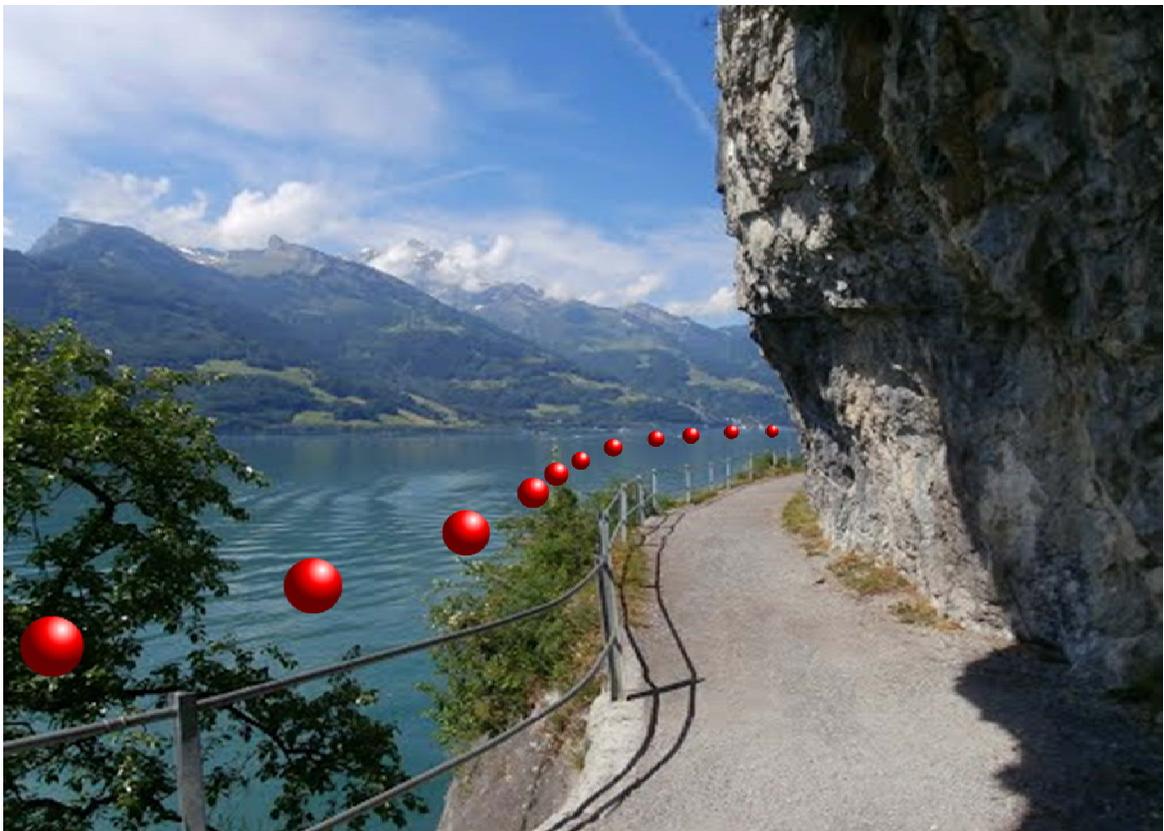


Unsicherheiten und Positionsfehler von GPS-Trajektorien



30.09.2013

Masterarbeit von Reto Wick

Unsicherheiten und Positionsfehler von GPS-Trajektorien

GEO 511: Masterarbeit
30.09.2013

Reto Wick
Matrikelnummer: 06-913-172
reto.wick@bluemail.ch

Betreut von
Prof. Dr. Ross Purves & Dr. Patrick Laube

Geocomputation
Fakultätsvertreter: Prof. Dr. Ross Purves



**Universität
Zürich^{UZH}**

Geographisches Institut Universität Zürich
Winterthurerstrasse 190
CH-8057 Zürich

Titelbild: Weg der Schweiz (eigene Abb.)

Reto Wick
Weierstrasse 3
9500 Wil
reto.wick@bluemail.ch

Zusammenfassung

Mobil erfasste Bewegungsdaten, aufgezeichnet mit Hilfe von GPS-fähigen Geräten wie Smartphones, tragbaren GPS-Geräten oder gar GPS-Uhren, sind in der heutigen Zeit omnipräsent. Ihre Analyse öffnet neue, vielversprechende Forschungsfelder, angefangen von der Erkennung von Bewegungsmustern bis hin zur Identifikation der Fortbewegungsart allein aus den GPS-Datensätzen oder gar zur Vorhersage möglicher bevorstehender Bewegungsverhalten. So zahlreich diese Anwendungen mittlerweile sind, so erstaunlich das bisher nur ungenügend erarbeitete Wissen über den Einfluss der in allen GPS-Daten enthaltenen Unsicherheiten.

In der vorliegenden Arbeit wurde daher anhand einer begrenzten Anzahl selbst erfasster GPS-Pfade untersucht, welche Auswirkungen die Positionsunsicherheiten durch GPS auf Bewegungspfade und deren Analyse haben. Es konnte exemplarisch gezeigt werden, dass bisherige Annahmen, wonach die Aussagekraft bzw. Zuverlässigkeit von Bewegungsparametern, die aus GPS-Daten abgeleitet werden, stark vom gewählten Aufzeichnungsintervall abhängig sind, so nicht zutreffend sind. Denn im Gegensatz zu bisher zu diesem Thema verfassten Arbeiten konnte die bislang vorherrschende Meinung, dass GPS-Positionsfehler unkorreliert seien, nicht bestätigt werden. Im Gegenteil – die erfassten Daten zeigen eine deutliche räumliche Korrelation in der Ausprägung des Positionsfehlers. Anders als bisher propagiert, konnte kein Fall festgestellt werden, bei dem die Zuverlässigkeit der Parameter mit grösserem Intervall zunimmt.

Anhand von zwei bekannten Methoden, einerseits einer Point-in-Polygon-Analysemethode, andererseits einer Methode zur Segmentierung von GPS-Pfaden, wurde aufgezeigt, dass insbesondere Segmentierungsmethoden stark von der GPS-Unsicherheit abhängig sind. Die in dieser Arbeit geprüfte Segmentierungsmethode stellt gewissermassen einen Spezialfall dar: Anders als vergleichbare Segmentierungsmethoden, die meist die Höhenkomponente unbeachtet lassen, ist gerade diese in allen drei Dimensionen von Unsicherheit betroffen. Entsprechend gross sind die Abweichungen infolge Unsicherheit. Nichtsdestotrotz lassen sich daraus Erkenntnisse für Segmentierungsmethoden im Allgemeinen ableiten. Diese sind insbesondere von der genauen Wiedergabe von Stopps, also Orten, an denen die Fortbewegungsgeschwindigkeit gleich null ist, abhängig. Doch entgegen bisheriger Annahmen ist der Einfluss der Unsicherheiten durch GPS auf Bewegungspfade, insbesondere auf Bewegungsparameter, wesentlich geringer. Kritische Aufzeichnungsintervalle, ab deren Unterschreiten keine zuverlässige Erfassung der Bewegung mehr möglich ist, bestehen somit keine.

Summary

Mobile movement data, retrieved by GPS-enabled equipment such as smartphones, handheld devices or GPS watches, have gained importance due to today's technological development. The analysis of movement data is of increasing interest to a variety of scientists. Movement patterns and movement modes can be detected and identified by means of GPS-based dataset. Based on the knowledge of a person's recently visited places, the prediction of human movement behaviour seems possible. Although there are numerous different applications, it is remarkable that there is only limited knowledge about the influence of GPS uncertainty on movement analysis.

In the present thesis, a limited number of self-recorded GPS tracks were tested on their sensitivity against position uncertainties caused by GPS. In addition, the influence of uncertainties on movement model parameterisation was estimated. The outcomes reveal that the previous assumptions implying that the validity and reliability of motion parameters derived from GPS data are highly dependent on the selected recording interval are not applicable. This study contradicts the prevailing opinion of previously conducted research that GPS position errors are uncorrelated. On the contrary, the collected data highlight a clear spatial correlation in the position error of GPS fixes. No case was found in which the reliability of the parameters increases with greater interval.

Two well-known methods, a point-in polygon analysis and a method for segmentation of GPS tracks, were applied on self-recorded GPS data. Results show that the segmentation method, in particular, is highly dependent on GPS uncertainty. However, it must be mentioned that the applied segmentation method included, unlike the common segmentation methods, the height component. As a consequence, deviations due to uncertainty are quite large. Nevertheless, some evidence for segmentation methods can be obtained. These methods are, in particular, depending on the accurate detection of stop locations where movement speed equals zero. However, contrary to previous assumptions, the impact of GPS uncertainty on movement paths, particularly on movement parameters, is significantly lower. Critical recording intervals below which reliable detection of movement is no longer possible do not exist.

Dank

Nun, am Ende meines Studiums am Geographischen Institut der Universität Zürich und gleichzeitig am Beginn dieser Arbeit, möchte ich mich bei all meinen Mitstudenten bedanken, die mich auf meinem Weg begleitet haben. Sie haben dazu beigetragen, dass ich meine Studienzeit in allerbesten Erinnerung behalten werde. Stets hatte ich das Gefühl, Teil von etwas Besonderem zu sein.

Betreffend die vorliegende Arbeit gilt mein Dank vor allem meinen beiden Betreuern, Prof. Dr. Ross Purves und Dr. Patrick Laube. Mit ihrer ehrlichen und konstruktiven Kritik und den zahlreichen Hilfestellungen waren sie stets darum bemüht, mir ideale Bedingungen zum Fertigstellen der Arbeit zu schaffen. Dafür danke ich ihnen herzlich!

Des Weiteren bedanke ich mich herzlich bei...

... meinem Arbeitgeber, der Esri Schweiz AG, für die Möglichkeit, während der Arbeitszeit Zeit und Energie in meine Masterarbeit zu investieren;

... meiner Familie und insbesondere meinen Eltern für ihre stete Unterstützung während meiner Ausbildung und

... meinen Freunden, die mich während unzähliger Trainingseinheiten, gemeinsamer Grillabende, Mittagessen und Kaffeepausen meist äusserst erfolgreich von der anstehenden Arbeit abgelenkt haben.

Herzlichen Dank!

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Motivation	1
1.2	Ziele	2
1.3	Aufbau	3
2	Hintergrund	4
2.1	Grundlagen	4
2.1.1	Unsicherheiten in Raumdaten	4
A	Quellenfehler	5
B	Verarbeitungsfehler	7
2.1.2	GPS	7
2.1.3	Bewegungsanalyse	10
A	Tracking von Tierbewegungen	10
B	Erkennen von Bewegungsmustern	10
C	Segmentierung von Bewegungspfaden	11
D	Bewegungsparameter	11
2.2	Unsicherheit in der Bewegungsforschung mit GPS	13
2.2.1	Quellen von Unsicherheit	13
2.2.2	Mittel zur Steigerung der Genauigkeit	15
A	Differentielles GPS	15
B	Satellite Based Augmentation System (SBAS)	15
C	Filtersysteme / Map Matching	16
2.2.3	GPS-Unsicherheit in der Bewegungsanalyse	17
A	Unsicherheit in der Positionsbestimmung	17
B	Unsicherheiten in Bewegungsparametern	18
C	Visualisierung von GPS-Unsicherheiten in Pfaden	19
2.3	Forschungslücken	20
3	Untersuchungsgebiet & verwendete Daten	21
3.1	Untersuchungsgebiet	21
3.2	Verwendetes Gerät	21
3.3	Datensätze	22
3.3.1	Landnutzungsraster	22
3.3.2	Ground Truth	23
3.3.3	swissALTI ^{3D}	23
3.4	Verwendete Software	24
4	Annahmen	25
4.1	Auftretende Phänomene	25
4.1.1	Pseudo Movement	25
4.1.2	Ausprägung der Pfadrichtung	27
4.1.3	verspätete Reaktion auf Richtungsänderungen	27
4.1.4	umweltbedingte Abweichungsausprägung	28
4.2	Annahmen für die weitere Arbeit	29
5	Point-In-Polygon-Analyse	31
5.1	Nokia Mobile Data Challenge	31
5.2	Point-in-Polygon-Analyse von André Skupin und Harvey J. Miller	31
5.2.1	Grundsatz	31
5.2.2	Vorgehen	32
5.2.3	Einschränkungen und Schwächen	33
5.3	Auswirkungen der Positionsunsicherheiten von GPS	35

5.4 Analyse der Methode von Skupin und Miller	35
5.4.1 Einfluss der GPS-Unsicherheiten auf erwartetes Auftreten einer Landnutzungs-kategorie	36
5.4.2 Einfluss der GPS-Unsicherheiten auf Segmentklassierung	38
5.4.3 Analyse des Kontexts.....	40
5.5 Resultate und Interpretation	42
5.5.1 Verifizierung Methode von Skupin & Miller.....	42
5.5.2 Veränderung der Auftretenswahrscheinlichkeiten.....	44
5.5.3 Veränderung der Segmentklassierung.....	46
5.5.4 Analyse des Kontexts.....	47
5.6 Einschränkungen	49
5.7 Zwischenfazit	50
6 Trip-Segmentierung	52
6.1 Datenerhebung	52
6.2 Methode	52
6.3 Technische Ausführung	56
6.4 Resultate	58
6.4.1 Verkürzung von Segmenten und Pfaden	58
6.4.2 Einfluss des Aufzeichnungsintervalls	59
6.4.3 Verteilung der Leistungsklassen.....	62
6.4.4 Einfluss der GPS-Unsicherheit.....	65
6.5 Interpretation	66
6.5.1 Einfluss des Aufzeichnungsintervalls	66
6.5.2 Verteilung der Leistungsklassen.....	67
6.5.3 Einfluss der GPS-Unsicherheit.....	68
6.6 Einschränkungen	69
6.7 Zwischenfazit	70
7 Diskussion	72
7.1 GPS-Unsicherheit in der Standortbestimmung.....	72
7.2 GPS-Unsicherheiten in der Bewegungsanalyse.....	72
7.3 Visualisierung von Pfad-Unsicherheiten.....	76
8 Schlussfolgerungen	77
8.1 Erreichtes	77
8.2 Erkenntnisse.....	78
8.3 Ausblick.....	79
Literatur	81
Anhang	87

Abbildungen

Abbildung 1 Circular Standard Error CSE.....	5
Abbildung 2 Epsilonbänder mit konstantem Epsilon und knochenförmig	6
Abbildung 3 GPS Satellitenkonstellation.....	8
Abbildung 4 Einfluss der Positionsunsicherheit auf Bewegungsparameter „Distanz“	12
Abbildung 5 Map Matching	17
Abbildung 6 Übersicht Untersuchungsgebiet.....	21
Abbildung 7 Garmin FR 310 XT.....	22
Abbildung 8 Pseudo Movement in offener (links) und urbaner (rechts) Umgebung.....	26
Abbildung 9 Aufzeichnung des Bewegungspfads.....	27
Abbildung 10 sprunghafte Abweichung in urbanem Raum.....	28
Abbildung 11 GPS-Fixes in Abhängigkeit der Umgebung	29
Abbildung 12 Point-in-Polygon-Methode.....	32
Abbildung 13 Verifizierung der Methode von Skupin & Miller	36
Abbildung 14 Erwartungswert mit Epsilonband.....	37
Abbildung 15 Berechnen der Erwartungswerte	38
Abbildung 16 Ermitteln der Wahrscheinlichkeit korrekter Klassierung.....	39
Abbildung 17 Erwartungswerte identischer Klassierung.....	40
Abbildung 18 Vergleich Arealstatistik mit Vector25.....	41
Abbildung 19 Spannweite der Punkte pro Klasse bei verändertem Intervall.....	42
Abbildung 20 Abweichung der Anzahl klassierter Punkte von der Punkteanzahl der Klasse 35.....	43
Abbildung 21 Abweichung der Auftretenswahrscheinlichkeiten.....	44
Abbildung 22 Veränderung der Auftretenswahrscheinlichkeit bei Aggregation in vier Klassen	46
Abbildung 23 Vergleich der Wahrscheinlichkeiten korrekter Klassierung	47
Abbildung 24 Abweichung der Auftretenswahrscheinlichkeit anhand von Vector25.....	48
Abbildung 25 Bewegung entlang eines Waldrands	49
Abbildung 26 Charakterisierung der Pfade	55
Abbildung 27 Klassierung der Segmente nach ihrer Leistungsklasse.....	56
Abbildung 28 Im Vergleich zur Ground Truth abweichend klassierte Segmente	57
Abbildung 29 Längenabweichung vom Intervall 1 sec	60
Abbildung 30 Längenabweichung der aufgezeichneten Pfade der Ground Truth 1 sec	61
Abbildung 31 Klassierung der Segmente gemäss GPS-Track und Ground Truth	62
Abbildung 32 Anteil der Leistungsklassen an der Gesamtlänge von Track 1	63
Abbildung 33 Anteil der Leistungsklassen an der Gesamtlänge von Track 2	64
Abbildung 34 Anteil der Leistungsklassen an der Gesamtlänge von Track 3	65
Abbildung 35 Anteil abweichend klassierter Segmente an jeweiligen GPS-Pfaden.....	65

Tabellen

Tabelle 1 Aufenthaltszeiten bei Fortbewegungsgeschwindigkeit von 1.5 m/s.....	33
Tabelle 2 Geschwindigkeitsbereiche gemäss Dwyer und Gabbett (2012).....	52
Tabelle 3 Leistungsbereiche in Abhängigkeit von horizontale und vertikaler Geschwindigkeit	53
Tabelle 4 Längen aller identisch klassierten Abschnitte pro Leistungsklasse	58

Formeln

Formel 1 Geschwindigkeit.....	11
Formel 2 Beschleunigung	11
Formel 3 Neigung	53
Formel 4 horizontale Strecke in Abhängigkeit des Höhenunterschieds.....	54
Formel 5 horizontale Strecke in Abhängigkeit der Neigung.....	54
Formel 6 euklidische Distanz zwischen zwei Punkten	54

1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die zentrale Problemstellung und der mögliche Nutzen dieser Arbeit eingeführt.

