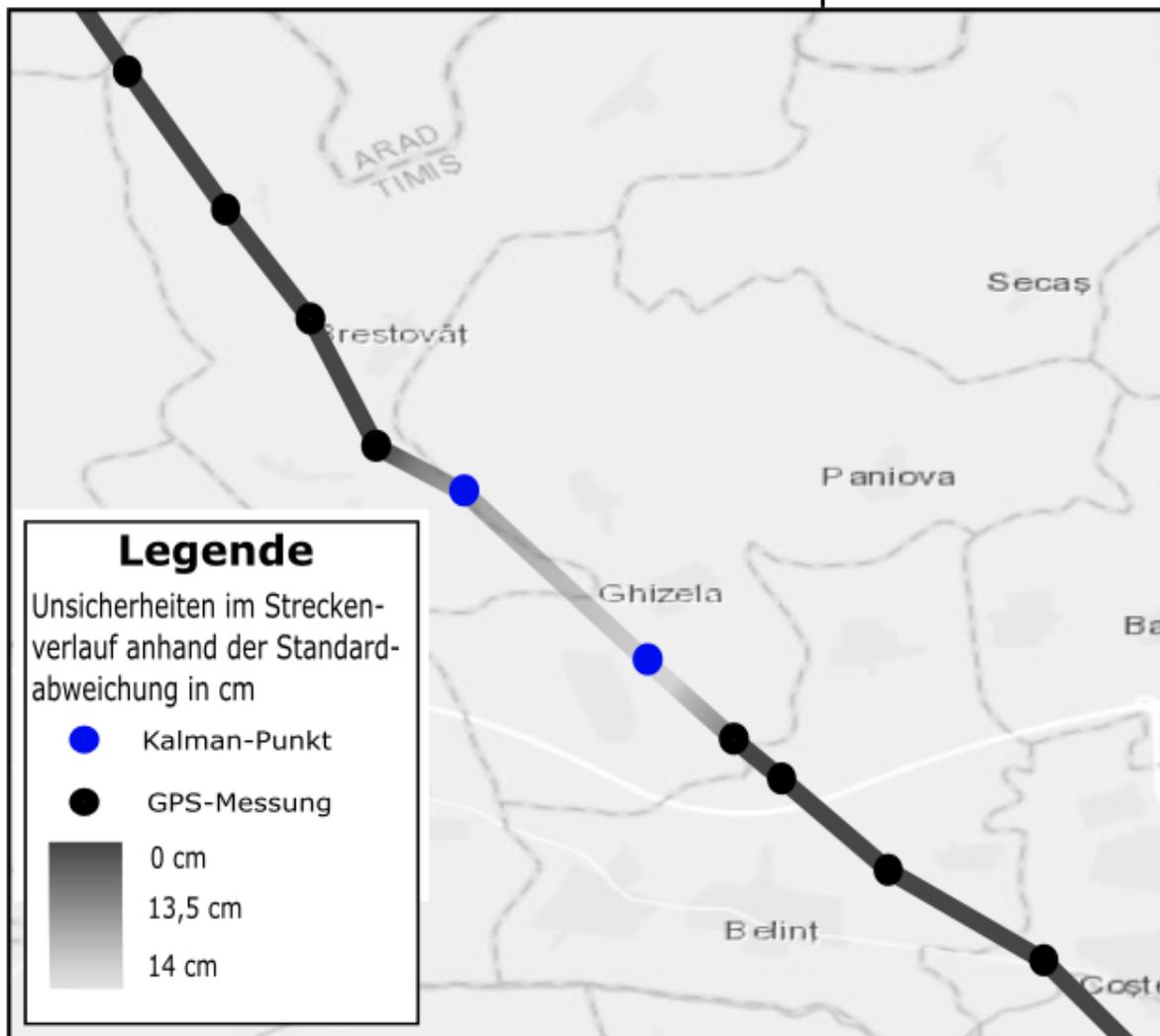


Abbildung 41: Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Transparenz.  
Quelle: Eigene Darstellung

## Auflösung

Die nächste Methode zur Unsicherheitsvisualisierung in Raumdaten ist die Verwendung von verschiedenen Auflösungsgraden. Hier wird die Linie in der GPS-Lücke in drei Teile aufgespalten. Die Auflösung dieser Teile wird dann verschieden stark verringert, sodass der mittlere Abschnitt die niedrigste Auflösung hat, da dort die Unsicherheiten der Trajektorie am größten sind. Die Zuweisung der Standardabweichung für die jeweilige Auflösungsgrade geschieht wieder in der Legende der Karte. In Abbildung 42 ist die vollständige Karte mit ihrem Titel zu sehen.

## Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Auflösung

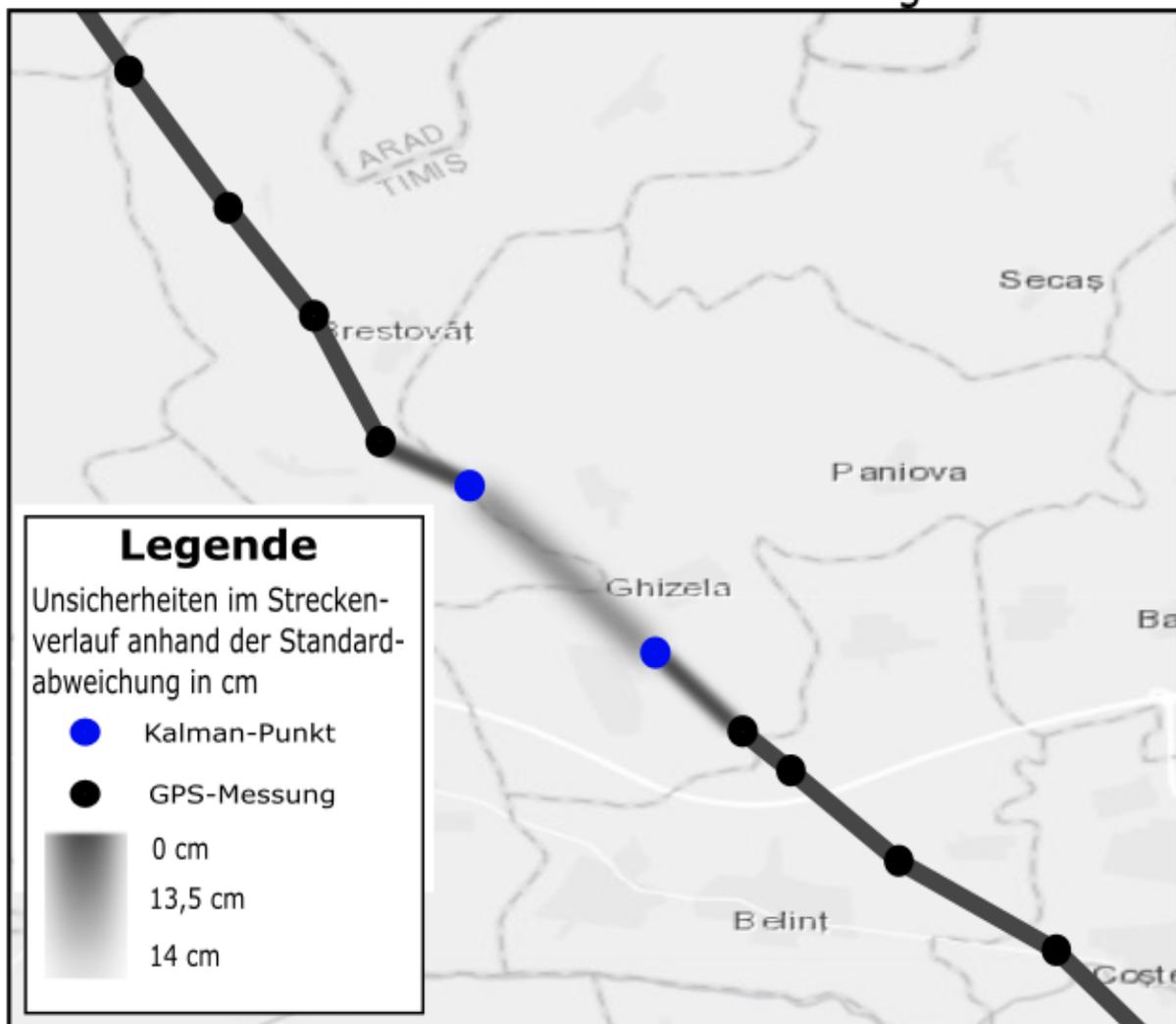


Abbildung 42: Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Auflösung.  
Quelle: Eigene Darstellung



## „Fog“ (Nebel)

Jetzt werden die Unsicherheiten in der Storchtrajektorie durch einen Nebel verdeutlicht. Dafür wird eine ovale Fläche über den Ausschnitt der GPS-Lücke gelegt. Die Auflösung dieser Fläche wird dann so weit verringert, bis der Eindruck eines Nebels über der Route entsteht. Durch einen Farbverlauf wird die Auflösung vom äußeren Rand der GPS-Lücke hingehend zur Mitte der GPS-Lücke immer höher. Somit ist der Nebel in der Mitte der GPS-Lücke am dichtesten. Dichter Nebel steht also wieder für mehr Unsicherheit im betroffenem Gebiet. Anschließend werden wieder die Legende und der Titel der Karte angepasst. Der Nebel ist in der Karte in Abbildung 43 zu sehen.

## Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Nebel

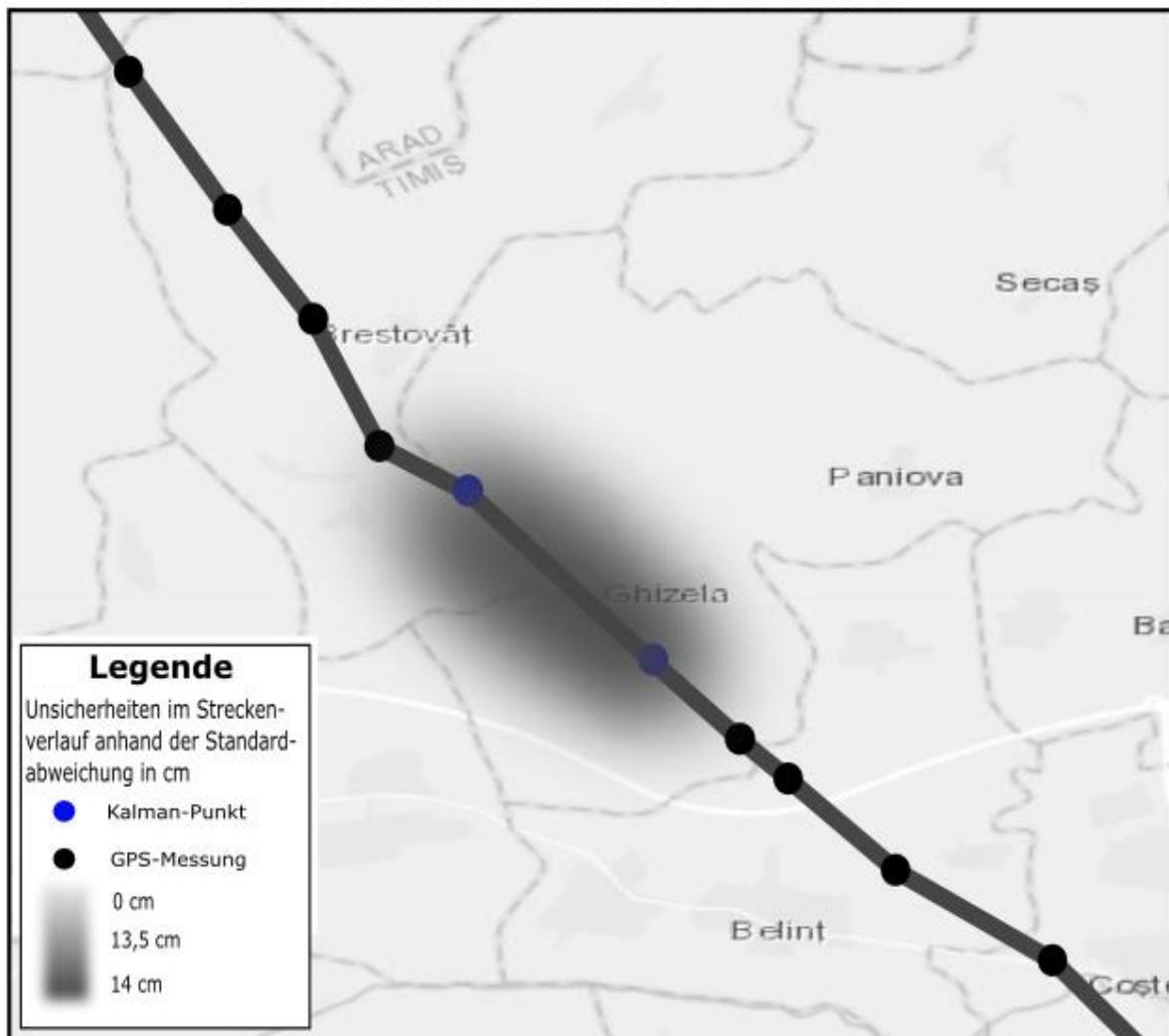


Abbildung 43: Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Nebel.  
Quelle: Eigene Darstellung

## Konturen

Wie auch bei den Onroad-Darstellungen, wird die Methode der „fuzzy borders“ unter den Konturen nicht aufgeführt. Auch hier ist die Ähnlichkeit zur Methode der Auflösung zu hoch. Es wird wieder die Methode „sketchiness“ und die der unsicheren Linien angewendet. Dazu wird die Linie um die beiden Kalman-Punkte gelöscht. Die so entstandene Lücke wird dann wiederhergestellt, indem eine Linie mit gezackten Verlauf vom Anfang der Lücke durch die beiden Kalman-Punkte zum Ende der Lücke erstellt wird. Je größer die Ausschläge der zackigen Linie sind, desto größer sind dort auch die Unsicherheiten. Diese Methode ist in Abbildung 44 zu sehen.

### Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Konturen ("sketchiness")

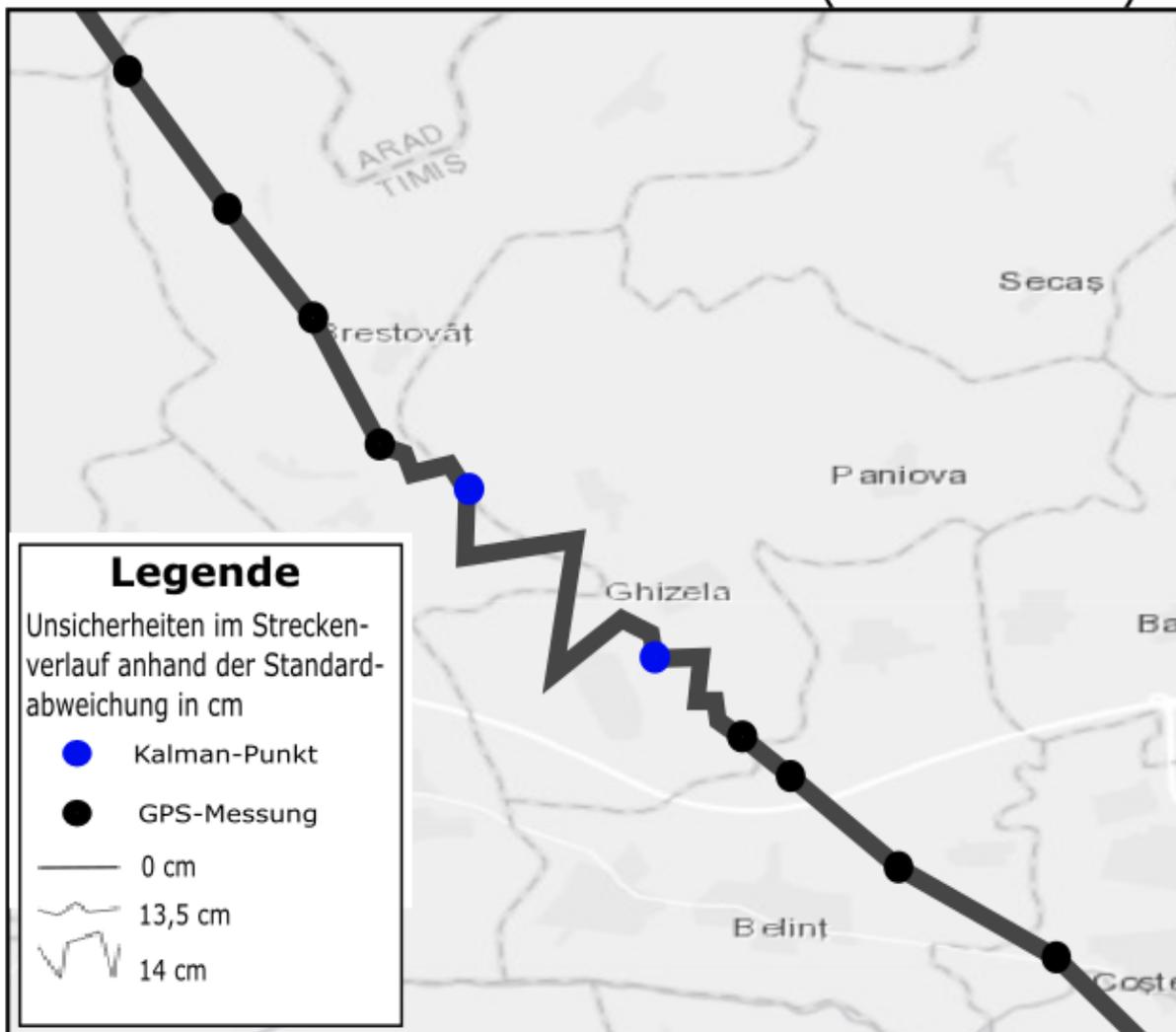


Abbildung 44: Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Konturen ("sketchiness").

Quelle: Eigene Darstellung

Für die Methode der unsicheren Linien wird als Kontur eine gepunktete Linie gewählt. Die Linie in der GPS-Lücke wird dafür in drei Teile getrennt. Die Teile werden dann abhängig von der Größe der Standardabweichung im betroffenen Bereich visualisiert. Dabei werden die Abstände zwischen den Punkten umso größer, je höher die Standardabweichung, bzw. die Unsicherheit, ist. Die fertige Karte mit ihrer Legende und dem Titel ist in Abbildung 45 dargestellt.

## Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Konturen (gepunktete Linie)

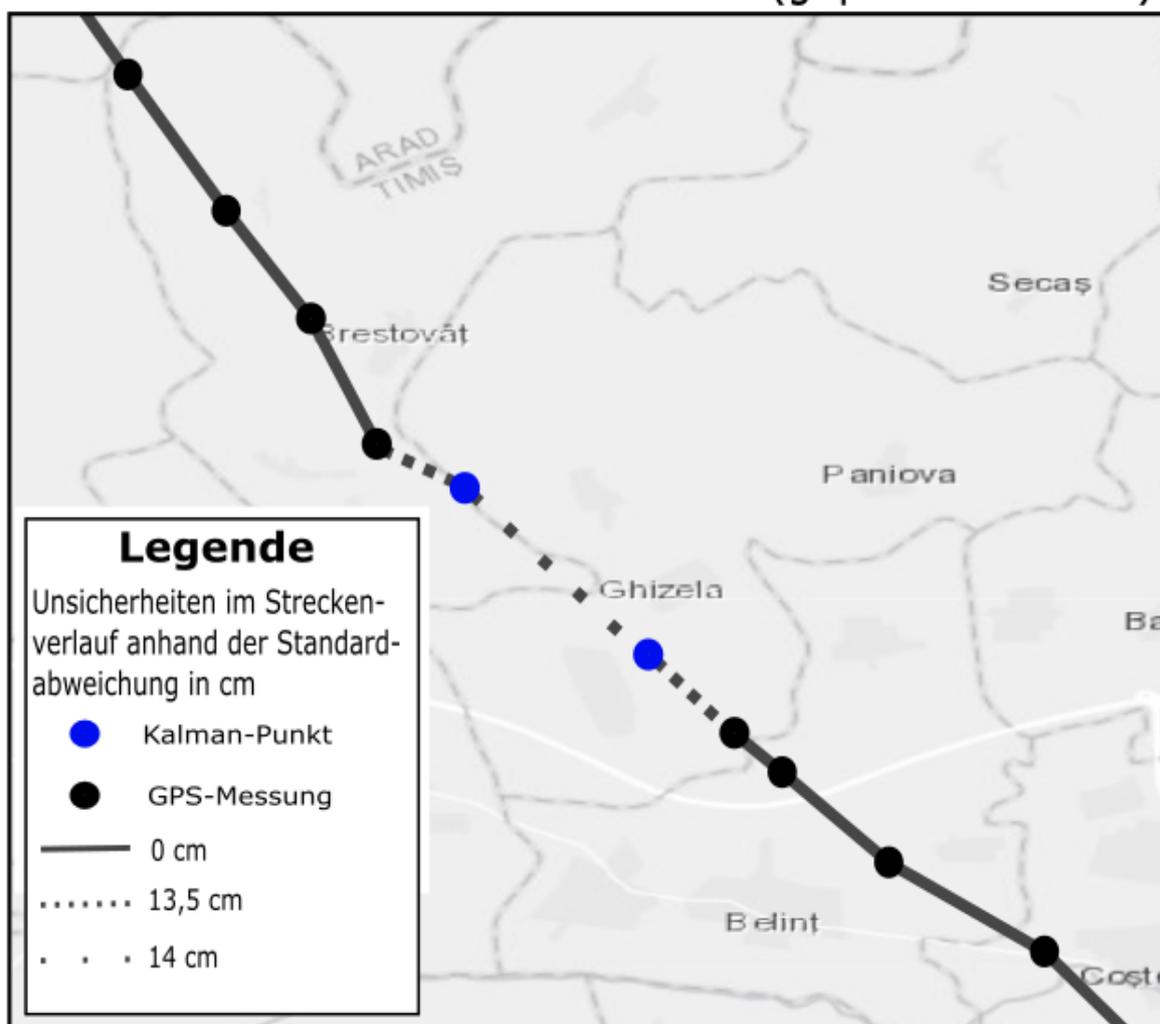


Abbildung 45: Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Konturen (gepunktete Linie).  
Quelle: Eigene Darstellung

## Unsicherheitskorridor

Die letzte verwendete Methode zu Unsicherheitsvermittlung in den Storchdaten ist der Unsicherheitskorridor. Als erstes wird dazu eine Kopie der Linie aus der GPS-Lücke erstellt. Diese wird dann verbreitert bis die gewünschte Breite erreicht ist. Nun wird ein linearer Farbverlauf für den Korridor erstellt, dessen Deckkraft am Rand gering ist und zur Mitte der GPS-Lücke hin immer dichter wird. Um den Korridor herum werden anschließend zwei Linien als Kontur direkt am Rand des Korridors erstellt. Diese Linien sollen den Korridor eindeutig abgrenzen. In der Legende geschieht wieder die Zuweisung der Standardabweichungen für die jeweiligen Grautöne. Letztlich wird noch der Titel der Karte angepasst. Das fertige Bild ist in Abbildung 46 zu sehen.

### Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand eines Unsicherheitskorridors

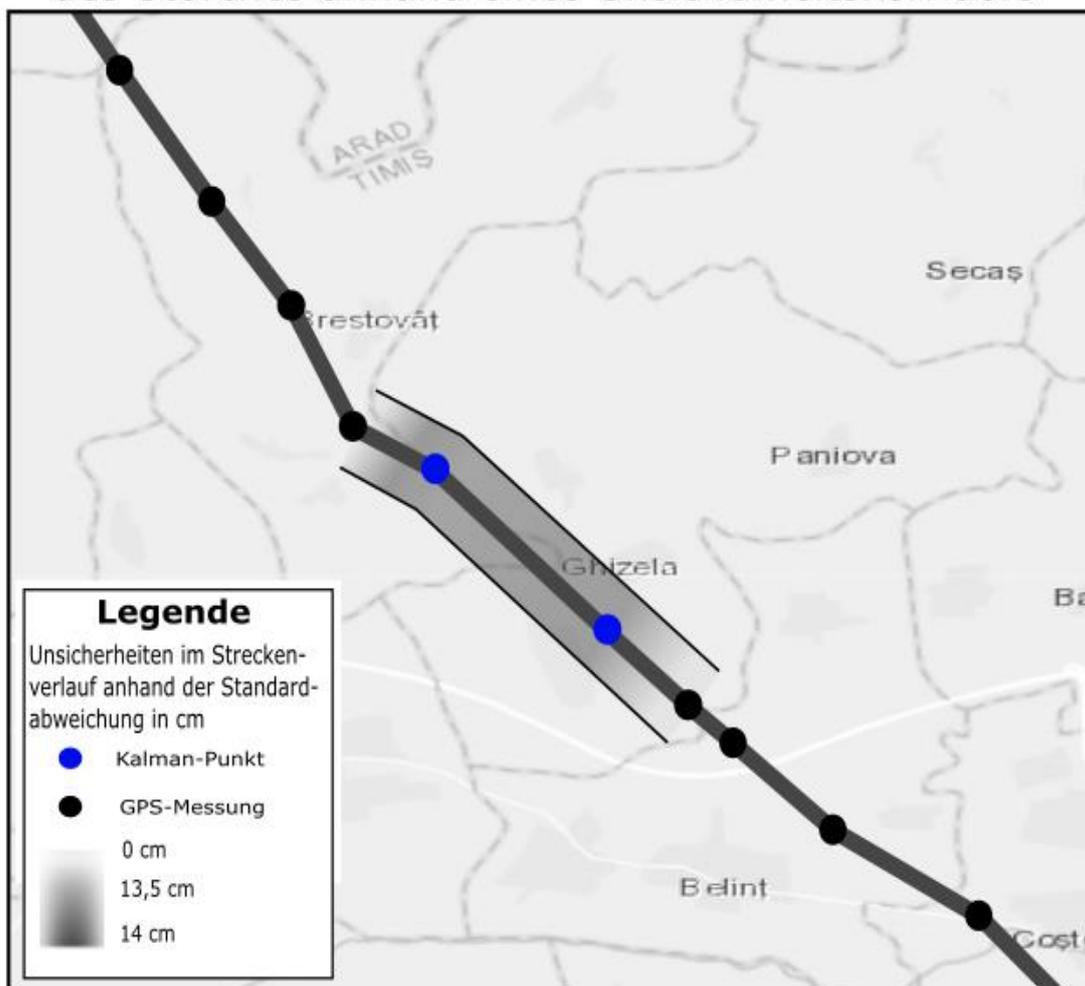


Abbildung 46: Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand eines Unsicherheitskorridors.  
Quelle: Eigene Darstellung





## 6. Ergebnisse und Diskussion

Das folgende Kapitel umfasst Diskussionen und Bewertungen über die Ergebnisse aus dem vorherigen Kapitel. Ebenfalls werden die Hypothesen aus Kapitel 3 anhand der erstellten Karte aus Kapitel 5 kritisch bewertet. Zusätzlich wird ein Vergleich zwischen den Onroad- und Offroad-Ergebnissen durchgeführt.

### 6.1 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse und Hypothesen anhand der erstellten Karten

In den nächsten Abschnitten werden alle verwendeten Visualisierungsmethoden bewertet. Dabei werden sowohl Probleme, als auch positive Effekte beschrieben. Hier werden immer zuerst die Onroad-Methoden und anschließend die Offroad-Methoden behandelt. Außerdem werden die Hypothesen aus Kapitel 3 kritisch beurteilt indem die Hypothesen mit den angefertigten Karten und deren Bewertungen abgeglichen werden.