1.1 Problemstellung und Motivation

Die seit einem Jahrzehnt zu beobachtende enorme Verbreitung von Smartphones und anderen mit GPS-Modulen ausgestatteten Geräten hat zu einer Flut von räumlichen Daten geführt. Beinahe jeder erfasst mehrmals täglich Daten mit explizitem Raumbezug, sei es beim Erfassen von Fotos mit einer Ortsmarke (*geo tag*) oder beim Aufzeichnen der abendlichen Joggingrunde. Aus dieser grossen Anzahl von Orts- und insbesondere Bewegungsdaten hat sich eine Vielzahl neuer Forschungsfelder eröffnet.

Gerade das Aufzeichnen von Bewegungspfaden mittels GPS und deren nachfolgende Analyse hinsichtlich der unterschiedlichsten Eigenschaften hat das Interesse vieler Wissenschaftler geweckt. Nicht nur von Biologen, denen Auswertungen von mit Hilfe von GPS-erfassten Bewegungsdaten zum besseren Verständnis von tierischem Verhalten und beispielsweise Habitatsgrenzen dienen. Beispiele davon finden sich bei Dell’Ariccia et al. (2008), Raizman et al. (2013) und Guo et al. (2009). Auch die GIScience selbst forscht in vielfältiger Weise mit Bewegungsdaten auf Basis von GPS-Aufzeichnungen, beispielsweise zur automatischen Einteilung eines Bewegungspfades in unterschiedliche Fortbewegungsarten, so zum Beispiel Zhang et al. (2008) sowie Zheng et al. (2008).

So vielfältig die Einsatz- und Anwendungsbereiche von GPS-Pfaden sind, so erstaunlich ist es, dass sich nur wenige dieser wissenschaftlichen Arbeiten mit den Unsicherheiten, die in jeder Positionsbestimmung mit GPS unweigerlich enthalten sind, auseinandersetzen. In vielen Fällen wird diese Tatsache schlicht ignoriert. Dabei wirkt sich besagte Positionsunsicherheit nicht nur auf die Standortbestimmung einzelner Punkte aus; durch die Abhängigkeit der Bewegungsparameter von der Lage der aufgezeichneten GPS-Fixes ergeben sich auch direkte Auswirkungen auf die Bewegungspfade selbst. An erster Stelle ist hier die veränderte Länge der euklidischen Distanz zwischen zwei aufeinanderfolgenden aufgezeichneten Punkten zu nennen. Doch gerade die für Bewegungsanalysen beigezogenen Bewegungsparameter wie Geschwindigkeit und Beschleunigung sind durch ihre Längenabhängigkeit direkt von der Position der Stützpunkte abhängig. Dieselbe Abhängigkeit besteht auch beim Parameter der Richtungsänderung, wenn auch weniger stark längenabhängig.

Als einfache Illustration möglicher Konsequenzen dieser Positionsunsicherheiten kann ein genauer Blick auf die Standortangabe eines Smartphones in einem Kartendienst wie beispielsweise *Google Maps* dienen: Stellt man sich dabei auf eine möglichst genau aus dem Luftbild zu identifizierende Stelle, eine Verkehrsinsel oder die Ecke eines Gebäudes, wird bei genauer Betrachtung deutlich, dass die Positionsangabe gemäss GPS eindeutig von der wahren Position abweicht.

Die Folgen dieser Abweichungen können vielfältig sein. Eine an einem Seeufer entlanggehende Person kann sich demnach gemäss GPS-Pfad gänzlich im oder auf dem Wasser bewegt haben oder über ein Gebäude geklettert anstatt den Mauern entlang gegangen zu sein. Gerade für die Analyse des Kontexts einer Bewegung, also welche Umweltbedingungen zu dieser oder jener Bewegung geführt haben, können diese Fehler jedoch von grosser Bedeutung und deren Erkennung oder gar Vermeidung folglich von grossem Interesse sein.

Ein kritischer Punkt bei der Analyse von Bewegungsdaten ist die Tatsache, dass die Datenerhebung oftmals nicht von denselben Personen durchgeführt wurde wie deren Auswertung. Als Folge davon können Metadaten zur Bewegung einerseits wie auch zur verwendeten Gerätschaft andererseits gänzlich fehlen. Dem Untersuchenden liegt also vielfach lediglich der GPS-Pfad als Datensatz vor, ohne zu wissen, unter welchen Bedingungen dieser erfasst wurde. So ist er gezwungen, mehr oder weniger blind auf die Datenqualität zu vertrauen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Hersteller kommerzieller GPS-Geräte zwar Bewegungsmodelle und Filter einsetzen, um möglichst realitätsnahe Bewegungspfade aufzuzeichnen, also softwareseitig versuchen, Folgen von Unsicherheiten einzugrenzen. Doch da kaum ein Produzent Informationen zu den verwendeten Filtern preisgibt, kann über deren Funktionsweise nur gemutmasst werden.

Die zentrale Fragestellung dieser Arbeit lautet daher:

Welche Auswirkungen haben Ungenauigkeiten bei der Positionsbestimmung mittels GPS auf Bewegungspfade in der Praxis?

1.2 Ziele

Das im vorhergehenden Kapitel beschriebene fehlende Bewusstsein für die Auswirkungen der Positionsunsicherheiten auf mit GPS erfasste Bewegungspfade und deren Bewegungsparameter stellen die Hauptmotivation für die vorliegende Arbeit dar. Als übergeordnetes Ziel dieser Masterarbeit gelten das Veranschaulichen der auftretenden Fehler bzw. Unsicherheiten, die sich aus der Positionsbestimmung mittels GPS ergeben, sowie das Aufzeigen ihrer Folgen für verschiedene Anwendungsbereiche. Sie soll einerseits dazu beitragen, das Bewusstsein und Verständnis möglicher abweichender Daten und der daraus entstehenden Folgen zu schärfen, andererseits nach Möglichkeit eine anwendungsabhängige Empfehlung zur Erfassung von GPS-Daten aussprechen.

Neben der Visualisierung grundlegender Fehler, die im Zusammenhang mit GPS-Pfaden oftmals auftreten, werden zwei praktische Beispiele typischer Anwendungen aus der Literatur auf ihre Sensibilität gegenüber Positionsunsicherheiten geprüft. Dazu dienen zwei Methoden, die aufgrund theoretischer Überlegungen grosse Einflüsse erwarten lassen. Einerseits eine Methode zur Herleitung der Aufenthaltszeiten eines sich bewegenden Objekts innerhalb von Landnutzungsklassen (Skupin & Miller, 2012), andererseits eine selbst entwickelte Methode zur Segmentierung von Bewegungspfaden nach Abschnitten

gleicher Fortbewegung hinsichtlich verschiedener Parameter. Letztere soll stellvertretend für eine Vielzahl von Segmentierungsmethoden stehen (Zhang et al., 2010; Zheng et al., 2008; Bohte & Maat, 2009).

Um nicht auf Metadaten von fremderfassten Daten angewiesen zu sein, werden sämtliche Bewegungsdaten selbständig erhoben. Dies ermöglicht eine grösstmögliche Kontrolle über die Zuverlässigkeit der Datensätze.

Es lassen sich folgende Ziele zusammenfassen:

- selbständige Erfassung einer ausreichenden Datengrundlage
- Visualisierung typischer Phänomene infolge Unsicherheiten
- Auffinden von Einflüssen geräteseitiger Filterung
- Analyse bekannter Methoden hinsichtlich deren Sensibilität auf Unsicherheiten von ihnen zugrundeliegenden Daten
- Erarbeiten von Empfehlungen für zukünftige anwendungsabhängige Datenerfassungen

1.3 Aufbau

Nach einem einführenden ersten Kapitel folgt in Kapitel 2 ein Einblick in den wissenschaftlichen Hintergrund dieser Arbeit. Aus den aufgezeigten Problemfeldern und Forschungslücken werden anschliessend Forschungsfragen abgeleitet. In Kapitel 3 werden das Vorgehen während der Datenerhebung sowie die verwendeten Datensätze erklärt, aus denen in Kapitel 4 Beobachtungen erläutert und Annahmen für die nachfolgende Arbeit definiert werden. Kapitel 5 und 6 behandeln die Analyse von zwei etablierten Methoden der Bewegungsforschung, anhand derer beispielhaft aufgezeigt wird, welche Einflüsse GPS-Unsicherheiten ausüben können. Es folgt in Kapitel 7 eine kritische Diskussion der Resultate und Erkenntnisse, insbesondere der Kapitel 5 und 6, sowie deren Konsequenzen für die Bewegungsforschung. In Kapitel 8 werden die Erkenntnisse dieser Arbeit kurz zusammengefasst und ein Blick auf zukünftige Arbeiten in diesem Forschungsfeld gewagt.

2 Hintergrund

Dieses Kapitel fasst die wichtigsten Begriffe räumlicher Unsicherheiten zusammen und führt in die Hintergründe der Thematik auftretender Unsicherheiten in GPS-Bewegungsdaten ein.

2.1 Grundlagen

2.1.1 Unsicherheiten in Raumdaten

Wie andere Arten von Daten sind auch räumliche Daten unterschiedlich ausgeprägt von Unsicherheit betroffen. Unsicherheiten umfassen die Kombination aller Fehler und Faktoren, die einen Einfluss auf die Genauigkeit von Daten sowie die Zuverlässigkeit von Resultaten ausüben. Die Beschreibung räumlicher Unsicherheiten bedient sich folgender Konzepte und Begriffe:

Genauigkeit

Unter dem Überbegriff Unsicherheiten werden nach Worboys und Duckham (2004) auch die beiden Begriffe Genauigkeit und Präzision eingeordnet. Die Genauigkeit gibt an, welche Beziehung zwischen einem Messwert und seinem "echten" Wert, den er darzustellen versucht, besteht. Die Genauigkeit einer GPS-Lokalisierung ist von den Umgebungsbedingungen sowie der Satellitenkonstellation abhängig (siehe Kapitel 2.2.1).

Präzision

Präzision beschreibt den Detaillierungsgrad einer Abbildung bzw. Messung, gibt also an, wie exakt ein Messwert ein reales Phänomen abbilden kann. Die Präzision von mit GPS erhobenen Daten hängt massgeblich von der Datenstruktur der gespeicherten Positionsdaten ab. Je höher die geometrische Auflösung der gespeicherten Position, desto präziser ist eine Positionsmessung möglich.

Fehler

Unter Fehlern versteht man die Abweichung eines Messerwerts oder einer Position von der Realität. Der Begriff steht somit antonym zum Konzept der Genauigkeit; je höher also die Genauigkeit, desto geringer der Fehler. Ein Fehler eignet sich somit zur Schätzung oder Modellierung von Genauigkeit.

Auflösung

Die Auflösung beschreibt die kleinste unterscheidbare Differenz in einer Aufzeichnung. Es wird unterschieden zwischen geometrischer, thematischer und zeitlicher Auflösung. Die geometrische Auflösung steht für die Grösse des kleinsten Objekts innerhalb einer Datenmenge. Der kleinste Unterteilungsschritt thematischer Merkmalsdimensionen wird als thematische Auflösung bezeichnet. Die zeitliche Auflösung beschreibt das kleinste zeitliche Intervall, das bei der Datenaufzeichnung angewendet wurde.

Wie von Longley et al. (2001) beschrieben, sind Geodaten stets als eine Repräsentation der "Realität" zu verstehen. Sie entstehen typischerweise durch Messungen oder Berechnungen und repräsentieren somit eine Vereinfachung von realen Phänomenen, die sie anzunähern versuchen. Durch diese Annäherung und Vereinfachung entsteht stets eine Abweichung von der Realität. Die entstehenden Unsicherheiten bzw. Fehler werden in zwei Klassen aufgeteilt: in Quellenfehler und Verarbeitungsfehler.

A Quellenfehler

Hierzu werden Fehler gezählt, die durch Messung oder Berechnung von Daten entstehen. Beispielsweise können durch fehlerhafte Messgeräte, Interpretationsfehler oder Umwelteinflüsse Fehler in die Datensätze induziert werden. Die daraus entstehenden Unsicherheiten lassen sich später nicht mehr beseitigen, bleiben also in den Datensätzen enthalten. Daher ist besonders darauf zu achten, dass die verwendeten Daten dem jeweiligen Einsatzzweck angemessen sind. Auch die in GPS-Daten enthaltenen Unsicherheiten und Positionsfehler fallen in diese Kategorie.

Lageungenauigkeit von Punkten

Räumliche Punktdaten werden mit x-, y- sowie z-Koordinaten angegeben. Da in sämtlichen Dimensionen Fehler auftreten können, können sowohl Lage- als auch Höhenfehler vorkommen.

Die Lageunsicherheiten digitalisierter Punkte, zu denen auch GPS-Fixes gezählt werden können, können mit dem sogenannten *Circular Standard Error (CSE)* angegeben werden. Jones (1997) geht dabei von einem bivariat normalverteilten Fehler um die wahre Lage des Punktes aus. Die Wahrscheinlichkeit, dass die tatsächliche Lage eines Punktes innerhalb eines CSE zu liegen kommt, liegt bei 39.35 %. Innerhalb des doppelten CSE befinden sich beinahe 90 % der Messungen.

Abbildung 1 Circular Standard Error CSE (nach Jones)

Viele GPS-Geräte verfügen über eine Anzeige der „Genauigkeit“. Diese vermeintliche Genauigkeit bezieht sich im Falle von Garmin-Geräten (wie im Rahmen dieser Arbeit verwendet) auf den sogenannten *Circular Error Probable (CEP)*. Der CEP beschreibt einen Radius, innerhalb dessen 50 % aller Messungen lokalisiert werden. Deren 95 % liegen innerhalb des doppelten CEP und 98.9 % aller Messpunkte befinden sich innerhalb eines Kreises mit Radius 2.55 CEP (Köhne & Wössner, 2013).

Lageungenauigkeit von Linien

In der Mathematik versteht man Linien als eine Aneinanderreihung von unendlich vielen Punkten, was sich auch auf Bewegungspfade übertragen lässt. Doch im Falle von Bewegungspfaden, die mit GPS erfasst wurden, lässt sich dies nicht uneingeschränkt anwenden. Schliesslich spielt hierbei das gewählte Aufzeichnungsintervall, also der zeitliche Abstand zwischen zwei Positionsmessungen, eine wichtige Rolle. So wird aus besagter „Aneinanderreihung von unendlich vielen Punkten“ rasch eine Reihe einer beschränkten Anzahl Punkte. Je nach gewähltem Intervall führt dies dazu, dass echte Bewegungspfade mehr oder weniger stark vereinfacht repräsentiert werden.

Aus diesen Gründen macht es bei der Analyse von mit GPS erfassten Bewegungspfaden wenig Sinn, einzig für die einzelnen Fixes ein Fehlermass anzuwenden, denn auf diese Weise werden die Räume zwischen aufeinanderfolgenden Punkten vernachlässigt. Standorte, an denen sich das bewegende Objekt zwischen zwei Positionsaufzeichnungen aufgehalten hat, die jedoch aufgrund des Aufzeichnungsintervalls nicht aufgezeichnet wurden, werden ignoriert. Dies führt unter Umständen, abhängig vom Analyseziel und gewählten Skalenniveau, zu einem beträchtlichen Informationsverlust. Der *Circular Standard Error* ist somit in diesem Kontext nur sehr beschränkt tauglich.

Besser zur Simulation der Lageungenauigkeit von Linien eignen sich sogenannte Epsilon- oder Perkalbänder. Perkal (1966) berücksichtigt die Tatsache, dass die Lage der digitalisierten Linie mit höchster Wahrscheinlichkeit auch zwischen den einzelnen Punkten von der wahren Lage abweicht. Entlang einer Linie wird ein Unsicherheitsbereich definiert, innerhalb dessen sich – in unserem Fall – das sich bewegende Objekt während seiner Bewegung aufgehalten haben soll. Das Epsilonband besteht aus einem Puffer der Breite ϵ entlang einer Linie, innerhalb dessen Querschnitt eine Gleichverteilung angenommen wird.

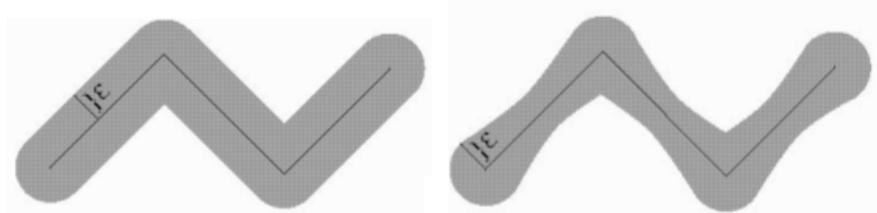


Abbildung 2 Epsilonbänder mit konstantem Epsilon und knochenförmig (nach Shi)

Im Falle von Digitalisierungsungenauigkeiten wird davon ausgegangen, dass das Epsilonband keine konstante Breite aufweist, sondern sich zwischen den einzelnen

Punkten bzw. *Vertices* verjüngt. Diese knochenähnliche Form geht nach Shi und Liu (2000) von unkorrelierten Unsicherheiten der beteiligten Punkte aus. Dies trifft für Lagefehler infolge fehlerhaft digitalisierter Punkte zwar zu, lässt sich jedoch auf die Analyse von GPS-Pfaden nur begrenzt übertragen. Die Fehler in aufeinanderfolgenden Punkten sind in Abhängigkeit von der Umgebung meist stark räumlich autokorreliert. Für die Form des Epsilonbands bedeutet dies, dass eine über die gesamte Länge konstante Breite der Realität näher kommt als eine knochenartige Form. Aus diesem Grund werden in der Folge Epsilonbänder konstanter Breite verwendet.

Die der ursprünglichen Form des Epsilonbandes zugrundeliegende Gleichverteilung muss für die Verwendung mit GPS-Pfaden ebenfalls kritisch hinterfragt werden. Gemäss Shi (2010) lässt sich die bivariat normalverteilte Lageunsicherheit von Punkten auch auf Linien bzw. eben Pfadsegmente übertragen. Daraus folgt, dass eine Normalverteilung entlang des aufgezeichneten Pfades eine realitätsnahe Verteilung besser annähert als eine blosse Gleichverteilung, wie sie das Epsilonband in seinem Grundsatz propagiert.

B Verarbeitungsfehler

Unter Verarbeitungsfehlern werden gemäss Shi (2010) Fehler zusammengefasst, die durch die Manipulation und Analyse bereits erhobener Daten, durch unzuverlässige Datenübertragung und -speicherung sowie bei der Verwendung der Daten entstehen. Bei der Aufbereitung von Daten können durch geometrische Transformationen oder Datenaggregation Fehler entstehen. Hinzu kommen Fehler infolge ungenauer digitaler Definitionen von Objekten und Phänomenen und Informations- oder Datenverluste infolge limitierter Dateiformaten oder Speicherkapazitäten. Nicht zuletzt ist als Quelle eines grossen Verarbeitungsfehlers der Nutzer selbst zu nennen. Nutzerseitige Fehlmanipulationen, unangemessene Verwendung von Datensätzen oder unzulässige Kombinationen von Methoden und Datensätzen bergen eine grosse Unsicherheitsquelle. Verarbeitungsfehler können seitens des Anwenders beeinflusst werden. Durch exakte, wohlüberlegte Arbeitsweise lassen sich Verarbeitungsfehler minimieren.

Besonderes Augenmerk gilt dabei einer hohen Güte der Metadaten, die möglichst genaue Informationen zur Datenqualität sowie der Erhebungsmethode wiedergeben. Auf diese Weise wird dem Nutzer ermöglicht, die in Daten enthaltenen Unsicherheiten und Fehlerquellen abzuschätzen und deren Vorhandensein in die weiteren Prozesse mit einzubeziehen. In diesem Punkt besteht bei der Analyse von Bewegungsdaten oft ein Mangelzustand. Oftmals stammen die erhobenen Daten nicht aus derselben Hand wie die Analyse selbst, weshalb meist gesichertes Wissen zu den Umständen der Datenerhebung fehlt. Dies führt weitere Unsicherheit hinzu. Interpretationen der Resultate einer Datenanalyse werden dadurch deutlich erschwert.

2.1.2 GPS

Während in früherer Zeit zur exakten Positionsbestimmung aufwendige Vermessungskampagnen mit Teodoliten und anderen Gerätschaften nötig waren, kommen heute in vielen

Bereichen satellitengestützte Systeme zum Einsatz. Sogenannte Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) ermöglichen eine rasche witterungs- und tageszeitunabhängige Positionsbestimmung an beinahe jedem Punkt auf der Erdoberfläche. Dominierten in den Anfangszeiten ziviler Nutzung noch vorwiegend Geräte zur Navigation, beispielsweise von Schiffen oder Autos, so findet man heute kaum ein Mobiltelefon oder eine Digitalkamera, welche nicht über ein eingebautes GPS-Modul zur Standortbestimmung verfügt.

GNSS haben ihren Ursprung in ihrem prominentesten Aushängeschild, dem amerikanischen Navstar GPS (offiziell „Navigational Satellite Timing and Ranging – Global Positioning System“), welches bis 1985 schrittweise eingeführt wurde. Es beruht auf dem Prinzip der Trilateration, also der Positionsbestimmung aus Distanzen zu mindestens drei Punkten, deren Position bekannt ist (Doukhnitch et al., 2008). Dies im Gegensatz zur Triangulation, die den meisten geläufiger sein dürfte, bei der drei Winkel zur Herleitung der Position dienen. Als Fixpunkte zur Distanzmessung dienen 35 aktive Satelliten (Stand 31. Mai 2013), welche die Erde auf einer Umlaufbahn mit 26 560 km Distanz vom Erdmittelpunkt umkreisen und das sogenannte Weltraumsegment des Systems bilden. Die Bahnen sind dabei so angeordnet, dass von jedem Punkt der Erdoberfläche jederzeit mindestens vier Satelliten gleichzeitig „sichtbar“ sind, also eine oberflächenbereinigte *Line of Sight* zwischen Empfänger und Satelliten besteht. Jeder aktive Satellit sendet permanent Signale aus, welche – stark vereinfacht – die Satellitennummer, die aktuelle Position des Satelliten sowie die exakte Uhrzeit zum Zeitpunkt der Signalemission beinhaltet. Zusätzlich werden Almanach-Daten¹ an den GPS-Empfänger übermittelt, was einerseits zu einer Genauigkeitssteigerung führt, andererseits die Wiedererfassung eines Signals nach einem Unterbruch erleichtert (Bhatta, 2010).

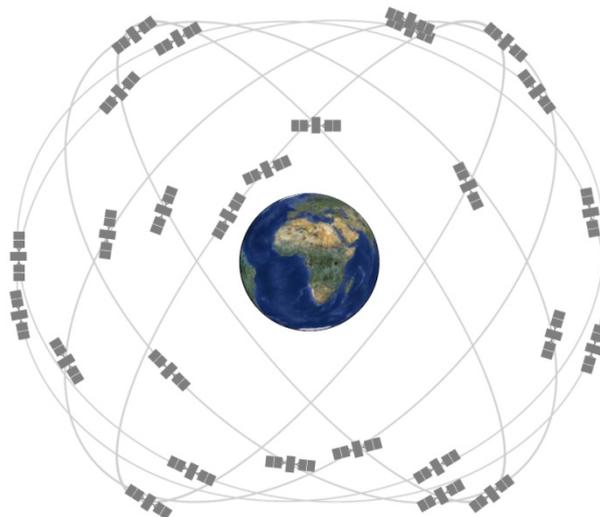


Abbildung 3 GPS Satellitenkonstellation (Quelle: U.S. Government)

¹ Aktuelle Bahndaten sämtlicher aktiver Satelliten

Ein GPS-Endgerät, ein passiver Empfänger, kann als Teil des Benutzersegments aus der Differenz der im Signal enthaltenen Uhrzeit sowie der Uhrzeit im Endgerät selbst die Signallaufzeit und somit die Distanz zum Satelliten relativ exakt bestimmen. Da lediglich die Satelliten, nicht jedoch die Endgeräte, über eine hochpräzise Atomuhr verfügen, diese erste Distanzberechnung also noch eine gewisse Ungenauigkeit enthält, wird vorerst von einer *Pseudo Range* gesprochen.² Diesem Umstand wird Rechnung getragen, indem die Zeitdifferenz zu jedem der drei beteiligten Satelliten ermittelt wird. Die Uhr des GPS-Empfängers wird so lange korrigiert, bis sich die drei ermittelten Distanzen in einem Punkt schneiden. Die daraus resultierenden Distanzen zu den Satelliten werden nun als tatsächliche *Ranges* bezeichnet. Das Kontrollsegment wiederum besteht aus einer aktiven und zehn passiven Bodenstationen. Letztere sind im Grunde genommen nichts anderes als GPS-Empfänger an Standorten, die optimale Sichtbarkeit der Satelliten sicherstellen, also ein bestmögliches Signal empfangen können. Die aktive *Master Control Station* sammelt deren aufgezeichnete Daten und wertet sie in Echtzeit aus, dies, um etwaige Fehlfunktionen oder Störungen möglichst rasch zu erkennen (Köhne & Wössner, 2013).

Die GPS-Technologie, die ursprünglich für die Lenkung von *Cruise Missile* Marschflugkörpern entwickelt worden war, war anfänglich aus Sicherheitsüberlegungen der US-amerikanischen Regierung durch *selective availability*³ für die breite Nutzung noch weitestgehend unbrauchbar, doch setzte nach deren Aufhebung im Mai 2002 eine enorme Verbreitung von Geräten mit GPS-Modulen ein (Adrados et al., 2002). In der Folge wurden immer kleinere und kostengünstigere GPS-Empfänger realisiert, weshalb heute eine riesige Anzahl verschiedenster Gegenstände, von Telefonen über Kameras bis hin zu Uhren, bereits mit GPS ausgerüstet sind.

Gespeichert werden die mit GPS erfassten Daten handelsüblicher Geräte meist in Form von gpx-Dateien⁴. Dabei handelt es sich um ein offenes XML-basiertes Dateiformat zum einfachen Austausch von GPS-Daten. Es enthält einerseits sämtliche aufgezeichneten Wegpunkte (*Waypoints*), geplante Folge von anzusteuern den Wegpunkten (*Route*) sowie – wiederum als Punktfolge – aufgezeichnete Pfade (*Tracks*). Diese drei Punktklassen können ihrerseits über eine Vielzahl von Attributen verfügen, deren prominenteste Vertreter selbstverständlich die x-, y- und z-Koordinaten sind. Diese werden in aller Regel im Referenzsystem WGS84⁵ gespeichert. (Topographix, 2013) Des Weiteren können Attribute enthalten sein, die Informationen zur zu erwartenden Positionsgenauigkeit enthalten. VDOP, HDOP und PDOP geben jeweils vertikal (V), horizontal (G) und positional (P) die Verringerung der Genauigkeit (*Dilution of Precision*, DOP) an. Diese Informationen werden aus der geometrischen Anordnung der Satelliten und des Beobachters hergeleitet und helfen die Zuverlässigkeit der Positionsangabe abzuschätzen. Sie ermöglichen dem Nutzer einen Zugang zur Ausprägung der systematischen Fehler infolge nicht optimaler Geometrie

² Eine um eine Hundertstelsekunde veränderte Signallaufzeit führt zu einem Positionsfehler von ca. 3 000 km.

³ Künstlich hinzugefügtes Rauschen seitens der Betreiber (US Armee), um eine Verwendung von GPS gegen die Vereinigten Staaten zu verhindern.

⁴ GPS Exchange Format

⁵ World Geodetic System 84

(schleifende Schnittpunkte). Kleine DOPs stehen dabei für eine geringe Streuung, grosse für stark streuende Positionswerte (U.S. Department of Defense, 1995).

2.1.3 Bewegungsanalyse

Die Analyse von Bewegung umfasst verschiedene Bereiche aus unterschiedlichen Forschungsfeldern. Nicht nur Biologen, die an Aufenthaltsorten und Habitatsausprägungen von Tieren interessiert sind, auch Wissenschaftler aus der GIScience befassen sich in zunehmendem Masse mit Bewegungsdaten und deren Analyse.

A Tracking von Tierbewegungen

Das Forschungsfeld des GPS-Trackings befasst sich explizit mit der Bewegung von Objekten, den sogenannten *moving objects*. Eines der prominentesten Beispiele in diesem Bereich stammt aus der Biologie, nämlich das Aufzeichnen von Tierbewegungen zur Erforschung des Verhaltens und Lebensraums einer Tierart oder beispielsweise eines ausgewilderten Jungtieres (z.B. Eriksen et al., 2011; Raizman et al., 2013; Dell’Ariccia et al., 2008). Dabei werden die zu beobachtenden Tiere mit GPS-Geräten ausgerüstet, die während einer bestimmten Zeit (meist bis die Energieversorgung des Geräts nicht mehr sichergestellt ist) die Bewegung des Tieres aufzeichnen.

B Erkennen von Bewegungsmustern

Doch auch innerhalb der GIScience ist die Analyse von Bewegungsdaten in Form von GPS-Pfaden ein bedeutendes Forschungsfeld. Der Bereich der Bewegungsmustererkennung beinhaltet Dichteanalysen beispielsweise zur Berechnung von Frequentierungen bestimmter geographischer Orte, wie sie Orellana et al. (2011) anhand öffentlicher Parkanlagen durchführen. Sie untersuchten in ihrer Arbeit, welche Gebiete innerhalb öffentlicher Parks am häufigsten von Besuchern aufgesucht werden. Dabei konnten sie ausserdem feststellen, dass Parkbesucher an Wegkreuzungen ihre Geschwindigkeit verringern oder gar stehenbleiben, um zu entscheiden, in welche Richtung fortgeschritten werden soll. Andere, wie zum Beispiel Andrienko und Andrienko (2007), analysieren anhand grosser Mengen an Bewegungsdaten individuelle Bewegungsmuster. Es gelingt ihnen, Bewegungspfade unter Einbezug der Tages- und Aufenthaltszeit an wiederholt besuchten Orten in Wohn- und Arbeitsort sowie Orte von speziellem Interesse einzuteilen. Dies mit einer sehr hohen Zuverlässigkeit. Das Erkennen von Bewegungsmustern kann schliesslich auch dazu genutzt werden, menschliches Verhalten vorherzusagen und Prognosen abzuleiten, wo sich ein Individuum zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Zukunft aufhalten wird (Sadilek, 2012; Ashbrook & Starner, 2003). Eine Gruppe um Slingsby (2012) befasst sich wiederum mit der Rekonstruktion sozialer Netzwerke aus grossen Bewegungsdatensätzen, bei der aus Bewegungsdaten verschiedener Probanden analysiert wird, welche Personen regelmässig miteinander verkehren.