#### **Multiple-Outcome-Darstellung**

Diese Art der Unsicherheitsvisualisierung wurde nur für den Datensatz der Störche angewendet. Das Ziel dieser Designmöglichkeit ist es die Unsicherheit im betroffenen Bereich der Storchtrajektorie anhand von mehreren möglichen Routen darzustellen. Da aber nur zwei Punkte mittels des Kalman-Filters berechnet wurden (Einhalten des fünfminütigen Intervalls zwischen GPS-Punkten), sind Werte für die Unsicherheiten nur für diese beiden Punkte vorhanden. Die GPS-Messungen werden als fehlerfrei angenommen, sodass die Unsicherheit ausgehend von den GPS-Messungen in Richtung der Kalman-Punkte immer größer wird. Mit der Multiple-Outcome-Darstellung aus Abbildung 37 ist aber die metrische Zuweisung von Unsicherheiten in Form von Standardabweichungen nicht zielführend, da über die Routen, welche nicht durch die Kalman-Punkte führen, keine Aussage über deren Genauigkeit/Unsicherheit getätigt werden kann. Selbst wenn die Routen so gestaltet wären, dass jede Route durch beide Kalman-Punkte führen würden, wäre eine metrische Zuweisung aufgrund der geringen Abstände zwischen den GPS-Messungen und den Kalman-Punkten nicht zielführend. Somit können zwar Unsicherheiten dargestellt werden, aber es ist nicht möglich metrische Werte für die Unsicherheiten sinnvoll anzugeben. Ein positiver Effekt ist, dass der Nutzer durch die auffällige Gestaltung der möglichen Routen sofort seinen Fokus auf die GPS-Lücke legt. Durch einen Blick auf die Legende ist dann sofort klar, dass Unsicherheiten im Bereich um die Kalman-Punkte existieren.



Die Hypothese hinsichtlich der Eignung der Multiple-Outcome-Darstellungen für die Visualisierung von Unsicherheiten in Raumdaten kann also angenommen werden. Es ist bedingt möglich, räumliche Unsicherheiten in linienhaften Objekten zu vermitteln. Das Problem der Zuweisung von metrischen Werten für die Unsicherheit kann aber nur unzureichend gelöst werden.

### **Farbton**

Zunächst wird das Ergebnis der Farbtöne für die Onroad-Routen diskutiert. Bei dieser Visualisierungsmethode treten keine größeren Probleme auf. Die einzelnen Routen werden gemäß ihrer Distanzdifferenz zur echten Distanz eingefärbt und sind so auch in der Legende zu finden. Ein Nachteil bei dieser Methode ist, dass die Farbtöne einer Ampel nur für drei mögliche Routen verwendet werden können. Sind mehr als drei Routen abgebildet muss eine andere Farbskala verwendet werden. Dies ist aber nicht ganz einfach, da es nicht viele Skalen gibt, welche so intuitiv funktionieren wie die Farbskala einer Ampel. Positiv zu vermerken ist, dass die Abbildung sehr einfach gehalten werden kann und dass kein großer Aufwand nötig ist um die Unsicherheiten in der Karte darzustellen.

Bei der Offroad-Visualisierung mit Farbtönen treten andere Probleme auf. Hier ist es schwierig die Standardabweichung an verschiedenen Stellen des Farbverlaufs eindeutig abzulesen. Da die Übergänge der Farben fließend erfolgen, ist somit keine deutliche Abtrennung von verschiedenen Standardabweichungen möglich. Durch den fließenden Verlauf ist außerdem nicht eindeutig zu erkennen, wo genau der unsichere Abschnitt beginnt. In Abbildung 38 ist dies nur ersichtlich, da dort ein GPS-Punkt vor der GPS-Lücke ist, welcher kennzeichnet, dass dort der unsichere Bereich beginnt. Positiv ist wieder, dass der Bearbeitungsaufwand minimal gehalten werden kann.

Die Aussage, dass die Visualisierung von Unsicherheiten mit verschiedenen Farbtönen die einfachste Methode ist, kann bestätigt werden. Die einfache Darstellung kann hier auch nochmal hervorgehoben werden. Inwiefern es möglich ist, die unsicheren Informationen abzustufen, hängt dabei maßgebend von der Art der Trajektorien ab. Im Fall der Taxirouten ist eine Abgrenzung möglich, da dort drei separate Linien eingefärbt werden. So kann jeder Farbe ein Wert zugewiesen werden. Für die Storchroute ist das nicht möglich. Hier wird eine einzige Trajektorie in mehreren Farben dargestellt und es ist somit nur schwer möglich eindeutige Abstufungen hinsichtlich der Unsicherheiten in der Wegführung zu vermitteln.



Abschließend lässt sich behaupten, dass der Farbton als Methode zur Unsicherheitsvisualisierung durchaus in manchen Fällen sinnvoll ist.

### **Farbsättigung**

Bei der Visualisierung der Unsicherheiten in den Taxirouten mittels der Farbsättigung treten ebenfalls wenig Probleme auf. Im Gegensatz zur Darstellung mit Ampelfarben ist die Anzahl der Routen bei der Darstellung in verschiedenen Farbsättigungsgraden nicht begrenzt. Hierbei ist nur darauf zu achten, dass die einzelnen Routen noch voneinander unterschieden werden können. Dies ist auch ein Nachteil der Methode der Farbsättigung. Wenn der Sättigungsgrad nicht ausreichend angepasst wird ist es für den Nutzer der Karte auf den ersten Blick nicht ersichtlich, wie groß die Unsicherheiten bei der betroffenen Route sind. Außerdem ist die Darstellung nicht so intuitiv wie die der Ampelfarben. Wie schon beim Farbton, ist auch hier der Bearbeitungsaufwand relativ geringgehalten.

Die Unsicherheitsdarstellung des Streckenverlaufs des Storches mit Hilfe von verschiedenen Sättigungsgraden ist ähnlich zu beurteilen, wie die der verschiedenen Farbtöne in Abbildung 38. Ein zusätzlicher negativer Effekt, neben der schwierigen Zuweisung der Standardabweichungen, ist die Tatsache, dass der Bereich der Unsicherheiten durch den gleichen Farbton nicht so stark auffällt. Es ist dadurch noch schwieriger exakte Werte aus der Legende abzulesen.

Obwohl ein geordneter Übergang von hoher bis niedriger Unsicherheit durch die verschiedenen Farbsättigungsgrade möglich ist, muss die Wahl des Farbtons trotzdem sorgfältig geschehen. Die Hypothese aus Kapitel 3, dass die Farbsättigung zur Visualisierung von Unsicherheiten verwendet werden kann, ist aber trotzdem als richtig anzusehen. Die erwähnte intuitive Wahrnehmung der Farbunreinheit, ist aber in beiden Fällen (Onroad- und Offroad-Visualisierung) nicht zu erkennen. Ohne eine Legende würde der Nutzer der Karte die unterschiedlichen Sättigungsgrade der Farbe nicht als Unsicherheiten in den Trajektorien einstufen. Es ist also möglich Unsicherheiten in linienhaften Objekten anhand von Farbsättigungsgraden darzustellen, die beste Methode ist es allerdings nicht.

### **Farbhelligkeit**

Abbildung 28 zeigt die Unsicherheitsvisualisierung der Taxirouten anhand von verschiedenen Farbhelligkeiten. Der einzige Unterschied zur Visualisierung anhand der Farbsättigung ist, dass



die dunkleren Linien kräftiger erscheinen und somit leichter unterschieden werden können. Auch hier ist es wichtig die Farbhelligkeit der einzelnen Routen so anzupassen, dass sie unterschieden werden können.

Bei der Darstellung der Storchroute ist wieder das Problem der schwierigen Zuteilung von metrischen Werten an spezifischen Stellen der Trajektorie aufzufinden. Hier ist es aber leichter zu sehen, wo die Übergänge von weniger unsicheren Abschnitten zu unsichereren Abschnitten erfolgt. Wie zuvor schon erwähnt, ist der Arbeitsaufwand wieder sehr gering.

Wie in Kapitel 3 beschrieben wurde, ist es beim Vergleich von Farbton, Farbsättigung und Farbhelligkeit, die letztere Methode welche am besten für die Visualisierung von Unsicherheiten geeignet ist. Dies liegt daran, dass dort Abschnitte mit ungleichen Unsicherheiten am leichtesten unterschieden werden können und somit auch die Zuweisung von metrischen Werten am einfachsten ist. Von den bisher erläuterten Designmöglichkeiten ist die Farbhelligkeit als Werkzeug zur Unsicherheitsvisualisierung die am besten geeignete Methode.

### **Transparenz**

Durch Transparenz werden in Abbildung 29 die Unsicherheiten in den möglichen Routen dargestellt. Dieser Effekt sorgt dafür, dass die sicherste der drei Routen am besten wahrgenommen wird. Bei genauerer Betrachtung der Karte sind auch die anderen beiden Routen zu erkennen. Die Unsicherheiten können durch die mehr oder weniger durchsichtige Darstellung der einzelnen Routen gut vermittelt werden. Es ist aber darauf zu achten, dass die Wege trotz der transparenten Darstellung noch immer erkennbar sind. Die intuitive Vermittlung von Unsicherheiten ist mit der Methode der Transparenz leicht zu erreichen, was ein sehr positiver Aspekt ist. Negativ zu betrachten ist allerdings, dass bei hoher Transparenz Informationen verloren gehen können.