C Segmentierung von Bewegungspfaden

Der zweite Bereich befasst sich mit der Aufteilung von Bewegungspfaden in Segmente gleicher Eigenschaft. Die Segmentierung von GPS-Pfaden, also deren Unterteilung in Abschnitte gleicher Eigenschaft, wird in einer grossen Zahl wissenschaftlicher Arbeiten behandelt. Stets wird dabei versucht, einen aufgezeichneten GPS-Pfad in Segmente aufzuteilen, die sich punkto einer spezifischen Eigenschaft voneinander unterscheiden. Ein beliebtes Forschungsobjekt ist dabei die Herleitung der Fortbewegungsart aus Parametern des GPS-Pfades. Dabei entwickelte Algorithmen sind in der Lage, aus vorliegenden GPS-Pfaden durch Interpretation bzw. Filterung der Bewegungsparameter mit hoher Zuverlässigkeit Rückschlüsse auf die Art der Bewegung zu ziehen. Beispiele davon stammen von Zhang et al. (2008), Gong et al. (2012), Bohte & Maat (2009) und Zheng et al. (2008), deren Berechnungsmethoden auf charakteristischen Ausprägungen der Bewegungsparameter basieren. Der Schlüssel ist dabei stets das Erkennen eines Moduswechsels. Dies geschieht meist, indem Stopps identifiziert werden, also Bereiche des Pfades, in denen die Geschwindigkeit für eine bestimmte Mindestzeitdauer gegen null tendiert. Für die Bewegungsparameter Geschwindigkeit, Beschleunigung sowie Richtungsänderung werden Grenzwerte definiert, die fortbewegungsspezifisch sind. So ist ein Fussgänger zwischen zwei aufeinanderfolgenden Positionsaufzeichnungen zu markanteren Richtungsänderungen fähig als etwa ein Automobilist, der sich wiederum wesentlich schneller fortbewegt. Der Automobilist stoppt seine Fahrt jedoch in weniger regelmässigen Abständen als öffentliche Verkehrsmittel, deren Stopps zudem jeweils von ähnlicher Dauer sind. Auf diese Weise können die einzelnen Fortbewegungsarten (z.B. zu Fuss, mit dem Fahrrad, Auto oder Bus) aus den GPS-Pfaden herausgelesen werden (Zhang et al., 2008).

D Bewegungsparameter

Bewegungsforschung anhand von GPS-Pfaden orientiert sich meist an den implizit in GPS-Daten enthaltenen Bewegungsparametern Geschwindigkeit (*Speed*), Beschleunigung (*Acceleration*) sowie Orientierung (*Azimuth*). Die Geschwindigkeit (v) lässt sich aus dem Aufzeichnungsintervall und der Distanz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Punkten herleiten.

$$v = \frac{s}{t} = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{\Delta t}$$

Formel 1 Geschwindigkeit

Gleiches gilt für die Beschleunigung (a). Zu deren Berechnung wird die Veränderung der Geschwindigkeit aufeinanderfolgender Abschnitte herangezogen.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Formel 2 Beschleunigung

Die Orientierung kann entweder teilweise direkt aus der gpx-Datei gelesen, oder aber aus der Bewegungsrichtung abgeleitet werden. Letzteres kann mittels Koordinatenabgleich von

Anfangs- sowie Endpunkt einer Teilstrecke erfolgen, indem der Winkel im Uhrzeigersinn von Kartennord (Azimut) berechnet wird.

Mit Hilfe dieser Parameter können beispielsweise Segmente mit Bewegung in gleichem Geschwindigkeitsbereich, mit ähnlicher Beschleunigung oder gleicher Bewegungsrichtung separiert werden. Natürlich können auch komplexere Segmentierungsalgorithmen implementiert werden. Segmentierungsmethoden zur Unterteilung von GPS-Pfaden findet man in grosser Anzahl in verschiedenen Anwendungsfeldern beispielsweise von Zheng et al. (2008) oder Gong et al. (2012). Doch die allerwenigsten Arbeiten gehen darauf ein, wie gross die Einflüsse der Unsicherheiten in den GPS-Daten auf die jeweilige Methode sind. Dies erstaunt, denn meist basieren die Methoden zur Segmentierung in ihrem Kern auf Grenzwerten eines bestimmten Bewegungsparameters oder einer Kombination aus mehreren Grenzwerten. Doch gerade bei kurzen Aufzeichnungsintervallen kann der durch GPS-Unsicherheit induzierte Fehler ausschlaggebend sein, ob ein Grenzwert nun über- oder gerade noch unterschritten wird. Im Falle eines kurzen Intervalls und damit verbunden relativ kurzen Teilstrecken zwischen aufeinanderfolgenden Punkten ist der in den GPS-Daten enthaltene Fehler in der Positionsbestimmung bzw. die Positionsungenauigkeit in Relation zur Teilstrecke verhältnismässig gross, die Berechnung von Bewegungsparametern daher umso mehr fehlerbehaftet (Jerde & Visscher, 2005). Ohne Implementierung von Filtern in der geräteeigenen Software von GPS-Geräten wären theoretisch enorme Fehler möglich. Dies lässt sich anhand des folgenden einfachen Beispiels veranschaulichen.

Ein Objekt, angenommen ein Fahrradfahrer, bewegt sich mit 36 km/h entlang einer geraden Strasse. Sein GPS-Gerät zeichnet jede Sekunde seine aktuelle Position auf. Somit erfolgt jeweils im Abstand von 10 m eine Positionsaufzeichnung. Bei einer Unsicherheit von rund 10 m bei der Standortbestimmung mittels GPS kann dies im Extremfall eine stark verzerrte Wiedergabe dieser gleichförmigen Bewegung nach sich ziehen. Korrekt wäre innerhalb eines Zeitfensters von fünf Sekunden und konstanter Fortbewegungsgeschwindigkeit eine Abfolge von fünf Abschnitten mit einer Länge von je zehn Metern. Doch durch die Unsicherheit jeder einzelnen Positionsbestimmung von rund zehn Metern (Kuter & Kuter, 2010) kann es gerade bei kurzen Intervallen theoretisch zu grossen Abweichungen des aufgezeichneten Pfades von seiner *Ground Truth* kommen.

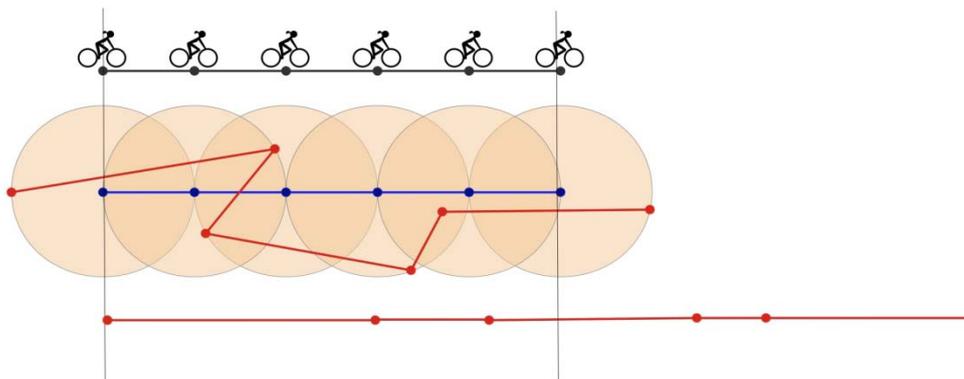


Abbildung 4 Einfluss der Positionsunsicherheit auf Bewegungsparameter „Distanz“ (eigene Abb.)

Dafür, dass dies nicht geschieht, sorgen in der Regel im Gerät implementierte Filter, meist Kalmanfilter (Malleswari et al. 2009), die bereits bei der Erfassung der Positionsdaten von einer gradlinigen, gleichförmigen Bewegung ausgehen und diese Annahmen in die Ermittlung der Position einbeziehen.

2.2 Unsicherheit in der Bewegungsforschung mit GPS

2.2.1 Quellen von Unsicherheit

Zwar fanden GPS-Geräte rasch breite Verwendung bei der einfachen Erfassung von Positionsdaten, doch geht oftmals vergessen, dass mit Hilfe von Satelliten erfasste Punkte auf der Erdoberfläche eine umweltabhängige Fehlerkomponente beinhalten. Mit herkömmlichen GPS-Geräten aufgezeichnete Positionen weichen stets von ihrem wirklichen Standort, der sogenannten *Ground Truth*, ab. Eine ganze Gruppe von Effekten kommt als Fehlerquelle in Frage.

Sichtbarkeit der Satelliten

Zur eindeutigen Bestimmung einer 2D-Position auf dem Geoid der Erde benötigt ein Gerät Empfang zu mindestens drei Satelliten, zur exakten Positionsbestimmung in der dritten Dimension deren vier. Dies ermöglicht eine erfolgreiche Standortbestimmung mittels Distanzmessung. Je grösser die Anzahl empfangener Satellitensignale, desto genauer lässt sich Position auf der Erdoberfläche bestimmen (El-Rabbany, 2002).

Fehlerfortpflanzung durch atmosphärische Effekte

Die durch elektromagnetische Wellen übertragenen Signale der GPS-Satelliten durchlaufen auf ihrem Weg zur Erdoberfläche die Atmosphäre. Dabei kommt es in der Troposphäre sowie der Ionosphäre zu einer Verlangsamung der Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die Signale breiten sich hier nicht mehr, wie im Weltall, mit Lichtgeschwindigkeit aus, sondern erfahren insbesondere durch die ionisierten Partikel der Ionosphäre eine Reduktion ihrer Geschwindigkeit (Klobuchar, 1991). Der dadurch induzierte Fehler kann jedoch durch entsprechende Berechnungen minimiert werden, indem die typische Geschwindigkeitsveränderung unter Normbedingungen in die Laufzeitberechnung einfließt (Bhatta, 2010).

Uhrenfehler

Trotz stattfindender Synchronisierung der Uhr im Empfängergerät mit den Atomuhren der Satelliten sind die in Positionsdaten stets enthaltenen kleinen Fehler darauf zurückzuführen, dass die Empfänger-Uhr nicht genauso exakt wie die Atomuhren arbeitet (Bhatta, 2010).

Umlaufbahnenfehler

GPS-Satelliten befinden sich zwar grundsätzlich in äusserst präzisen Umlaufbahnen, sie diesen folgen zu lassen ist jedoch eine grosse Herausforderung. Durch Gravitationskräfte

sowohl der Sonne als auch des Mondes kommt es immer wieder zu leichten Schwankungen der Umlaufbahnen. Die exakten Daten der Umlaufbahn werden jedoch durch die *Master Control Station* laufend kontrolliert und so die jeweils aktuellen Ephemeridendaten zu den Empfängern gesandt. Dies reduziert den Einfluss fehlerhafter Umlaufbahndaten auf ein Minimum (Köhne & Wössner, 2013).

Satellitengeometrie

Die Satellitengeometrie, darunter versteht man die geometrische Anordnung der Satelliten zueinander, ist ein kritischer Faktor bei der Positionsbestimmung mittels GPS. Empfängt ein GPS-Gerät Signale von Satelliten, die sich in einer ähnlichen Position befinden, beispielsweise nahe am Horizont, so ergeben sich schleifende Schnittpunkte der empfangenen Signale. Die Bestimmung der Position wird dadurch weniger eindeutig, die Streuung nimmt zu. Diesem Aspekt tragen die vertikalen, horizontalen und positionalen *Dillusion of Precision*-Angaben Rechnung, die bei der Positionsbestimmung mitgespeichert werden. Sie geben an, wie zuverlässig eine erfasste Position tatsächlich ist (Radio-Electronics.com, 2013). Die Satellitengeometrie selbst sorgt für keinen direkten Fehler, multipliziert jedoch die übrigen möglicherweise auftretenden Fehler (Köhne & Wössner, 2013).

Multipath-Effekte

Eine weitere und im täglichen Einsatz vor allem in urbanem Gebiet die gewichtigste Quelle von Unsicherheit ist der sogenannte *Multipath*-Effekt. Dieser beschreibt den Umstand, dass elektromagnetische Wellen an Objekten reflektiert werden und dadurch dasselbe ursprünglich identische Signal auf verschiedenen Wegen beim Empfänger ankommt. Das GPS-Gerät empfängt in einem solchen Fall das Signal eines Satelliten mehrfach und jeweils zeitversetzt, was sich auf die Interpretation des Signals und die daraus folgende Abstands- und Laufzeitberechnung auswirkt. Insbesondere Gebäudehüllen und Vegetation induzieren auf diese Weise einen unter Umständen beträchtlichen Fehler in Positionsdaten (El-Rabbany, 2002).

Relativistische Effekte

Da die Signallaufzeit für die Bestimmung der Distanz zwischen Satelliten und GPS-Empfänger die kritische Grösse ist – sie sollte für eine Positionsbestimmung auf 20-30 Nanosekunden bekannt sein –, kommt man nicht darum herum, auch relativistische Effekte als Fehlerquelle zu betrachten. Dadurch, dass sich Satelliten mit rund 12 000 km/h wesentlich schneller bewegen als Punkte auf der Erdoberfläche, laufen deren Uhren von der Erde aus betrachtet langsamer, als sie es tatsächlich tun. Hinzu kommt, dass die Zeit durch das Gravitationsfeld der Erde gemäss Relativitätstheorie wiederum schneller läuft. Da dieser Effekt wesentlich ausgeprägter ist als jener der Geschwindigkeit, wird die Zeit der Satellitenuhren von der Erde aus als zu schnell wahrgenommen. Pro Tag sorgt dies für eine Zeitverschiebung von circa 38 Mikrosekunden, was einen Fehler von rund 10 Kilometern zur Folge hätte. Diesem Effekt wird mit einer Korrektur der Uhrenfrequenz beigegeben, welche die Zeitverschiebung vollständig zu kompensieren vermag (Köhne & Wössner, 2013).

Die aufgelisteten Fehlerquellen sorgen aufsummiert für die stets in mit GPS bestimmten Positionen enthaltenen Unsicherheiten, die je nach Quelle mit 10-15 m angegeben werden (Kuter & Kuter, 2010; Adrados et al., 2002; Goodchild, 2008).

Diese Unsicherheit ist für Anwendungsbereiche, bei denen die Bewegung in aller Regel auf bekannten Vektoren stattfindet, wie beispielsweise der automobilen Navigation, zu vernachlässigen. In diesen Fällen, in denen sich das sich bewegende Objekt mit grosser Wahrscheinlichkeit auf den Strassen, die im Vektorkartendatensatz im Navigationssystem des Wagens gespeichert sind, bewegt, kann der mit Unsicherheit erfasste Standort mittels *Map Matching* (Abbildung 5) relativ einfach automatisiert auf die Strassen eingepasst werden. Doch für Objekte, die keinen derart einfachen Regeln folgen – z.B. Menschen, Tiere, Schiffe oder auch Flugzeuge – sind sie von grosser Bedeutung.

2.2.2 Mittel zur Steigerung der Genauigkeit

Zur Vermeidung oder zumindest Verminderung der genannten Fehlereinflüsse bestehen verschiedene Methoden, bei denen das System GPS durch zusätzliche Infrastruktur ergänzt wird oder durch softwareseitige Filtersysteme die empfangenen Signale realitätsnäher interpretiert werden.

A Differentielles GPS

Das sogenannte DGPS beruht grundsätzlich auf demselben Prinzip wie das „klassische“ GPS, also aus der Positionsbestimmung mittels Laufzeitmessung von durch Satelliten emittierten Signalen. Differenzielles GPS erweitert die Systeminfrastruktur um ein Netz von Bodenstationen. Diese Referenzstationen können aus ihrer bekannten Lage und den eintreffenden Satellitensignalen ermitteln, wie gross die Abweichung der aus der Laufzeit berechneten Distanz von der tatsächlichen Distanz zum Satelliten ist. Sie ermöglichen also eine Korrektur der atmosphärischen Einflüsse auf die Signallaufzeit eines jeden einzelnen Satelliten. Je weiter sich der Messstandort jedoch von der nächstgelegenen Referenzstation entfernt, desto weniger zutreffend sind die von der Referenzstation ermittelten Korrekturwerte für den tatsächlichen Messpunkt. Die errechneten Korrekturdaten können (meist kostenpflichtig) von den jeweiligen Anbietern bezogen werden (Klobuchar, 1991).

B Satellite Based Augmentation System (SBAS)

Zusätzlich zu DGPS im eigentlichen Sinne existieren mehrere Adaptionen des sogenannten *Satellite Based Augmentation System* (SBAS). Dieses ursprünglich für die Luftfahrt entwickelte System – hier genügt GPS als alleiniges Navigationsmittel den Genauigkeitsansprüchen nicht – basiert auf zusätzlichen geostationären Satelliten sowie einem Netz aus *RIMS*-Bodenstationen (*Ranging and Integrity Monitor Stations*). Mit Hilfe dieser Stationen wird eine Art Korrekturgitter für das gesamte abgedeckte Gebiet berechnet, welches die Ionosphärenfehler korrigiert. So kann nun für das Signal eines jeden zur Positionsbestimmung genutzten GPS-Satelliten der Durchstosspunkt durch die Ionosphäre berechnet und daraus die wirksame Signalverzögerung hergeleitet werden.

Der Hauptunterschied zu DGPS besteht darin, dass SBAS sämtliche auftretenden Signalverzögerungen mit einbezieht, während DGPS dies lediglich für die jeweilige Referenzstation tut. SBAS ermöglicht durch das Korrekturgitter eine noch höhere Präzision bei der Positionsermittlung als DGPS (U.S.Government, 2013).

C Filtersysteme / Map Matching

Doch auch ohne zusätzliche Infrastruktur oder teure Geräte lässt sich die Genauigkeit von Orts- und insbesondere Bewegungsaufzeichnungen steigern. So kommen in modernen GPS-Geräten Filter zum Einsatz, die bei der Erfassung eines neuen Wegpunkts (*GPS-Fix*) zuvor erfasste Punkte mit einbeziehen und die relativ zum vorhergehenden Punkt wahrscheinlichste neue Lage errechnen. Sogenannte Kalman-Filter basieren auf dem Prinzip rekursiver Zustandsschätzung. Sie sind dadurch beispielsweise in der Lage, beim vollständigen oder partiellen Verlust von Satellitensignalen aus bisher erfassten Punkten und deren Streuung die wahrscheinlichste Lage von neuen Punkten vorherzusagen. Dabei findet ein ständiger Abgleich der vorhergesagten Punkte mit den tatsächlich erfassten Punkten statt, woraus der Filter Rückschlüsse auf seine Zuverlässigkeit ziehen kann. Abweichungen fließen dabei laufend in die Optimierung der Vorhersagen ein, was unter gleichbleibenden Bedingungen eine stetige Verbesserung der vorhergesagten Positionen zur Folge haben sollte. Der Kalmanfilter findet vor allem in Navigationsgeräten in Automobilen Verwendung. Hier sorgt er dafür, dass beispielsweise auch beim Durchfahren von Tunnels auf eine unmittelbar darauf folgende Abzweigung aufmerksam gemacht wird (Cossaboom et al., 2012).

Die Navigation entlang von bzw. auf Strassennetzen ist relativ unempfindlich auf GPS-Unsicherheiten. Hier bedient man sich des sogenannten *Map Matching* (Abbildung 5), dem Einpassen von erfassten GPS-Fixes auf bekannte Vektoren eines Strassenkartendatensatzes. Die dazu verwendeten Algorithmen sind vielfältig: Sie reichen von einfachen Methoden, die einen GPS-Fix lediglich senkrecht auf den nächstgelegenen Vektor verschieben, bis hin zu komplexeren Anwendungen, die auch die Fortbewegungsgeschwindigkeit in die Positionierung der Fixes einbeziehen (Czommer, 2000; Taylor et al., 2001).

Abbildung 5 Map Matching (nach Bernstein et al.)

2.2.3 GPS-Unsicherheit in der Bewegungsanalyse

A Unsicherheit in der Positionsbestimmung

Bei der grossen Vielfalt an Arbeiten, die sich mit GPS-Bewegungsdaten beschäftigen, erstaunt es, dass dem Thema Unsicherheit derart geringe Beachtung zukommt. Ganz im Gegensatz zur Unsicherheit in blossen Positionsbestimmungen, mit denen sich bereits eine grosse Zahl von Arbeiten beschäftigt hat. Die offiziellen Genauigkeitsangaben der Betreiberorganisation, des U.S. Verteidigungsministeriums, gehen von einer „*worst case pseudorange accuracy*“ von 7.8 m mit einem Konfidenzintervall von 95 % aus. (U.S. Department of Defense, 2008) In derselben Grössenordnung wird der Fehler in der Positionsbestimmung auch von Kuter und Kuter (2010) angegeben. Die beiden Forscher ermittelten in einer umfangreichen Feldstudie auf dem Campus der Universität Ankara eine Unsicherheit von 10.3 m in der horizontalen und 6.4 m in der vertikalen Positionsbestimmung. Die dabei eruierte Abweichung von den offiziellen Angaben des Betreibers dürfte dadurch zustande kommen, dass die Feldstudie unter realen Bedingungen in teilweise überbautem Gebiet (Uni-Campus) durchgeführt wurde. Sehr ähnliche Resultate erzielt die Gruppe um C. Adrados, welche die Auswirkungen der *selective availability* in einem Vorher-Nachher-Vergleich anhand von 4320 Messpunkten untersuchten. Sie geben einen durchschnittlichen Positionsfehler nach Abschaltung der *selective availability* im Mai 2000 für nicht-differenzielle Positionsbestimmungen von rund 11.9 m an (Adrados et al., 2002). Explizit mit der Unsicherheit in urbaner Umgebung beschäftigten sich MacGougan et al. (2010), gemäss deren Resultaten Genauigkeiten von unter 5–10 m mit herkömmlichen GPS-Geräten kaum zu realisieren sind. Arnold und Zandbergen (2011) sprechen gar von 10-15 m.

Neben diesen meist unter Idealbedingungen oder zumindest ohne Berücksichtigung von Umwelteinflüssen durchgeführten Studien sind auch solche zu finden, die sich explizit mit dem Einfluss der Umgebung auf die Qualität der Positionsbestimmung befassen. Cai et al. (2013) untersuchten die Positionsgenauigkeit von GPS und COMPASS (die chinesische Version eines GNSS) unter variierenden Umgebungsbedingungen. Für sechs verschiedene Szenarien wurde dabei die Genauigkeit untersucht: unter freiem Himmel, unter Bäumen,

neben Glasfassaden, neben grossen Wasserflächen, unter Hochspannungsleitungen sowie in der Nähe von Mobilfunksendemasten. Die erhaltenen Positionsfehler reichen von 5 m unter offenem Himmel bis zu 9 m unter Bäumen. Bemerkenswert ist die ermittelte Unsicherheit von 7.4 m neben Glasfassaden, was auf starken *Multipath*-Einfluss zurückgeführt wird. An der glatten Oberfläche der Gebäudehülle werden die elektromagnetischen Wellen des GPS-Signals stark reflektiert und fügen eine zusätzliche Unsicherheit zur Positionsbestimmung hinzu.

B Unsicherheiten in Bewegungsparametern

Mit dem Einfluss von GPS-Positionsfehlern auf die Parametrisierung von Bewegungsmodellen setzten sich Jerde und Visscher (2005) in einer ihrer Arbeiten auseinander. Sie untersuchten dabei ausgehend von der Annahme eines jeweils bivariat normalverteilten Fehlers ohne Korrelation eines jeden beteiligten GPS-Fixes die Folgen für die Bewegungsparameterberechnung. Die untersuchten Parameter sind die Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Punkten sowie Richtungsänderungen. Sie schliessen aus ihrer Untersuchung, dass der Einfluss der Unsicherheit auf die aus GPS-Pfaden berechneten Parameter stark vom Aufzeichnungsintervall abhängt. Je grösser das gewählte Intervall im Verhältnis zur Unsicherheit, desto geringer streuen die Parameter. Aufgrund ihrer Resultate stellen sie die Eignung von GPS zur Aufzeichnung von grossmassstäblichen Bewegungen stark in Frage. Laube und Purves (2011) gehen bei ihrer *Cross-Scale*-Analyse von Bewegungsdatensätzen ebenfalls von einer bivariat normalverteilten Unsicherheit der einzelnen GPS-Fixes aus, wie dies theoretisch zu erwarten wäre. Sie kommen dabei ähnlich wie Jerde und Visscher (2005) zuvor zum Schluss, dass besonders bei grossen Aufzeichnungsintervallen zwischen GPS-Pfaden und ihrer *Ground Truth* keine statistisch signifikanten Unterschiede in der Parameterberechnung bestehen. Dies ist gemäss den Autoren insbesondere beim Parameter *speed*, der jeweils lediglich von zwei GPS-Fixes und deren Unsicherheit betroffen ist, der Fall. Die Bedeutung des Aufzeichnungsintervalls für möglichst geringe Unsicherheitseinflüsse wird auch von Laube et al. (2007) unterstrichen. Während die Ergebnisse dieser Studien meist auf Simulationen theoretischer Fehler beruhen, finden sich vor allem in den Bewegungswissenschaften Studien, die sich in der Praxis mit der Zuverlässigkeit von GPS-Aufzeichnungen für die Analyse von sportlicher Bewegung beschäftigen. Coutts und Duffield (2010) untersuchten auf einem Parcours verschiedener Bewegungen (von Stillstand bis Sprint) von 128.5 m Länge die Genauigkeit von Distanzmessungen mit GPS-Geräten. Zusätzlich wurde auch die Reproduzierbarkeit der Resultate analysiert. Die dabei erfassten Längenabweichungen von der *Ground Truth* bewegen sich im Bereich von 5 m, die Streuung der Rundenlängen im Bereich von +/- 8 m. Die Autoren stellten zudem fest, dass markante Geschwindigkeitsänderungen erst bei Streckenabschnitten von über 20 m erkannt werden. Dies bei einem Aufzeichnungsintervall von 1 Hz. Dies wird auch als Grund für die tiefe Reproduzierbarkeit von Abschnitten hoher Geschwindigkeit betrachtet. Zu ähnlichen Resultaten gelangten auch Duffield et. al (2010). Ebenfalls einen Feldversuch führen DeCesare et al. (2005) zur Bestimmung der Unsicherheit infolge von Bewaldung durch. In drei Szenarien (0-10 %, 11-39 %, > 40 % Bedeckung) wird dabei der Einfluss von Vegetation auf die Positionsbestimmung untersucht. Wird ein Pfad unter dichter Bedeckung (> 40 %) mit Intervallen von 1-5 sec erfasst, werden sie im Testumfeld mit 27.5 % zusätzlicher Länge

erfasst, weichen also um rund ein Drittel von der *Ground Truth* ab. Jedoch befanden sich 99% aller GPS-Fixes innerhalb eines Epsilonbandes von ≤ 7.97 m. Daraus lässt sich abschätzen, welche Abweichungen tatsächlich aufgrund von Bewegungen des sich bewegenden Objekts zustande kommen. Da zwischen geringer und keiner Bedeckung keine signifikanten Unterschiede auszumachen sind, schliessen die beiden Autoren auf einen gewissen Bedeckungsgrenzwert, ab welchem die Einflüsse auf die Positionsbestimmung einsetzen. Lineare Zusammenhänge zwischen Bedeckungsgrad und GPS-Genauigkeit, wie sie Rempel et al. (1995) und Eon et al. (2002) in ihren Studien belegen, erachten DeCesare et al. als nicht gegeben.

C Visualisierung von GPS-Unsicherheiten in Pfaden

Die Einflüsse der Unsicherheiten, die bei der Positionsbestimmung mit GPS bestehen, wurden bereits in vielfältiger Art und Weise untersucht. Verglichen dazu sind die Studien, die sich mit den Auswirkungen auf mit GPS erfasste Bewegungspfade befassen, relativ zahlreich. Einen Schritt in die Richtung der Auswirkungen von Positionsunsicherheiten auf Linien zwischen aufeinanderfolgenden Punkten gehen die *Errorband*-Modelle nach Shi und Liu (2000). Dabei wird von einer gradlinigen Verbindung zwischen zwei gemessenen Punkten ausgegangen, deren Endpunkte eine normalverteilte Unsicherheit beinhalten. Folglich ist die Unsicherheit der Verbindungslinie in beiden Endpunkten am grössten, während sie in der Mitte ihr Minimum erreicht. De Bruin (2008) kritisiert an den *Errorband*-Modellen von Shi und Liu (2000), dass sich deren Fehlerverteilung entlang von Linien zwar auf menschgeschaffene, absolut gradlinige Objekte, wie beispielsweise Hausfassaden, anwenden lassen, für gekrümmte Verbindungen jedoch nicht zutreffend ist.

Einen anderen Weg schlagen Downs und Horner (2012) mit ihrem Konzept der *Time Geographic Density Estimation (TGDE)* ein. Bei grösserem Aufzeichnungsintervall nimmt auch der Zeitraum, innerhalb dessen keine Informationen über den Verbleib des sich bewegenden Objekts vorhanden sind, zu. Über den Aufenthaltsort des Objekts zwischen zwei aufeinanderfolgenden Punkten muss also in einem gewissen Masse spekuliert werden. Während Fehlerbänder, wie sie Shi und Liu (2000) und De Bruin (2008) vorschlagen, von einer weitgehend gradlinigen Bewegung ausgehen, welche für natürliche Objekte meist wenig zutreffend ist, trägt der Ansatz der TGDE dem Umstand Rechnung, dass sich Objekte zwischen zwei GPS-Fixes frei bewegen können. Die Form eines Fehlerbandes sollte gemäss TGDE demnach nicht gerade oder gar konkav sein, sondern eher einer konvexen Hülle folgen, seine maximale Breite also in der Mitte eines Abschnittes erreichen und sich zu den beiden Stützpunkten hin verjüngen. Basierend auf den spezifischen Eigenschaften des sich bewegenden Objekts, insbesondere dessen erwarteter Geschwindigkeit, kann nun eine maximal zurückgelegte Distanz zwischen zwei GPS-Fixes berechnet werden. Daraus lässt sich schliesslich die Konvexität der Hülle mittels der sogenannten *Geo-Ellipse-Function* bestimmen.

2.3 Forschungslücken

Wie vorhergehend gezeigt, gibt es eine Fülle von Studien, welche die Einflüsse von GPS-Unsicherheiten in die Positionsbestimmung einzelner GPS-Fixes sowohl theoretisch als auch praktisch untersuchen. Hingegen beruhen die meisten Untersuchungen des Unsicherheitsinflusses auf die Analyse von Bewegungspfaden auf theoretischen Überlegungen, vor allem der Annahme einer unkorrelierten Verteilung der Positionsfehler der beteiligten Punkte. Da die Annahme einer unkorrelierten Fehlerverteilung eines GPS-Pfades umstritten scheint sowie Visualisierungen von aufgezeichneten Pfaden Gegenteiliges vermuten lässt, soll dies anhand von selbsterfassten Bewegungspfaden untersucht werden. Weil die Hersteller von GPS-Geräten keine Informationen zu den implementierten Bewegungsmodellen preisgeben, welche die Aufzeichnung der Pfade beeinflussen, sollen deren Auswirkungen untersucht werden, um allenfalls als Interpretationshilfe von GPS-Pfaden zu dienen.

In der vorliegenden Arbeit werden nun bestehende typische Methoden aus der Forschung mit Bewegungsdaten auf ihre Sensibilität gegenüber GPS-Unsicherheiten untersucht. Dies soll anhand selbsterhobener Daten zur Beantwortung der folgenden Forschungsfragen beitragen.

- Können die in der Literatur festgehaltenen Fehlermessungen bestätigt werden?
- Wie zeigen sich die Einflüsse von Filtersystemen moderner Geräte in den Daten?
- Welche Visualisierungsmethoden eignen sich für die Darstellung von GPS-Unsicherheiten?
- Welchen Einfluss haben die durch GPS-Unsicherheiten veränderten Parameter auf die Segmentierung von GPS-Tracks?
- Bestehen tatsächlich minimale Aufzeichnungsintervalle, ab deren Unterschreiten keine zuverlässigen Aussagen zu Bewegungsparametern mehr möglich sind?

Hiermit soll ein Beitrag zum verbesserten Verständnis und zur zielführenden Interpretation von GPS-Pfaden geleistet werden. Dies insbesondere auch für GPS-Pfade, über deren Entstehung aufgrund fehlender Metadaten keine genaueren Informationen vorhanden sind, wie es in der Praxis oft der Fall ist.

3 Untersuchungsgebiet & verwendete Daten

3.1 Untersuchungsgebiet

Sämtliche verwendeten GPS-Pfade wurden während der Zeitdauer dieser Masterarbeit in Eigenarbeit erfasst. Die Pfade wurden spazierend, laufend, auf dem Fahrrad und auch mit öffentlichen Verkehrsmitteln (Tram, Bus, Zug) aufgezeichnet. Ausgangspunkt der Pfade war in den meisten Fällen Zürich, entsprechend befinden sich die meisten Routen im Raum Zürichsee bis Zürcher Oberland. Die Ost-West-Ausdehnung des Untersuchungsgebiets beträgt rund 40 km, die Nord-Süd-Ausdehnung 70 km. Gesamthaft fließen rund 1 000 km GPS-Pfade in die vorliegende Arbeit ein.