Bei der Visualisierung der Storchwegführung mittels Transparenz, ist ebenfalls die intuitive Wahrnehmung der Unsicherheiten in den betroffenen Bereichen positiv hervorzuheben. Ein Nachteil dieser Designmöglichkeit ist wiederum, dass das Ablesen von konkreten Werten schwierig ist.

Die in Kapitel 3 erwähnten Vorteile der Transparenz zur Unsicherheitsvisualisierung gelten für Onroad- und Offroad-Darstellungen nicht gleichermaßen. In beiden Fällen ist zwar der



Bearbeitungsaufwand relativ gering, die klare Abgrenzung von unsicheren und sicheren Objekten ist aber im Fall der Storchrouten nicht so deutlich. Die Taxirouten hingegen können aufgrund von drei separaten Linien durch die verschiedenen Durchsichtigkeitsgrade eindeutig unterschieden werden. Aber da es nur eine Storchroute gibt und diese mit einem Verlauf von unterschiedlich hoher Transparenz gestaltet wird, ist hier die Abgrenzung von mehr oder weniger unsicheren Abschnitten nicht so eindeutig. Mehr visuelle Information sind auch nur dann gewährleistet, wenn die Objekte sehr stark transparent dargestellt werden. Trotz der genannten Nachteile ist die Transparenz, aufgrund der intuitiven Unsicherheitsvermittlung, dennoch zur Visualisierung von Unsicherheiten in linienhaften Objekten geeignet.

### **Auflösung**

Die Methode der Auflösung wird für die Taxirouten mit verschiedenen Farbtönen kombiniert. Dies dient zur besseren Unterscheidbarkeit und erleichtert außerdem die Zuweisung der Distanzdifferenzen in der Legende. Die Kombination lässt den Nutzer auf den ersten Blick erkennen, dass die Routen mit Unsicherheiten behaftet sind. Die verringerte Auflösung verdeutlicht dabei den Grad der Unsicherheit und der Farbton erlaubt eine eindeutige Unterscheidung der einzelnen Routen. Die Kombination aus den beiden Methoden ist also sehr positiv. Ein Nachteil ist der erhöhte Arbeitsaufwand, da zwei verschiedene Methoden angewendet werden. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Routen durch die verminderte Auflösung breiter werden und somit nicht mehr eindeutig auf der Straße liegen und so der Anschein entsteht, dass die grüne Route auf dem gelben Weg liegt.

Bei der Storchwegführung ist die verringerte Auflösung in drei verschiedene Abschnitte geteilt. Dies führt zu dem Problem, dass kein fließender Übergang zwischen den Bereichen entsteht und somit eigentlich nur drei verschiedene Standardabweichungen existieren. Dadurch ist die Unsicherheit in der Mitte der GPS-Lücke zwar immer noch am größten, der Bereich um die Mitte ist aber mit der gleichen Standardabweichung dargestellt obwohl diese zu den Rändern hin geringer werden sollte.

Die Darstellung von Unsicherheiten in linienhaften Objekten ist mit verringerter Auflösung bedingt möglich. Durch verringerte Auflösung wird zwar sofort der Eindruck von unsicheren Daten vermittelt, aber bei zu niedriger Auflösung wird das Objekt teilweise nicht mehr in seiner richtigen Form dargestellt, oder überlappt mit anderen Objekten in der Nähe. Hier ist auch wieder zu erwähnen, dass verminderte Auflösung für die Darstellung von Unsicherheiten



in mehreren Routen besser geeignet ist als für die Darstellung von Unsicherheiten in einer einzelnen Trajektorie.

### **„Fog“ (Nebel)**

Die Unsicherheiten der Taxirouten wurden mit zwei verschiedenen Arten von Nebel visualisiert. Bei der ersten Art sind die Routen jeweils mit einem eigenen Nebel überdeckt. Das Problem hierbei ist, dass der Nebel einer Route trotzdem die anderen Routen überdecken kann falls die zwei Wege zu nah beieinander sind oder sich kreuzen. An den Stellen, an welchen sich zwei Nebel überdecken kommt es dann zu dichteren Nebel obwohl dort kein dichterer Nebel sein sollte. Dieser Fehler lässt den Eindruck von größeren Unsicherheiten entstehen. Ein weiterer Nachteil ist, dass der Nebel teilweise schwer zu erkennen ist. Den Nebel dichter zu gestalten würde das vorher genannte Problem aber nur verstärken. Besser würde diese Methode für Routen funktionieren, die weiter auseinanderliegen. Bei der zweiten Art ist ein großer Nebel über allen Routen zu sehen. Ein Nachteil dieser Designmöglichkeit ist das auch Objekte die nicht mit Unsicherheiten behaftet sind ebenfalls durch den Nebel bedeckt werden. In Abbildung 32 ist zu sehen, dass das gesamte Straßennetz zwischen den drei Routen überdeckt ist und somit laut der Legende auch mit Unsicherheiten behaftet ist. Ebenfalls negativ zu betrachten ist die Tatsache, dass Route 1 (rechte Route) sich mit Route 2 (mittlere Route) kreuzt und dann nicht mehr ganz rechts verläuft. Das würde bedeuten, dass die Unsicherheiten der Route in diesem Moment geringer werden, was nicht der Fall ist. Der Vorteil beider Methoden ist, dass es für den Kartennutzer leicht ersichtlich ist, dass die Routen fehlerbehaftet sind.

Für die Storchroute wurde ein ovaler Nebel verwendet. Dieser wird zur Mitte hin immer dichter, was auch der größer werdenden Unsicherheit der GPS-Lücke entspricht. Der Nebel ist hier also eine gelungene Visualisierungsmöglichkeit um die Unsicherheiten im betroffenen Bereich zu vermitteln. Der einzige Nachteil ist hier, dass wieder keine genauen Werte der Standardabweichung für bestimmte Punkte aus der Karte gewonnen werden können.

Generell ist die Aussage, dass durch einen Nebel schon auf den ersten Blick deutlich wird, dass im überdeckten Bereich Fehler vorliegen, korrekt. Die erste Methode für die Taxirouten ist dabei ein ungünstiges Beispiel, da dort die drei Routen sehr nah beieinanderliegen und sich teilweise auch schneiden. Für einzelne Routen, oder Mehreren Routen ohne Schnitt- oder Berührungspunkte sind die Designmöglichkeiten eines Nebels für die Visualisierung von



Unsicherheiten in linienhaften Objekten gut geeignet. Der Nachteil, welcher in Kapitel 3 erwähnt wurde, dass Objekte durch den Nebel verdeckt werden ist im Nachhinein nicht als weiter schlimm einzustufen. Der Verlauf der Trajektorien kann immer noch deutlich erkannt werden und somit erfüllt der Nebel seinen Sinn, indem er durch die Überdeckung der Objekte Misstrauen beim Nutzer weckt. Nebel ist also eine gute Methode zur Visualisierung von Unsicherheiten für linienhafte Objekte.

### **Glyphen**

Die Unsicherheitsdarstellung anhand der Glyphen wurde nur für die Taxirouten angewendet. Dort werden drei verschiedene Symbole für die jeweilige Distanzdifferenz (Unsicherheit) verwendet. Da die Glyphen sofort ins Blickfeld des Nutzers geraten, kann dieser mit Hilfe der Legende sofort erkennen, dass die Symbole für gewisse Unsicherheiten stehen. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass ein Teil der Trajektorien, oder andere Objekte der Karte von den Glyphen überdeckt werden. Somit können gewisse Informationen verloren gehen.

Der Aussage über die Vielfältigkeit von Glyphen kann zugestimmt werden. Es gibt eine fast unbegrenzte Auswahl an verschiedenen Symbolen. Ebenfalls richtig ist die Hypothese, dass der Einsatz von Glyphen sehr flexibel ist, aber dass zu viele Symbole für Verwirrung beim Nutzer der Karte führen können. Allgemein sind Glyphen leicht zu verstehen und somit für die Unsicherheitsvermittlung in bestimmten Karten gut geeignet. Für die Unsicherheitsvermittlung in den Taxirouten sind Glyphen eine gute Designmöglichkeit, da jede Route nur einen metrischen Wert hat. Im Fall der Storchtrajektorie ist der Einsatz von Glyphen aufgrund der verschiedenen Standardabweichungen in einer Route nicht sinnvoll. Dort müssten zu viele Symbole in einem kleinen Bereich platziert werden. Die Eignung von Glyphen hängt also maßgeblich von den darzustellenden Daten ab, ist aber generell eine gute Methode.

### **Konturen**

Mit Hilfe von abgeänderten Konturen wurden zwei unterschiedliche Karten für die Taxirouten erstellt. Die erste Methode nennt sich „sketchiness“. Dort wird die Route durch einen gezackten Linienverlauf ersetzt. Der Vorteil dieser Methode ist, dass durch die markante Darstellung der Route sofort ersichtlich wird, dass Unsicherheiten in den betroffenen Routen bestehen. Diese Auffälligkeit ist aber auch gleichzeitig ein Nachteil. Durch den zackigen Verlauf



der Route, liegen diese nicht mehr direkt auf der gefahrenen Straße. Somit ist es teilweise nicht mehr möglich die Route der korrekten Straße zuzuweisen. Je größer die Unsicherheiten einer Route sind, desto größer sind die Ausschläge der Zacken. Die Zuweisung zur richtigen Straße wird also noch schwieriger. Die zweite Methode ist die punkthafte Darstellung der Routen. Der Vorteil hierbei ist, dass die Größe der Unsicherheiten durch den Abstand zwischen den Punkten gut skaliert werden kann. Ein negativer Effekt tritt aber bei zu großen Abständen zwischen den Punkten auf. Durch die großen Abstände kann es sein, dass der genaue Verlauf der Route auf den Straßen nicht mehr nachvollziehbar ist.