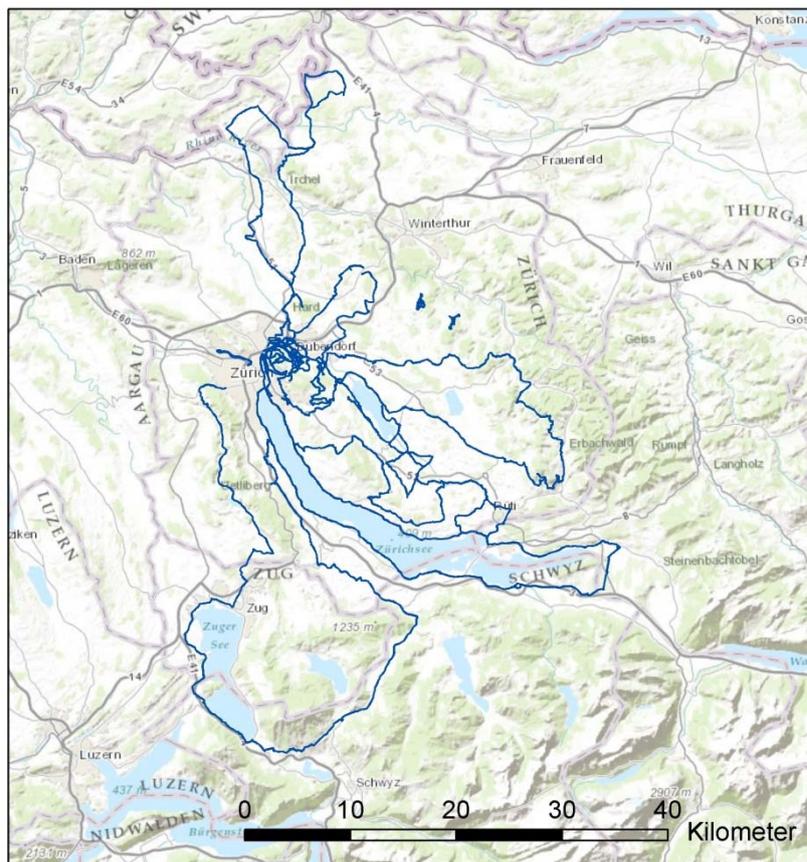


Abbildung 6 Übersicht Untersuchungsgebiet (eigene Abb.)

3.2 Verwendetes Gerät

Als Aufzeichnungsgerät diente eine Garmin Forerunner 310 XT Trainingsuhr, die von vielen Multisportlern zur Trainingssteuerung genutzt wird. Dieses Gerät basiert auf einem hochsensiblen SiRFstarIII GPS-Chip der Firma SiFR Technology⁶. Der Chip verfügt über eine

⁶ <http://www.sifr.com>

sehr kurze TTFF, der *time to first fix*, benötigt also nach dem Aufstarten im Idealfall nur wenige Sekunden, bis er Verbindung zu vier oder mehr Satelliten hergestellt und eine erste Positionsmessung durchgeführt hat. Er findet in einer grossen Zahl von kommerziellen GPS-Geräten Verwendung. Die Forerunner 310 XT ermöglicht eine manuelle Justierung des Aufzeichnungsintervalls bis hinunter auf eine Sekunde, verfügt aber auch über einen intelligenten Aufzeichnungsmodus. Hierbei wird zwar jede Sekunde eine Positionsmessung vorgenommen, jedoch werden nur jene Fixes gespeichert, welche für die Repräsentation des Pfades relevant sind. Dies ohne die Abbildungsgenauigkeit des Pfades merklich zu verschlechtern. Der Hauptvorteil dieses Modus besteht in einem stark reduzierten Speicherplatzbedarf, auf den Energieverbrauch hat dies keinen Einfluss. Für die Aufzeichnung im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Aufzeichnungsintervall von einer Sekunde gewählt. Dadurch war es möglich, nachträglich aus denselben Daten weitere, zeitlich geringer aufgelöste Intervalle mit Punkten identischer Lage zu generieren (Garmin, 2010).



Abbildung 7 Garmin FR 310 XT (Quelle: Garmin)

Die aufgezeichneten GPS-Pfade werden in Dateien vom Typ .gpx geschrieben, sogenannte *GPS Exchange Format Files*. GPX basiert auf dem allgemeinen XML-Standard und kann drei Typen von Elementen enthalten (Waypoint, Route, Track). Nachfolgend ein Ausschnitt aus einem verwendeten GPX-File:

<code><trkseg></code>	Teilsegment des Pfades
<code><trkpt lat="47.4006450" lon="8.5702080"></code>	Latitude / Longitude
<code><ele>472.2000122</ele></code>	Höhe über Meer
<code><time>2012-11-26T17:40:53Z</time></code>	Datum und Uhrzeit
<code></trkpt></code>	
<code></trkseg></code>	

Koordinaten werden standardmässig in WGS84 erfasst, einem geodätischen Referenzsystem, das weltweit eine sehr gute Annäherung an die Erdoberfläche ermöglicht. Zur Weiterverarbeitung mussten die Datensätze ins Schweizer Bezugssystem CH1903+ transformiert werden. Dieses ist das zurzeit genaueste lokale Referenzsystem für die Schweiz.

3.3 Datensätze

3.3.1 Landnutzungsraster

Als zugrundeliegender Landnutzungsraster wird der Rasterdatensatz Arealstatistik 2004/2009 von Swisstopo verwendet. Dieser verfügt über eine Auflösung von 100 m und ist flächendeckend für das gesamte Landesgebiet der Schweiz erhältlich. Arealstatistik beruht auf einem Stichprobendatensatz, bei dem aus einem Luftbild und einem 100 x 100 m Stichprobennetz die jeweiligen Stichprobenpunkte entsprechend der dort vorzufindenden

Landnutzung klassiert werden. Der primäre Auftrag der Arealstatistik ist es, die Bodennutzung gemäss der sozioökologischen Nutzung, die Bodenbedeckung nach deren physischer Ausstattung zu benennen. Aus diesen beiden Grundkategorien wird die Nomenklatur von gesamthaft 72 Klassen, die ihrerseits wiederum in verschiedene Hierarchien geordnet sind, abgeleitet. Die primäre Funktion der Arealstatistik ist es, in regelmässigen Abständen landesweite Nutzungsänderungen zu erfassen. Sie lässt jedoch auch Schlüsse zum Kulturlandverlust oder zum Flächenbedarf pro Einwohner zu. (Swisstopo, 2009) Aus dem Stichprobendatensatz der Arealstatistik wurde für die vorliegende Arbeit ein Rasterdatensatz erstellt, bei dem die Stichprobenpunkte jeweils den Mittelpunkt einer Rasterzelle darstellen. Die resultierende Rasterauflösung beträgt folglich ebenfalls 100 m.

3.3.2 Ground Truth

Da eine Erfassung der *Ground Truth*, also der wirklichen Position zum Aufzeichnungszeitpunkt, als Referenz mit differenziellen GPS-Geräten nicht möglich war, wird auf den Vector25-Datensatz von Swisstopo zurückgegriffen. Dabei handelt es sich um das digitale Landschaftsmodell der Schweiz. Es basiert inhaltlich auf der Landeskarte 1:25 000 und beinhaltet gesamthaft rund 8.5 Millionen Objekte, die in neun thematische Ebenen aufgeteilt sind:

- Strassennetz
- Eisenbahnnetz
- Übriger Verkehr
- Gewässernetz
- Primärflächen
- Gebäude
- Hecken und Bäume
- Anlagen
- Einzelobjekte

Als Referenz für die tatsächlich beschrifteten Wege dient das Strassennetz von Vector25, aus welchem die jeweiligen Strassen manuell ausgewählt werden. Der Vector25-Datensatz bietet gemäss Herausgeber eine Lagegenauigkeit der Objekte von 3-8 m, ist somit genauer als die angenommenen 10 m Lageungenauigkeit der GPS-Pfade (Swisstopo, 2013a).

3.3.3 swissALTI^{3D}

Als digitales Höhenmodell diente für diese Arbeit swissALTI^{3D}, ein hochpräzises Höhenmodell, in dem die gesamte Oberfläche der Schweiz ohne Bebauung oder Bewuchs abgebildet wird. Das mit Hilfe von LIDAR⁷ erfasste Modell ist mit einer Rasterauflösung von 2 m das momentan bestaufgelöste digitale Höhenmodell der Schweiz. Die Herausgeberin Swisstopo gibt die Genauigkeit in allen drei Dimensionen unterhalb von 2000 m.ü.M. mit +/- 0.5 m an, oberhalb von 2000 m.ü.M. beträgt die Abweichung im Mittel 1-3 m. Markante

⁷ Light Detection and Ranging (Laservermessungsmethode)

Einzelpunkte sowie Bruchkanten werden teilweise manuell nachgeführt und weisen eine Genauigkeit von 0.25-1 m auf (Swisstopo, 2013b).

3.4 Verwendete Software

Die auf der Forerunner 310 XT aufgezeichneten Daten wurden mit Hilfe der Interface-Software Carmin Connect⁸ übertragen und aufbereitet. Mit dem Texteditor Komodo Edit⁹ wurden die .gpx-Dateien für den Import in ArcGIS 10.0 der Firma Esri¹⁰ vorbereitet, wo schliesslich die räumlichen Analysen sowie Visualisierung der Resultate erfolgten. Zur statistischen Auswertung der Daten diente OpenOffice von Appache.¹¹



⁸ <http://www.garmin.com>

⁹ <http://www.openkomodo.com/>

¹⁰ <http://www.esri.com>

¹¹ <http://www.openoffice.org>

4 Annahmen

In diesem Kapitel werden auffällige Phänomene aus selbst erfassten Tracks diskutiert sowie die in der Literatur genannten Fehlergrößenordnungen verifiziert bzw. eingeordnet. Daraus werden Annahmen für die späteren Experimente abgeleitet.

4.1 Auftretende Phänomene

4.1.1 Pseudo Movement

Hinter dem Begriff *Pseudo Movement* verbirgt sich ein häufig Phänomen in GPS-Pfaden, das bei sehr geringen Geschwindigkeiten und insbesondere bei Stillstand auftritt. Steht ein sich bewegendes Objekt still, fährt das GPS-Gerät mit der Aufzeichnung gemäss gewähltem Intervall fort. Im Testumfeld wird somit auch bei Stillstand jede Sekunde eine neue Standortbestimmung vorgenommen. Diese Standortbestimmungen weichen teilweise stark voneinander ab, was im Pfad als scheinbare Bewegung oder eben Pseudo-Bewegung erscheint. Die während eines Stillstands aufgezeichneten Streuungen hängen damit zusammen, dass der GPS-Empfänger nur innerhalb des Systems Erde stillsteht. Relativ zu den Satelliten auf ihren Umlaufbahnen ist er jedoch weiterhin in Bewegung. Die Erde und somit auch der GPS-Empfänger drehen sich weiter. Dadurch werden trotz Stillstand Punkte aufgezeichnet und folglich auch Parameter der Bewegung. *Pseudo Movement* führt mitunter zu merkwürdigen Ausprägungen eines Bewegungspfades und muss bei Bewegungsanalysen berücksichtigt werden.

Um Pseudo-Bewegung aus einem Pfad zu erkennen, ist man auf Metadaten der aufgezeichneten Bewegung angewiesen, denn ohne diese ist es nicht in allen Fällen ohne weiteres möglich, zwischen *Pseudo Movement* und tatsächlicher Bewegung zu unterscheiden.

Abbildung 8 zeigt hierzu zwei Beispiele unter gänzlich unterschiedlichen Umweltbedingungen. Der GPS-Empfänger wurde jeweils während exakt 60 Minuten in einer Höhe von 100 cm über dem Boden an einem festen Gegenstand montiert und horizontal ausgerichtet. Die eine Situation entspricht dem Szenario *open sky*, bei dem nahezu freie Sicht gegen Süden besteht. Der Standort befindet sich auf einem offenen Feld im Schweizer Mittelland ohne Beeinträchtigung der Sichtbarkeit und mit möglichst geringem *Multipath*-Potenzial. Der zweite Testaufbau simuliert eine urbane Situation. Die Sicht nach Süden ist durch Gebäude beeinträchtigt und es sind starke *Multipath*-Einflüsse zu erwarten.

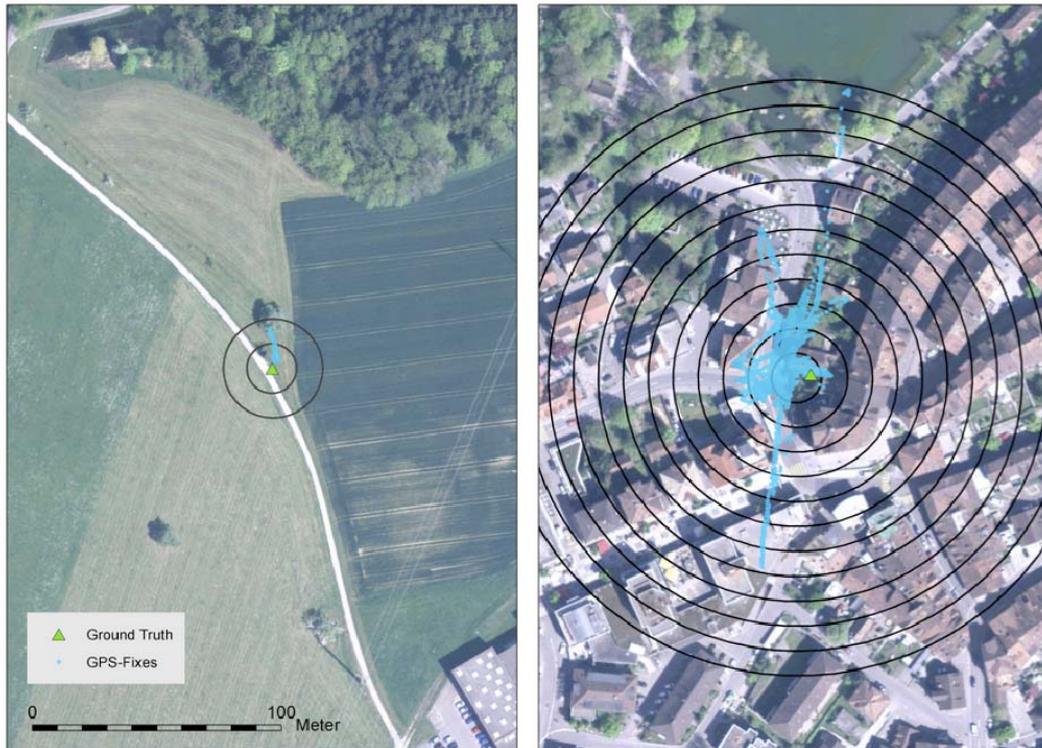


Abbildung 8 Pseudo Movement in offener (links) und urbaner (rechts) Umgebung (eigene Abb.)

Die Resultate der beiden Testanordnungen zeigen typische Ausprägungen. Während bei *open sky* nur eine minimale Streuung der Werte erkennbar ist, zeigt das urbane Szenario eine sehr starke Streuung. Die grösste Abweichung eines GPS-Fixes vom tatsächlichen Standort wird im urbanen Umfeld gemessen, sie beträgt 118 m. Dem stehen lediglich 16 m unter Idealbedingungen gegenüber. Ein Blick auf die mittlere horizontale Abweichung relativiert den Einfluss von Ausreißern etwas, sie beträgt 20.028 m respektive 6.459 m. Gesamthaft wurden Strecken von 1026 m und 27 m aufgezeichnet. Würde daraus nun beispielsweise der Bewegungsparameter Geschwindigkeit berechnet, so erhielte man für das urbane Szenario eine Höchstgeschwindigkeit von 19.843 m/s und eine solche von 3.621 m/s unter nahezu idealen Bedingungen. Dies mit einem während der gesamten Aufzeichnungsdauer stationären GPS-Empfänger!

Die Ergebnisse zeigen, dass mit üblichen GPS-Geräten unter nahezu idealen Bedingungen eine durchschnittliche Genauigkeit von rund 6.5 m erreicht werden kann. Dieser Wert liegt unter sämtlichen in der Literatur genannten Genauigkeitswerten, die von 7.8-15 m reichen. Relativierend wirkt hier die Tatsache, dass in den meisten Studien hierzu nicht nur Messungen unter Idealbedingungen durchgeführt wurden, sondern gemischte Umgebungsbedingungen in die Resultate einfließen. Die hier erreichten Abweichungen zeigen etwa die gleiche Größenordnung wie die Resultate der Feldstudie von Cai et al. (2013). Das Mittel aus den beiden Extrembeispielen beträgt 13.244 m mittlere Abweichung. Für den Fall, dass die Erkenntnisse von Rempel et al. (1995) und Eon et al. (2002) korrekt sind und die Genauigkeit der Positionsbestimmung tatsächlich in einem linearen Zusammenhang zur Beeinträchtigung des Signals durch Bodenbedeckung und die damit verbundenen *Multipath-*

Effekte steht, dürfte für gemischte Umgebungsbedingungen eine mittlere Abweichung von 10 m realistisch sein.

4.1.2 Ausprägung der Pfadrichtung

Das auffälligste Merkmal sämtlicher aufgezeichneter Pfade ist deren Ähnlichkeit zur *Ground Truth* im Gesamtverlauf des Pfades. In allen Fällen stimmt der Verlauf der GPS-Pfade mit dem tatsächlich beschrittenen Weg des sich bewegenden Objekts in hohem Masse überein. Zwar besteht eine umgebungsabhängige seitliche Abweichung, der allgemeine Verlauf ist jedoch stets von hoher Ähnlichkeit. In den seltensten Fällen verläuft ein Pfad unter konstanten Umgebungsbedingungen erst links der *Ground Truth* und kurze Zeit später rechts davon. Auch der seitliche Versatz ist meist relativ konstant. Dieses Verhalten wird in Abbildung 9 deutlich, in welcher der aufgezeichnete GPS-Pfad im abgebildeten Verlauf nördlich seiner *Ground Truth* liegt. Die allgemeine Richtung ist nahezu identisch.

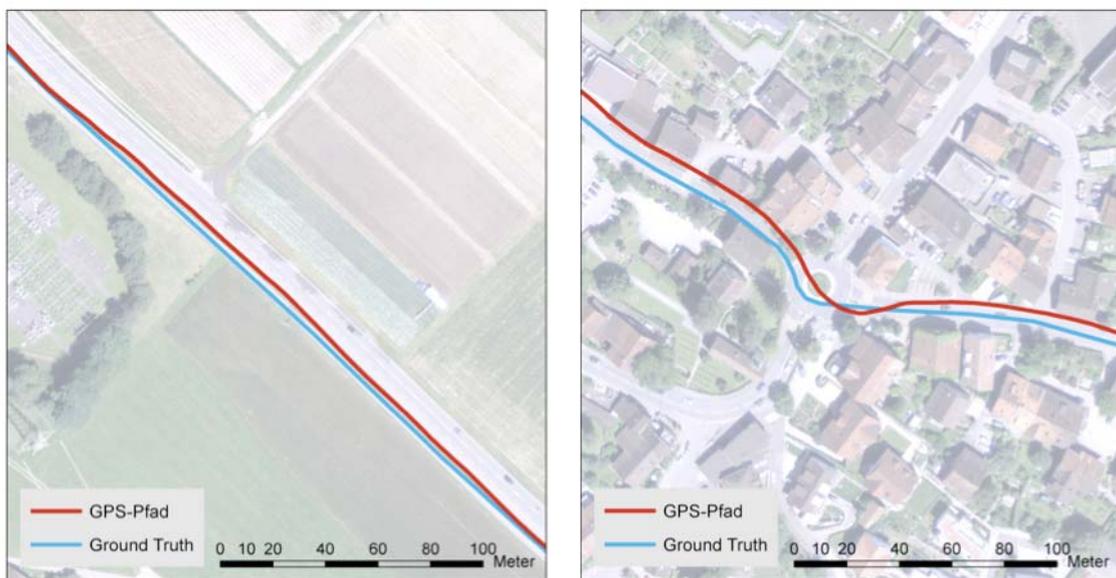


Abbildung 9 Aufzeichnung des Bewegungspfades (eigene Abb.)

Dies widerspricht zuvor besprochenen Studien (Jerde & Visscher, 2005; Laube & Purves, 2011), die für den Positionsfehler der GPS-Fixes von einem normalverteilten Fehler ohne Korrelation ausgehen. Die im Rahmen dieser Arbeit aufgezeichneten Pfade lassen eine deutliche Korrelation der Positionsunsicherheit annehmen. Die von Jerde und Visscher (2005) beschriebenen Auswirkungen der Unsicherheit auf die Berechnung von Bewegungsparametern ist mit den vorliegenden Pfaden stark zu relativieren.

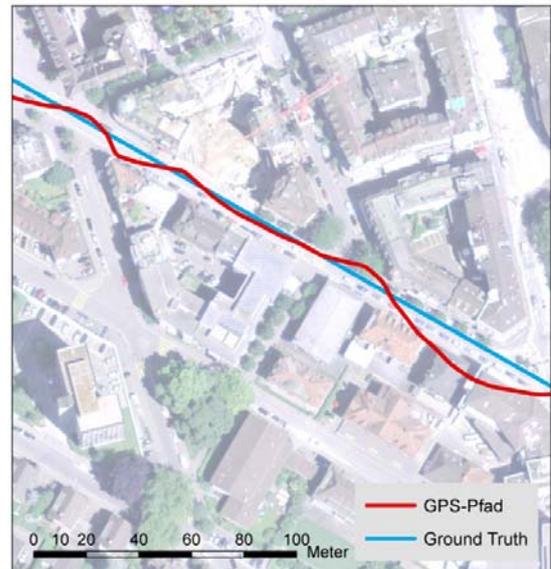
4.1.3 verspätete Reaktion auf Richtungsänderungen

Ebenfalls häufig können Verzögerungen entlang eines Pfades beobachtet werden. Abbildung 9 zeigt dies anhand eines GPS-Pfades, der beim Umfahren eines Kreisverkehrs aufgezeichnet wurde. Wiederum wird durch die Daten der allgemeine Verlauf beziehungsweise die Richtung der Bewegung mit grosser Ähnlichkeit und relativ konstanter seitlicher

Abweichung wiedergegeben. Ein ähnliches Verhalten wie im Kreisverkehr zeigt sich auch bei engen Richtungsänderungen, bei denen der GPS-Pfad die Kurven erst deutlich „überschiesst“, also länger der ursprünglichen Bewegungsrichtung folgt, um sich anschliessend mit ähnlicher Abweichung zur *Ground Truth* wie zuvor wieder einzupendeln.

4.1.4 umweltbedingte Abweichungsausprägung

Die zuvor beschriebene seitliche Abweichung der Pfade von ihrer *Ground Truth* zeigt im gesamten Aufzeichnungsgebiet die erwartete Umweltabhängigkeit (Abbildung 11). Sie fällt in Siedlungsgebieten und bei hohem Bedeckungsgrad durch Vegetation bedeutend grösser aus als in offenem Gelände und somit bei besseren Empfangsbedingungen (Abbildung 9). Dies wirkt sich insbesondere auf die Wiederholbarkeit aus. GPS-Pfade wiederholt abge-schrittener Wege zeigen in bewaldeten Gebieten und Siedlungsräumen infolge von *Multipath*-Effekten durch Vegetation und Gebäudehüllen eine hohe Streuung, während unter Bedingungen mit geringem *Multipath*-Potenzial deutlich geringere Unterschiede zwischen gemäss *Ground Truth* eigentlich identischen Pfaden bestehen. Die allgemeine Pfadrichtung stimmt jedoch in einer Mehrzahl der Fälle auch unter Bedingungen, die eine stär-



kere Abweichung bewirken. Einzig in sehr dicht bebautem Gebiet (Abbildung 10) zeigen aufgezeichnete Pfade eine grosse Fehlerstreuung der einzelnen Punkte. Hier scheinen einerseits starke *Multipath*-Effekte zu wirken, andererseits dürfte die starke Abschattung durch Gebäude dazu führen, dass die Anzahl sichtbarer Satelliten häufig wechselt. Dies mit unmittelbaren Folgen auf die Genauigkeit. In diesem Umfeld erscheint die Annahme eines wenig räumlich korrelierten Fehlers besser zutreffend als in offenem Gelände.

Abbildung 10 sprunghafte Abweichung in urbanem Raum (eigene Abb.)

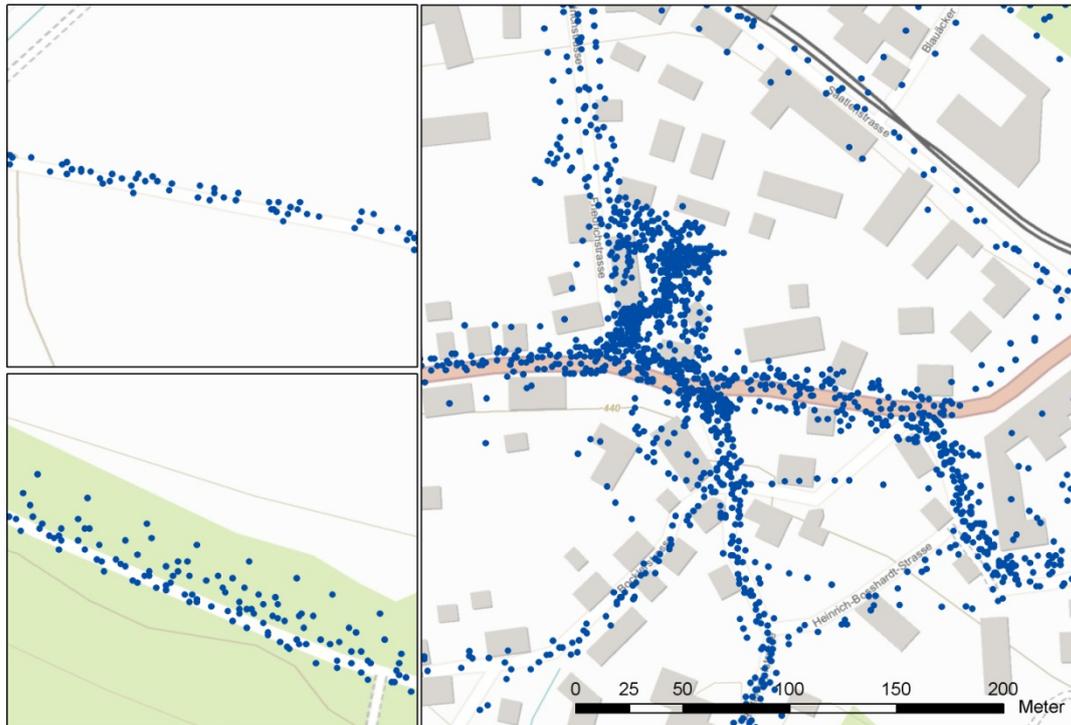


Abbildung 11 GPS-Fixes in Abhängigkeit der Umgebung (eigene Abb.)

4.2 Annahmen für die weitere Arbeit

Die gemachten Beobachtungen deuten darauf hin, dass im verwendeten Gerät ein Bewegungsmodell implementiert ist. Dieses geht bei der Erfassung von Punkten offenbar von einer kontinuierlichen Bewegung aus und scheint die allgemeine Bewegungsrichtung sehr genau in die Aufzeichnung der Daten einfließen zu lassen. Für ein sich nicht bewegendes Objekt scheint das Modell jedoch nicht ausgelegt zu sein, im Stillstand zeigen sich die unkorrelierten Fehler, von denen mehrere Studien ausgehen. (Jerde & Visscher, 2005; Laube & Purves, 2011) Die genaue Funktionsweise dieses von Garmin in der Gerätesoftware implementierten Modells ist jedoch nicht bekannt. Informationen seitens des Herstellers sind dazu auch auf Anfrage nicht erhältlich. Es lassen sich lediglich gewisse Rückschlüsse für den weiteren Verlauf dieser Arbeit mit selbst erfassten GPS-Pfaden daraus ziehen.

1. Die aufgezeichneten GPS-Fixes zeigen eine starke räumliche Korrelation ihrer Positionsunsicherheit.
2. Es besteht eine abnehmende räumliche Korrelation des Fehlers bei hoher Gebäudedichte.
3. Die Bewegungsrichtung (Azimut) ist grundsätzlich als korrekt zu betrachten.
4. Die Einflüsse der Unsicherheiten auf die Bewegungsparameter sind klein.
5. Unsicherheiten in Strecken zwischen aufeinanderfolgenden GPS-Fixes können mit einem Epsilonband konstanter Breite besser abgebildet werden als knochenförmige Epsilon- oder gar G-Bänder.

Es wird im Folgenden eine Unsicherheit in der Positionsbestimmung von 10 m angenommen. Dies deckt sich mit Ergebnissen aus der Literatur sowie auch mit eigenen Beobachtungen. Die Erfassung einer *Ground Truth* mit Hilfe von DGPS, welches eine höhere Genauigkeit aufweisen würde als die verwendeten Vector25-Daten, war aus logistischen und technischen Gründen während der Erfassung nicht flächendeckend möglich.

5 Point-In-Polygon-Analyse

5.1 Nokia Mobile Data Challenge

Im Spätherbst des Jahres 2011 rief der ehemals marktführende Produzent von Mobiltelefonen, das finnische Unternehmen Nokia, unter dem Namen „Nokia Mobile Data Challenge“ (NMBD) einen Forschungswettbewerb ins Leben. Während eines Zeitraums von mehr als einem Jahr wurden vom Nokia Research Center Lausanne in Zusammenarbeit mit annähernd 200 Probanden im Raum des Genfer Sees Daten mit Hilfe von Smartphones erfasst, darunter auch für geographische Analysen interessante Bewegungsdaten. Forschende im Bereich mobiler *Big Data* erhielten die Möglichkeit, sich für die Teilnahme zu bewerben. Nokia hatte dadurch Teil an wissenschaftlich neuen sowie möglicherweise zu einem späteren Zeitpunkt wirtschaftlich interessanten Analysemethoden. Die beteiligten Wissenschaftler kamen ihrerseits zur seltenen Chance, anhand eines äusserst umfangreichen Datensatzes ihre Analysemethoden in einem *Real-Live*-Szenario zu prüfen oder neue Methoden zu entwickeln (Nokia, 2012).

Eingereicht wurden schliesslich 108 wissenschaftliche Arbeiten, von deren Verfassern rund ein Fünftel zu einem abschliessenden Workshop mit mündlicher Präsentation eingeladen wurden. Die verfassten Publikationen erstreckten sich von Methoden zum mobilem Ad-hoc-Austausch von für den Nutzer interessanter Musik (Keller et al., 2012) bis hin zur Entwicklung demographischer Voraussagen aufgrund mobilen Verhaltens (Ying et al., 2012). Fünf Arbeiten bezogen geographische Informationen der Mobiltelefone in Form von GPS-Daten in ihre Analysen mit ein.

5.2 Point-in-Polygon-Analyse von André Skupin und Harvey J. Miller

5.2.1 Grundsatz

Eine dieser fünf sich mit GPS-Daten befassenden Publikationen bzw. Methoden eignet sich vorzüglich für die Analyse im Rahmen der vorliegenden Arbeit. Skupin und Miller (2012) strebten die Entwicklung einer Art Atlas an, der auf der Basis einiger weniger Basiskarten total 21 thematische Karten unterschiedlicher Bereiche beinhalten sollte. Letztere fassen einerseits Themen auf, die zur Herstellung der Basiskarten selbst dienen, versuchen aber andererseits auch andere thematische Daten mit den Basiskarten zu verknüpfen.

Die Autoren beschreiben Mobiltelefonie als eine „*space-adjusting technology*“, also eine raum-anpassende Technologie, welche zu einer Veränderung in der Wahrnehmung des geographischen Raums führt. In Ihren Karten versuchen sie daher mittels neuer Visualisierungen aufzuzeigen, welche auf diese Weise neu entstandenen „*hidden spaces*“, also versteckten neuen Räume menschlicher Aktivität, bestehen und wie sich die Menschen innerhalb dieser neuen Räume verhalten. Kartengrundlagen bilden hierbei ein mehrdimen-

sionaler Attribut-Raum, abgeleitet aus von Smartphone-Nutzern ausgefüllten Fragebogen, der geographische Raum als solches, sowie ein mehrdimensionaler Attribut-Raum, den sie aus der Zeit ableiten, während der sich die Probanden mit ihren mobilen Geräten innerhalb verschiedener Landnutzungsklassen aufgehalten haben. Sämtliche verwendeten Positionsdaten basieren dabei auf GPS- oder WLAN-basierter Positionsermittlung.

Da das Erstellen von *self-organising maps* (SOM), auf der die Mehrzahl der erzeugten thematischen Karten beruhen, nicht Thema dieser Arbeit sein soll, wird das Hauptaugenmerk im Folgenden auf die Ermittlung der in einer Landnutzungsklasse verbrachten Zeit gelegt.

5.2.2 Vorgehen

Zur Berechnung der Zeit, welche ein Smartphone-Nutzer, also das sich bewegende Objekt, innerhalb einer bestimmten Landnutzungsklasse verbringt, bedienen sich die Autoren einer vergleichsweise einfachen, aber dadurch auch höchst praktikablen Methode: Sie nehmen eine Verschneidungsoperation zwischen einem Landnutzungs-Rasterdatensatz und den von Nokia zur Verfügung gestellten Bewegungsdatensätzen vor. Die von den Probanden während der Erhebungsphase erfassten GPS-Pfade, deren Fixes mit einem Intervall von einer Sekunde gespeichert wurden, werden über den Raster des CORINE-Landnutzungsdatensatzes, welches einer europäischen Initiative entstammt, gelegt. Den Fixes, die auf diese Weise den Landnutzungsdatensatz überlagern, wird der Wert der darunterliegenden Rasterzelle zugewiesen. Dies ergibt einen Punktdatensatz mit den jeweiligen Landnutzungs-klassen als Attribut. Die Anzahl der auf diese Weise identisch attribuierten Punkte ergibt die in einer Landnutzungsklasse verbrachte Zeit in Sekunden und somit die Zeit, in welcher sich das bewegende Objekt innerhalb einer bestimmten Landbedeckungsklasse aufgehalten hat (Abbildung 12).