Für die Storchroute wurden die selben zwei Konturen verwendet, wie sie im oberen Abschnitt beschrieben wurden. Auch hier fällt die Darstellung der „sketchiness“ sofort auf. Durch die mehr oder weniger großen Ausschläge der Route kann auch der Grad der Unsicherheiten gut vermittelt werden. Ein Nachteil ist die abstrakte Visualisierung der Route im Bereich der GPS-Lücke. Auch wenn die genaue Route dort nicht bekannt ist, ist der gezackte Verlauf für das Flugverhalten eines Storches eher unwahrscheinlich. Mit der gepunkteten Kontur der Route wird die wahrscheinliche Wegführung des Storches schon besser imitiert. Hier ist aber der Übergang zwischen verschiedenen Unsicherheitsgraden schwer darzustellen. Somit ist auch die Zuweisung der Standardabweichung nicht ganz richtig. Die Linie in der GPS-Lücke in Abbildung 45 ist in drei Teile getrennt. Die Abstände der Punkte im vorderen Drittel sind dabei genauso groß wie die Abstände im letzten Drittel. Es ist also nicht möglich den Verlauf von einer größer werdenden Unsicherheit zu vermitteln, da lediglich zwei unterschiedliche Konturen vorhanden sind und somit auch nur zwei Standardabweichungen zugeteilt werden können. Es ist also nicht möglich Werte, wie bei der Visualisierung anhand von Farbtönen, zwischen den aufgezeigten Standardabweichungen abzuschätzen.

Das Problem, dass die Konturen in den unsicheren Bereichen nicht von den sicheren Konturen zu unterscheiden sind, ist in den vier erstellten Karten nicht aufgetreten. Aber die Aussage, dass nur geringe Änderungen an den Objekten vorzunehmen sind um Unsicherheiten zu vermitteln ist nicht ganz richtig. Vor allem bei der „sketchiness“ wird das Erscheinungsbild von gewissen Teilen der Objekte sehr stark verändert, sodass teilweise die ursprüngliche Form nicht mehr zu erkennen ist. In manchen Fällen kann dies zu Problemen führen. Dennoch sind die Konturen eine interessante Designmöglichkeit zur Visualisierung von Unsicherheiten in linienhaften Objekten.



## Unsicherheitskorridor

Ein Unsicherheitskorridor wurde nur für die Storchroute angefertigt. Die Schwierigkeit hier ist es die Unsicherheiten genau aufzuzeigen. Die Breite des Korridors sollte eigentlich einen Bereich darstellen, in welchem sich der Storch mit höchster Wahrscheinlichkeit aufgehalten hat. Das bedeutet, dass die Unsicherheiten am Rand des Korridors höher sein müssen als in der Nähe der eingezeichneten wahrscheinlichen Route. Da aber die Standardabweichung zwischen den einzelnen Punkten (GPS- und Kalman-Punkte) auch unterschiedlich ist, wäre ein linearer Verlauf in horizontaler und vertikaler Richtung benötigt worden. Dies hat sich aber als schwierig herausgestellt, weswegen nur ein horizontaler Verlauf erstellt wurde. Der Effekt von Unsicherheiten kann aber trotzdem vermittelt werden. Nur die Angabe von metrischen Werten in vertikaler Richtung des Korridors ist nicht dargestellt.

Bei der Visualisierung der Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storchs, wird die Größe der Unsicherheit nicht (wie in Kapitel 3 beschrieben) über die Breite des Korridors, sondern über einen Farbverlauf, angegeben. Der Grund dafür ist im oberen Abschnitt erläutert. Die Schwierigkeit der Darstellung von mehreren Korridoren für nah beieinanderliegenden Linien kann aber bestätigt werden. Deshalb wurde für die Taxirouten die Darstellung von Unsicherheitskorridoren nicht durchgeführt. Für einzelne Linien ist die Darstellung von Unsicherheitskorridoren aber dennoch eine gute Lösung. Falls nicht nur einzelne Werte der Standardabweichung vorhanden sind, kann auch eine detailliertere Abbildung erstellt werden.

Nach den aufgeführten Bewertungen der verschiedenen Designmöglichkeiten für Unsicherheitsvisualisierungen fällt auf, dass jede Methode Nachteile hat. Die Wahl von Visualisierungsmethoden ist also immer abhängig von den Datensätzen und den zu vermittelnden Informationen.

## 6.2 Vergleich von Onroad- und Offroad-Ergebnissen

Der am meisten offensichtliche Unterschied zwischen den Onroad- und Offroad-Daten ist die Abhängigkeit der Taxirouten vom Straßennetz in New York City. Außerdem werden für die Taxirouten immer drei verschiedene Routen visualisiert, wobei nur eine Route für den Storchstreckenverlauf dargestellt wird. Dies liegt an den unterschiedlichen Herangehensweisen für die Wegfindung in den beiden Datensätzen. Während für die Storchroute eine GPS-Lücke mit errechneten Kalman-Punkten geschlossen wurde, werden bei



den Taxidaten verschiedene mögliche Routen berechnet die das Taxi vom Startpunkt bis zum Endpunkt gefahren sein könnte. Ein weiterer Unterschied ist, dass die Unsicherheit der Taxirouten mit Hilfe der Distanzdifferenz zur Originalstrecke angegeben wird, während die Unsicherheiten der Storchtrajektorie anhand von Standardabweichungen angegeben werden. Die folgenden Abschnitte werden zeigen, welche (allgemeinen) Unterschiede bei der Auswahl und Durchführung der verschiedenen Unsicherheitsvisualisierungsmethoden zwischen Onroad- und Offroad-Trajektorien zu finden sind.

### **Multiple-Outcome-Darstellung**

Der Unterschied zwischen Onroad- und Offroad-Karten ist die mögliche Anzahl an verschiedenen Wegen. Während die Anzahl der Onroad-Routen aufgrund des Straßennetzes begrenzt sind, sind die möglichen Wegführungen für die Offroad-Routen unbegrenzt. Ein weiterer Unterschied ist, dass der Verlauf der Offroad-Routen jegliche Form annehmen kann, während die Routen der Onroad-Wege an Straßen gebunden sind.

### **Farbton**

Die Unterschiede der beiden Karten entstehen hier größtenteils durch die unterschiedliche Anzahl an Routen. Während jede einzelne Taxiroute einheitlich gefärbt ist, sind in der Storchroute mehrere Farben in der einzigen Trajektorie zu sehen. Da außer der Farbanpassungen keine anderen Bearbeitungsschritte an den beiden Karten vorgenommen wurden, existieren auch keine weiteren Unterschiede.

### **Farbsättigung**

Bei der Farbsättigung sind die Unterschiede dieselben, wie bei der Karte der Farbtöne. In den Onroad-Routen hat jede Route eine eigene Farbe, während die Storchtrajektorie mehrere Farbsättigungsgrade enthält.

### **Farbhelligkeit**

Auch die Karten der Farbhelligkeit unterscheiden sich nur dadurch, dass die Farbhelligkeiten einmal getrennt (Onroad-Karte) und einmal als Farbverlauf (Offroad-Karte) dargestellt werden. Allgemeine Unterschiede in der Unsicherheitsvisualisierung zwischen Onroad- und Offroad-Trajektorien sind nicht zu erkennen.



## **Transparenz und Auflösung**

Ein allgemeiner Unterschied ist in der Unsicherheitsvisualisierung von On- und Offroad-Karten mittels veränderter Transparenz/Auflösung wieder nicht zu erkennen. Die Unterschiede in den Abbildungen 29/30 und 41/42 sind auf die verschiedene Anzahl der Routen in den Karten zurückzuführen. Die unterschiedlichen Grade der Transparenz/Auflösung sind in den Taxirouten getrennt abgebildet, während in der Storchtrajektorie mehrere Grade von Transparenzen/Auflösungen dargestellt werden.

## **Nebel**

Ein allgemeiner und signifikanter Unterschied der Unsicherheitsvisualisierung zwischen Onroad- und Offroad-Trajektorien kann wieder nicht festgestellt werden. Der Unterschied der Abbildungen 31/32 und 43 ist die betroffene Anzahl an Routen. Während der Nebel in Abbildung 32 mehrere Routen überdeckt, wird in Abbildung 43 nur eine Route vom Nebel überdeckt.

## **Glyphen**

Selbst wenn für die Offroad-Visualisierung drei unterschiedliche Routen mit Glyphen versehen worden wären, wäre kein signifikanter Unterschied zwischen der Onroad-Visualisierung und Offroad-Visualisierung zu sehen. Die Symbole würden in beiden Abbildungen den Grad der Unsicherheit der jeweiligen Route beschreiben. Dieser ist aber unabhängig von der Art der Visualisierung (Onroad/Offroad).

## **Konturen**

Bei der Darstellung der Unsicherheiten in den Onroad- und Offroad-Trajektorien mittels gepunkteten Konturen ist kein allgemeiner Unterschied zu erkennen, außer die Abstände zwischen den Punkten werden so groß, dass die Onroad-Wegführungen nicht mehr den jeweiligen Straßen zugewiesen werden können. Bei der Methode der „sketchiness“ hingegen, sind signifikante Unterschiede zu erkennen. Während bei der Gestaltung der gezackten Linie der Offroad-Karte kaum Rücksicht auf den Verlauf der Trajektorie genommen werden muss (die Route muss lediglich durch alle GPS-/Kalman-Punkte verlaufen), ist der Verlauf der Wegführungen der Onroad-Karte enorm wichtig. Für die Onroad-Visualisierung muss darauf geachtet werden, dass die Route trotz ihres gezackten Verlaufs immer noch der



entsprechenden Straße zugewiesen werden kann. Ist dies nicht möglich, ist es dem Nutzer der Karte nicht möglich die gewünschten Informationen aus der Abbildung zu gewinnen.

### **Unsicherheitskorridor**

Die Anwendung von Unsicherheitskorridoren ist für die Unsicherheitsvisualisierung von Onroad-Trajektorien in den meisten Fällen ungeeignet. Dies liegt daran, dass häufig nicht die Routen an sich unsicher sind, sondern lediglich nicht bekannt ist welche der möglichen Routen tatsächlich befahren wurde. Eine Ausnahme hierbei ist, wenn der genaue Verlauf einer Straße nicht bekannt ist. Unsicherheiten im Verlauf von Straßen können mit Unsicherheitskorridoren vermittelt werden.

Wie durch die oberen Abschnitte zu erkennen ist, existieren durchaus signifikante Unterschiede in den Onroad- und Offroad-Visualisierungen dieser Arbeit. Obwohl einige der Unterschiede auf die ungleichen Routenberechnungen und die ungleiche Anzahl an abgebildeten Routen zurückzuführen sind, gibt es dennoch auch allgemeine Unterschiede in der Auswahl und Durchführung der Unsicherheitsvisualisierungsmethoden für Onroad- und Offroad-Wegführungen. Ein allgemeiner Unterschied bei der Auswahl der Unsicherheitsvisualisierungsmethoden, ist die Eignung der verschiedenen Designmöglichkeiten für die Onroad- und Offroad-Visualisierung. Viele Methoden sind zwar zur Unsicherheitsvisualisierung sowohl in Onroad- als auch in Offroad-Trajektorien geeignet, am Beispiel der Unsicherheitskorridore ist aber zu sehen, dass dies nicht immer der Fall ist. Ein Beispiel für Unterschiede bei der Durchführung der unterschiedlichen Methoden, wurde im Abschnitt der Konturen aufgeführt. Ungleichheiten bei der Durchführung der Unsicherheitsvisualisierungsmethoden in Onroad- und Offroad-Trajektorien entstehen dabei durch die Abhängigkeit der Onroad-Wegführungen vom vorgegebenen Straßennetz.



## 7. Fazit

Zusammenfassend werden die einzelnen Arbeitsschritte noch einmal kurz erläutert. Zunächst wird eine ausführliche Recherche über das Thema der Unsicherheitsvisualisierung durchgeführt. Dabei werden Methoden für die Unsicherheitsvisualisierung gesucht. Für die Methoden werden anschließend Hypothesen über die Eignung für die Unsicherheitsvisualisierung in linienhaften Objekten aufgestellt. Nachdem die theoretischen Grundlagen somit geklärt und erläutert sind, wird sich als nächstes mit den beiden Datensätzen beschäftigt. Hier ist das Ziel, den Aufbau und Inhalt der Datensätze zu verstehen und die Unsicherheiten der Daten zu erkennen. Die Unsicherheit der Onroad-Daten ist die tatsächlich gefahrene Route und die Unsicherheiten der Offroad-Route sind gewisse GPS-Lücken in deren Verlauf. Aus den Onroad-Daten werden dann mehrere Routen zwischen dem Start- und Endpunkt einer ausgewählten Route berechnet. Für die Offroad-Route wird eine GPS-Lücke in der Flugroute eines Storchs gesucht und diese wird anschließend durch einen Kalman-Filter geschlossen. Die so entstandenen Routen werden nun mit den Unsicherheitsvisualisierungsmethoden aus der vorhergegangenen Recherche dargestellt. Der letzte Arbeitsschritt ist es die so erstellten Karten zu bewerten. Dabei wird jede Methode für die Unsicherheitsvisualisierungen der Onroad- und Offroad-Trajektorien untersucht und es werden die Hypothesen aus den vorherigen Kapiteln überprüft. Die Ergebnisse davon werden anschließend beschrieben.

Durch diese Arbeitsschritte werden einige Erkenntnisse über verschiedene Visualisierungsmethoden für Unsicherheiten gewonnen. Dabei sind stets die in Abschnitt 1.2 aufgezählten Hypothesen im Fokus. Die beiden Fragenstellungen nach dem Vorhandensein von geeigneten Unsicherheitsvisualisierungsmethoden für Onroad- und Offroad-Trajektorien konnten hier auch geklärt werden. Es gibt durchaus einige Designmöglichkeiten, welche sowohl für die Visualisierung von Unsicherheiten in Onroad-Wegführungen, als auch in Offroad-Wegführen, verwendet werden können. Hier sind die Methoden der Farbtöne/Farbsättigung/Farbhelligkeit oder auch die Verwendung von Nebel zu nennen. Ebenso gibt es aber auch Methoden die für die Unsicherheitsvermittlung für eine der beiden Datenkategorien (Onroad/Offroad) weniger gut geeignet oder sogar überhaupt nicht geeignet sind. Bei den Methoden der Konturen und der Unsicherheitskorridore ist dies der Fall. Eine weitere Hypothese ist die Frage nach allgemeinen Unterschieden bei der Auswahl und für die



Durchführung der gewählten Unsicherheitsvisualisierungsmethoden für Onroad- und Offroad-Trajektorien. In dieser Arbeit wird ersichtlich, dass viele Unterschiede in den selbst erstellten Karten auf die ungleichen Routenberechnungen und die ungleiche Anzahl an dargestellten Routen zurückzuführen sind. Dennoch sind auch einige allgemeine Differenzen in den Visualisierungsmethoden vorzufinden, die nur durch die Unterschiede von Onroad- und Offroad-Visualisierungen zustande gekommen sind. Hier können die Methoden der Konturen und der Multiple-Outcome-Darstellungen aufgeführt werden. Eine weitere Erkenntnis dieser Arbeit ist, dass es keine allgemeine Lösung für die Unsicherheitsvisualisierung gibt. Die Methoden müssen immer abhängig von den Voraussetzungen der zugrundeliegenden Datensätze und den zu vermittelnden Informationen ausgewählt werden.

In diesem Abschnitt werden nun noch einige Empfehlungen für Unsicherheitsvisualisierungsmethoden abhängig vom vorliegenden Datentyp erläutert. Wie schon erwähnt wurde, gibt es einige Methoden die unabhängig vom Typ der Trajektorie verwendet werden können. Diese sind Farbtöne/Farbsättigung/Farbhelligkeit, Transparenz/Auflösung und Nebel. Eine Methode die gut für die Unsicherheitsvisualisierung von Onroad-Trajektorien geeignet ist, ist die Darstellung mit Glyphen. Eine Empfehlung für die Darstellung von Unsicherheiten in Offroad-Trajektorien ist die Verwendung von Konturen und Unsicherheitskorridoren.

Weitere Forschungsaufgaben in dem behandelten Thema sind die Untersuchung der aufgestellten Hypothesen nicht nur für linienhafte Objekte, sondern auch für punkthafte und flächenhafte Objekte. Zwei andere Aspekte der Unsicherheitsvisualisierung, welche in dieser Arbeit nicht erforscht wurden, sind das Verhalten der Unsicherheitsmethoden bei verschiedenen Maßstäben der Karten und die Darstellung von Unsicherheiten durch die Anpassung der Größe der mit Unsicherheiten behafteten Objekten.

Wie auch schon in Kapitel 1 erwähnt wird, ist derzeit das Thema der Unsicherheitsvisualisierung ein Forschungsgebiet, welches hauptsächlich von Experten behandelt wird. Die Notwendigkeit von Unsicherheitsvisualisierungen für den Laien verständlich zu machen wäre aufgrund der zahlreichen mit Unsicherheiten behafteten Medienkarte, wie sie auch oft in den Nachrichten verwendet werden, aber durchaus sinnvoll.



## Quellenverzeichnis

1. Abel, H., "Global Positioning System. Funktionsweise und mathematische Grundlagen", 2001.
2. Bhatta, B., "Global Navigation Satellite Systems", BS Publications:Hyderabad, 2010.
3. bzarg, "How a Kalman filter works, in pictures", <http://www.bzarg.com/p/how-a-kalman-filter-works-in-pictures/>, 21.06.2018.
4. Demuth, J., L., Morss, R., E., Lazo, J., K., Hildebrand, D., C., "Improving Effectiveness of Weather Risk Communication on the NWS Point-and-Click Web Page.", 2013.
5. El-Rabbany, A., "Introduction to GPS", Artech House: Boston, 2002.
6. Faraday Physics, "Graphical Analysis", <https://faraday.physics.utoronto.ca/PVB/Harrison/ErrorAnalysis/Graphical.html>, 06.06.2018.
7. Glemser, M., Klein, U., "Datenunsicherheit in hybriden Geoinformationssystemen", 1999.
8. Holdgraf, C., "The Importance of Uncertainty", 2014.
9. Homepages, "Farbmodell", <https://homepages.thm.de>, 25.07.2018
10. INSPIRE, "Richtlinie 2007/2/EG zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Union", 2007.
11. Jaarsveld, H., "Literature Synthesis: Techniques for visualizing uncertainty in 3D laser-scanned computer models.", o.J.
12. Kinkeldey, C., "Data Analysis under Uncertainty", o.J.
13. Klobuchar, J.A., "Ionospheric Effects on GPS", 1991.
14. Krämer, M., Dummer, M., Ruppert, T., Kohlhammer, J., "Tackling uncertainty in combined visualizations of underground information and 3D city models", 2011.
15. Köhne, A., Wößner, M., <http://www.kowoma.de/gps/Fehlerquellen.html>, 22.05.2018.
16. MacEachren, A., M., "Visualizing Uncertain Information. Cartographic Perspective", 1992.



17. Marktforschungs-Wiki, "Box-Plot", <http://marktforschung.wikia.com/wiki/Box-Plot>, 06.06.2018.
18. Mikael, K., Aro, J., "Visualisation of uncertainty", o.J.
19. nyc.gov, "TLC Trip Data",  
"[http://www.nyc.gov/html/tlc/html/about/trip\\_record\\_data.shtml](http://www.nyc.gov/html/tlc/html/about/trip_record_data.shtml)", 26.06.2018.
20. Pelzer, H., "Deformationsuntersuchungen auf der Basis kinematischer Bewegungsmodelle", 1987.
21. Potter, K., "Uncertainty Visualization: State of the Art", Scientific Computing and Imaging Institute University of Utah, 2010.
22. Shi, W., "Principles of Modeling Uncertainties in Spatial Data and Spatial Analyses", Taylor and Francis Group, 2010.
23. Schiewe, J., "Visualisierung unsicherer Informationen in Medienkarten - Notwendigkeit und kartographische Umsetzung", AGIT - Journal für Angewandte Geoinformatik, 2016.
24. Schiewe, J., "Improving collective intelligence and exploration in a VGI like context through communication of uncertainty information", 2013.
25. Schiewe, J., Schweer, M., "Vertrauen im Rahmen der Nutzung von Unsicherheitsinformationen in raumzeitlichen Entscheidungsprozessen", 2013.
26. The Data Visualisation Catalogue, "Error Bars",  
[https://datavizcatalogue.com/methods/error\\_bars.html](https://datavizcatalogue.com/methods/error_bars.html), 06.06.2018.
27. Tak, S., Toet, A., "Color and Uncertainty: It is not always Black and White", 2014.
28. Wasmeier(a), P., "Kalman - Filterung", 2016.
29. Wasmeier(b), P., "Optimale Punktschätzung mittels Kalman-Filterung Übung. 5", 2016.
30. "Was sind Daten?", <http://www.univation.org/faq/daten>, 04.05.2018.
31. Wick, R., "Unsicherheiten und Positionsfehler von GPS-Trajektorien", 2013
32. Yau, N., Visualizing the Uncertainty in Data. 2018.



33. Zuk, T., D., "Visualizing Uncertainty", 2008.





## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Allgemeine Kategorien für Unsicherheiten. Quelle: Eigene Darstellung.....	4
Abbildung 2: GPS-Trajektorie mit Lücken. Quelle: Wasmeier(b), 2016.....	14
Abbildung 3: "Errorbar" um einen Punkt. Quelle: Faraday Physiscs, 2018.....	19
Abbildung 4: Aufbau eines Box-Plots. Quelle: Marktforschungs-Wiki, 2018.....	20
Abbildung 5: "Multiple Outcome" als Liniendiagramm. Quelle: Yau, 2018.....	21
Abbildung 6: "Multiple Outcome" Graphik als Tabelle. Quelle: Yau, 2018 .....	22
Abbildung 7: Farbkreis mit Sättigung und Farbton. Quelle: Homepages, 2018 .....	23
Abbildung 8: Transparente Darstellung einer mittelalterlichen Kirche. Quelle: Jaarsveld, o.J. .....	24
Abbildung 9: Flussverlauf in hoher und niedriger Auflösung. Quelle: MacEachren, 1992 .....	25
Abbildung 10: Darstellung einer Karte mit und ohne Nebel. Quelle: MacEachren, 1992 .....	26
Abbildung 11 Genauigkeitsangabe mit Hilfe einer Glyphe. Quelle: Kinkeldey, o.J.....	27
Abbildung 12: Texturen zur Darstellung von unsicheren Daten. Quelle: Kinkeldey, o.J. ....	28
Abbildung 13: Beispiel für die "Fill Clarity". Quelle: MacEachren, 1992.....	28
Abbildung 14: Verschwommener Grenzverlauf zur Darstellung von Unsicherheiten. Quelle: Kinkeldey, o.J. ....	29
Abbildung 15: "sketchiness" in einem Diagramm. Quelle: Kinkeldey, o.J. ....	29
Abbildung 16: Verschiedene Unsicherheitskorridore. Quelle: Schiewe, 2013 .....	30
Abbildung 17: verschiedene Darstellungsmöglichkeiten von Unsicherheiten für Vektorpfeile. Quelle: Mikael, o.J. ....	31
Abbildung 18: Glyphe zur Darstellung von Unsicherheiten. Quelle: Krämer et al., 2011 .....	36
Abbildung 19: Ausschnitt des New York City Straßennetzwerkes mit dem ausgewählten Punktpaar. Quelle: Eigene Darstellung .....	41
Abbildung 20: Flugrouten der Störche Jutta (Grün), ZiegenTom (Blau) und Sepp (Gelb). Quelle: Eigene Darstellung .....	43
Abbildung 21: Route 1,2 und 3. Quelle: Eigene Darstellung.....	46
Abbildung 22: Alle möglichen Routen mit New York City Straßennetzwerk als Grundkarte. Quelle: Eigene Darstellung .....	47
Abbildung 23: Punkthafte Trajektorie mit neu berechneten Punkten der GPS-Lücke. Quelle: Eigene Darstellung.....	49
Abbildung 24: Linienhafte Darstellung der Storchtrajektorie mit geschlossener GPS-Lücke. Quelle: Eigene Darstellung .....	50
Abbildung 25: Bearbeitetes Ausgangsbild der Taxi-Routen. Quelle: Eigene Darstellung.....	52
Abbildung 26: Visualisierung von Unsicherheiten in gefahrenen Taxirouten anhand von Farbtönen. Quelle: Eigene Darstellung .....	53
Abbildung 27: Visualisierung von Unsicherheiten in gefahrenen Taxirouten anhand von Farbsättigung. Quelle: Eigene Darstellung.....	54
Abbildung 28:: Visualisierung von Unsicherheiten in gefahrenen Taxirouten anhand von Farbhelligkeit. Quelle: Eigene Darstellung .....	55
Abbildung 29: Visualisierung von Unsicherheiten in gefahrenen Taxirouten anhand von Transparenz. Quelle: Eigene Darstellung .....	56



Abbildung 30: Visualisierung von Unsicherheiten in gefahrenen Taxirouten anhand von Auflösung. Quelle: Eigene Darstellung .....	57
Abbildung 31: Visualisierung von Unsicherheiten in gefahrenen Taxirouten anhand von Nebel (Methode 1). Quelle: Eigene Darstellung .....	58
Abbildung 32: Visualisierung von Unsicherheiten in gefahrenen Taxirouten anhand von Nebel (Methode 2). Quelle: Eigene Darstellung .....	59
Abbildung 33: Visualisierung von Unsicherheiten in gefahrenen Taxirouten anhand von Glyphen. Quelle: Eigene Darstellung.....	60
Abbildung 34: Visualisierung von Unsicherheiten in gefahrenen Taxirouten anhand von Konturen ("sketchiness"). Quelle: Eigene Darstellung .....	61
Abbildung 35: Visualisierung von Unsicherheiten in gefahrenen Taxirouten anhand von Konturen (gepunktete Linie). Quelle: Eigene Darstellung .....	62
Abbildung 36: Bearbeitetes Ausgangsbild der Storchroute. Quelle: Eigene Darstellung .....	63
Abbildung 37: Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand einer Multiple-Outcome-Darstellung. Quelle: Eigene Darstellung .....	64
Abbildung 38: Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Farbtönen. Quelle: Eigene Darstellung .....	65
Abbildung 39: Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Farbsättigung. Quelle: Eigene Darstellung .....	66
Abbildung 40: Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Farbhelligkeit. Quelle: Eigene Darstellung .....	67
Abbildung 41: Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Transparenz. Quelle: Eigene Darstellung .....	68
Abbildung 42: Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Auflösung. Quelle: Eigene Darstellung .....	69
Abbildung 43: Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Nebel. Quelle: Eigene Darstellung.....	70
Abbildung 44: Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Konturen ("sketchiness"). Quelle: Eigene Darstellung.....	71
Abbildung 45: Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand von Konturen (gepunktete Linie). Quelle: Eigene Darstellung .....	72
Abbildung 46: Visualisierung von Unsicherheiten im Streckenverlauf des Storches anhand eines Unsicherheitskorridors. Quelle: Eigene Darstellung.....	73

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht von geeigneten und nicht geeigneten Visualisierungsmethoden für geometrische Unsicherheiten in linienhaften Objekten .....	38
Tabelle 2: neu berechnete Koordinaten der Punkte aus der GPS-Lücke mit ihren Genauigkeiten .....	49