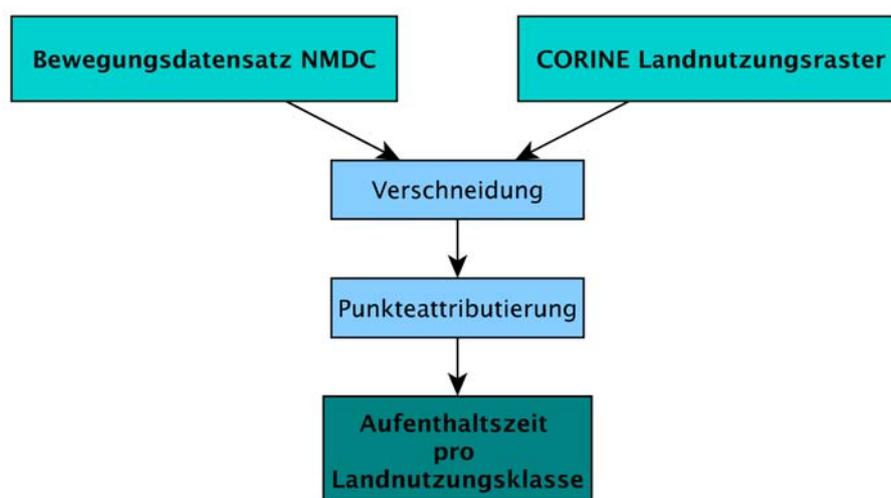


Abbildung 12 Point-in-Polygon-Methode (nach Skupin & Miller 2012)

5.2.3 Einschränkungen und Schwächen

Die vorliegende Methode glänzt durch ihre Einfachheit, sie ist einfach nachvollziehbar und unter der gegebenen Voraussetzung, dass die Position des Objekts jeweils in einem Intervall von einer Sekunde aufgezeichnet wurde und eine grobe Rasterauflösung von 250 m (CORINE verwendet europaweit 100 m Auflösung, in der Schweiz jedoch 250 m) vorliegt, hinreichend aussagekräftig. Wird zusätzlich die meist geringe Fortbewegungsgeschwindigkeit eines Fussgängers oder Radfahrers mit einbezogen, wobei sich die Distanz zwischen den einzelnen Fixes also im Rahmen von wenigen Metern bewegt, ist die gewählte Methode durchaus legitim.

Die Zuverlässigkeit der Methode nimmt ab, wenn das Verhältnis zwischen Rasterauflösung und Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Fixes abnimmt. Da die zwischen zwei Punkten verbrachte Zeit dem jeweils zweiten Punkt zugeordnet wird, sind besonders jene Punkte kritisch, welche sich an einer Klassengrenze befinden. Befindet sich der zweite Punkt nämlich nur minimal jenseits der Klassengrenze, so wird die gesamte für den Weg von Punkt eins zu Punkt zwei benötigte Zeit fälschlicherweise vollumfänglich diesem Punkt zugewiesen. Je grösser die zwischen zwei aufeinanderfolgenden Punkten zurückgelegte Strecke verglichen mit der Rasterauflösung bzw. der gesamten Segmentlänge ist, desto grösser wird der Einfluss dieser falsch klassierten Zeit.

Hierzu ein kurzes rechnerisches Beispiel unter Annahme einer Fortbewegung mit (für Fussgänger realistischer) konstanter Geschwindigkeit von 1.5 m/s (5.4 km/h):

Rasterauflösung	Anzahl Klassen	Punkte Klasse A	Punkte Klasse B	Punkte Klasse C
100 m	3	66	67	67
20 m	3	13	13	14
2 m	3	1	0	1

Tabelle 1 Aufenthaltszeiten bei Fortbewegungsgeschwindigkeit von 1.5 m/s

Während der Unterschied zwischen den Aufenthaltszeiten im ersten Fall nur rund 1.5 % ausmacht, sind es im zweiten Fall, mit höherer Rasterauflösung und folglich kleinerem Verhältnis der Rasterauflösung zur zurückgelegten Distanz, bereits über 7.1 %. Im letzten Fall, bei einer sich der Distanz zwischen zwei Punkten annähernden Rasterauflösung, werden die Unterschiede noch grösser bzw. die Zuverlässigkeit der Methode frappant kleiner. Dies, obwohl die Aufenthaltszeiten in allen drei Klassen in den drei Fällen durch die konstante Fortbewegungsgeschwindigkeit jeweils identisch sein müssten.

Genauso verhält es sich bei einem verlängerten Aufzeichnungsintervall sowie höheren Fortbewegungsgeschwindigkeiten des sich bewegenden Objekts. In beiden Fällen vergrössert sich die Distanz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Punkten. Letztlich wird die Aufenthaltszeit innerhalb von Landnutzungsklassen einzig dann der Realität entsprechend wiedergegeben, solange die Fortbewegungsgeschwindigkeit konstant ist und die Klassengrenze den jeweiligen Abstand zwischen sämtlichen unterschiedlich attribuierten Punkten exakt halbiert. Befindet sich jedoch der Anfangspunkt eines Segments in unmittelbarer Nähe zur Klassengrenze, wird dieses Segment bzw. die dortige Landbedeckungsklasse

überrepräsentiert. In diesem Falle würde die berechnete Aufenthaltszeit fälschlicherweise zu lang ausfallen.

Da diese *Point-in-Polygon*-Methode von Skupin und Miller im Besonderen auf die Lage grenznaher Pfad-Segmente sensibel reagiert, müssten Verbesserungsansätze in diesen Bereichen ansetzen. Denkbar wäre etwa, die Segmente zwischen zwei Punkten künstlich kleiner aufzulösen, dies ohne das Aufzeichnungsintervall anzutasten. Entsprechend der durchschnittlichen Fortbewegungsgeschwindigkeit über eine bestimmte Anzahl von Punkten hinweg könnten auf diese Weise zusätzliche Punkte hinzugefügt werden. Dies würde dazu führen, dass die einzelnen Aufenthaltszeiten realitätsnäher wiedergegeben würden. Je grösser die Distanz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Punkten, sei es infolge eines veränderten Intervalls oder einer höheren Geschwindigkeit, desto wichtiger wird ein derartiger Lösungsansatz.

5.3 Auswirkungen der Positionsunsicherheiten von GPS

Wie in Kapitel 2.2.1 aufgezeigt, unterliegen Positionsbestimmungen mit Hilfe von Globalen Navigations Satelliten Systemen (GNSS) einer Reihe von Umwelteinflüssen, die eine teils erhebliche Unsicherheit in die Positionsdaten induzieren. Dies führt dazu, dass Positionsangaben um mehrere Meter von der wirklichen Position abweichen können. In extremen Fällen kann diese Abweichung von der *Ground Truth* wie aufgezeigt mehrere Dekameter betragen.

In diesem Kapitel soll nun der Einfluss dieser Unsicherheiten auf die zuvor vorgestellte Methode von Skupin und Miller untersucht sowie nach Möglichkeit quantifiziert werden. In einem ersten Teil wird die im vorherigen Kapitel angesprochene grosse Schwäche der Methode, die Anfälligkeit auf Veränderungen der Distanz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Punkten, anhand eines realen Tracks aufgezeigt. In einem zweiten Teil wird für jede Landnutzungs-kategorie eine erwartete Auftretenswahrscheinlichkeit, also die Wahrscheinlichkeit, dass sich Punkte eines Tracks unter Berücksichtigung der durch GPS induzierten Unsicherheit innerhalb einer Landnutzungs-kategorie befinden, berechnet. Zudem wird analysiert, wie gross die Wahrscheinlichkeit ist, dass entlang eines GPS-Pfades jene Klassen auftreten, die gemäss der Klassierung des Pfades auftreten müssten.

5.4 Analyse der Methode von Skupin und Miller

Die im vorhergehenden Kapitel kritisierte Anfälligkeit der vorgestellten Methode auf sich verändernde Abstände zwischen zwei Punkten wird durch Aufzeichnungsintervalle von 5 m, 10 m, 20 m und 40 m untersucht. In einem ersten Schritt werden entlang eines aufgezeichneten Bewegungspfadés sämtliche Fixes eliminiert und durch Punkte mit konstantem Abstand von 5, 10, 20 und 40 m ersetzt. Die so entstandenen Trackpunkte werden mit dem Rasterdatensatz der Arealstatistik (Swisstopo, 2009) überlagert, die jeweilige Landnutzungs-kategorie analog zur Methode von Skupin und Miller den einzelnen Punkten zugewiesen. Der Bewegungspfad selbst wird mit dem Rasterdatensatz verschnitten. Es entstehen Pfadsegmente von in sich jeweils einheitlicher Klassierung. Die Anzahl Punkte pro Landnutzungs-kategorie wird nun durch die aufsummierte Gesamtlänge identisch klassierter Segmente dividiert. Dies ergibt einen Anhaltspunkt, wie gut ein einzelner Punkt die Aufenthaltszeit tatsächlich wiedergibt. Unter der Annahme, dass die Anzahl GPS-Fixes pro Landnutzungs-kategorie die Aufenthaltszeit sehr präzise wiedergibt, müssten die berechneten Werte jeweils identisch sein. Je grösser das gewählte Aufzeichnungsintervall, desto grösser die zu erwartenden Unterschiede.

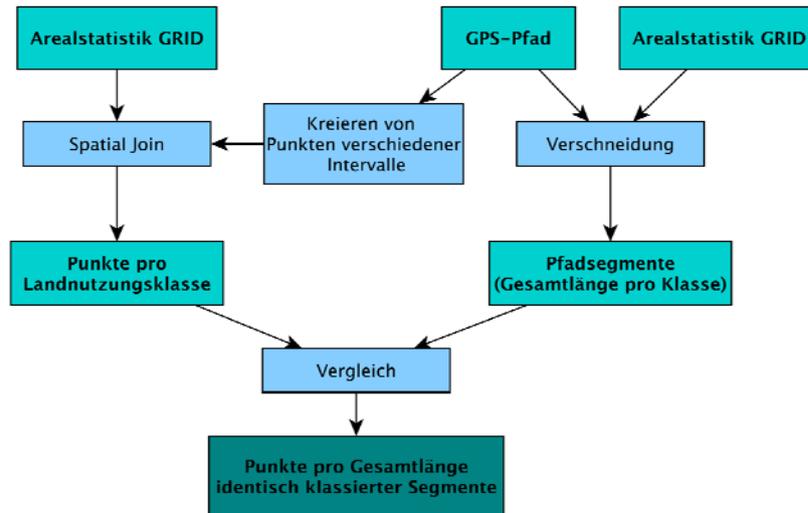


Abbildung 13 Verifizierung der Methode von Skupin & Miller (eigene Abb.)

Zu erwarten wäre zudem, dass der jeweils höchste Wert bei sämtlichen vier Intervallen in derselben Landnutzungs-klasse liegt.

In einem nächsten Schritt werden für jede Landnutzungs-klasse jedes Intervalls die soeben berechneten Verhältnisse in Relation zum höchsten Wert gesetzt. Zur besseren Vergleichbarkeit wird für alle vier Intervalle jene Klasse als Referenz gewählt, die im Intervall von 5 m den höchsten Wert aufweist. Im Beispielfall ist dies die Landnutzungs-klasse 35.

Schliesslich werden unter der Annahme einer durchschnittlichen Fortbewegungsgeschwindigkeit von 10 m/s, dies entspricht circa der Durchschnittsgeschwindigkeit während der Datenerfassungsfahrt, aus der Anzahl Punkte pro Landnutzungs-klasse und dem jeweiligen Aufzeichnungsintervall die Aufenthaltszeiten innerhalb der verschiedenen Klassen berechnet.

5.4.1 Einfluss der GPS-Unsicherheiten auf erwartetes Auftreten einer Landnutzungs-klasse

Der Einfluss der in jedem GPS-Fix und entsprechend auch in jedem GPS-Pfad enthaltenen Positionsunsicherheiten auf die Berechnung der Aufenthaltszeiten pro Landnutzungs-klasse wird auf mehrere Arten aufgezeigt und analysiert. Die Berechnung des erwarteten Auftretens einer Landnutzungs-klasse entlang eines GPS-Pfades beruht auf dem Prinzip des Erwartungswerts. Dieses geht davon aus, dass der Erwartungswert für eine Klassierung entlang eines Pfades gesamthaft eins beträgt. Übertragen auf die verwendeten Epsilon-bänder bedeutet dies, dass die Gesamtfläche dieses Bandes den Wert 1 erhält. Da die Gesamtfläche durch das darunterliegende Landnutzungs-raster in Teilflächen aufgeteilt wird, entspricht der jeweilige Flächenanteil einer einzelnen Landnutzungs-klasse an der Gesamtfläche dem Erwartungswert dieser Landnutzungs-klasse. Auf diese Weise kann für jede Klasse aus Arealstatistik ihre Auftretenswahrscheinlichkeit berechnet werden.

Abbildung 14 veranschaulicht das verwendete Prinzip. Solange sich ein Epsilon vollständig innerhalb einer Klasse befindet, ist die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Pfadsegment mit der vorliegenden Klasse klassiert wird, 1. Je näher sich der Pfad einer Klassengrenze annähert, desto mehr tendiert die Auftretenswahrscheinlichkeit gegen 0.5. Befindet sich der GPS-Pfad exakt auf der Klassengrenze, so ist der Erwartungswert für beide angrenzenden Klassen 0.5.

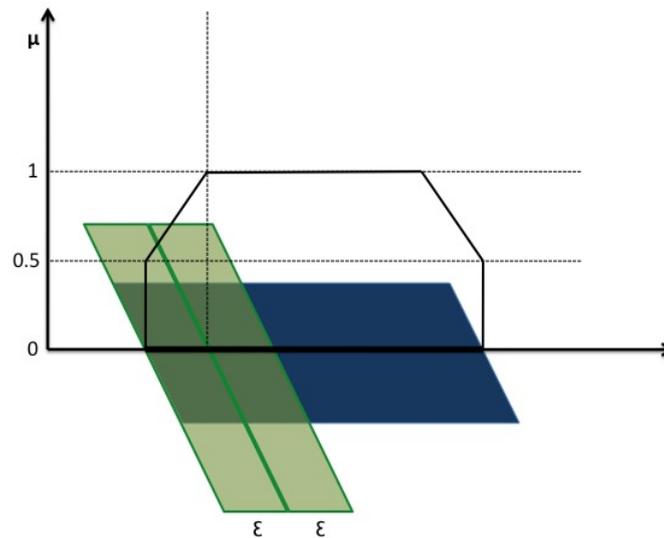


Abbildung 14 Erwartungswert mit Epsilon-Band (eigene Abb.)

In einem ersten Schritt wird um die aufgezeichneten GPS-Pfade je ein gleichverteiltes Epsilon-Band mit der Annahme einer realitätsnahen Abweichung bis 10 m (Kuter & Kuter, 2010) gelegt. Um die Pfadsegmente, die durch Verschneidung der Pfade mit dem Landnutzungsraaster Arealstatistik (Swisstopo, 2009) entstehen, werden ebenfalls Epsilon-Bänder mit $\epsilon = 10$ m gebildet, diese jedoch im Gegensatz zum klassischen Epsilon-Band mit abgeflachten Enden. Durch die Verschneidungsoperation entsteht eine Vielzahl an einzelnen Polygonen, die jeweils mit Landnutzungsklassen attribuiert sind. Um nun den Erwartungswert für die Auftretenswahrscheinlichkeit einer einzelnen Landnutzungsklasse in einem Pfadsegment zu berechnen, werden für sämtliche zu einem Segment gehörende Polygone deren Teilflächen durch die Gesamtfläche des Epsilon-Bandes entlang des entsprechenden Segments dividiert. Sollte das ganze Epsilon-Band einheitlich klassiert sein, wäre der höchstmögliche Wert in diesem Falle also 1. Dies ergibt die Wahrscheinlichkeit, dass entlang eines Pfadsegmentes Punkte unter der Berücksichtigung der GPS-Unsicherheiten mit der jeweiligen Landnutzungsklasse attribuiert werden.

Zum Vergleich wird als *Ground Truth*, also als tatsächliche Bewegungspfade des sich bewegendem Objekts, der Vector25-Datensatz von Swisstopo (2012) herangezogen. Dieser weist gemäss Hersteller eine Unsicherheit von 3 bis maximal 8 m auf, sollte also genauer ausfallen als ein mit GPS erfasster Pfad.

Die mittlere Unsicherheit von 5.5 m des Vector25-Datensatzes dient als Inputmass für das Epsilon-Band, welches entlang der *Ground Truth*-Segmente gebildet wird.

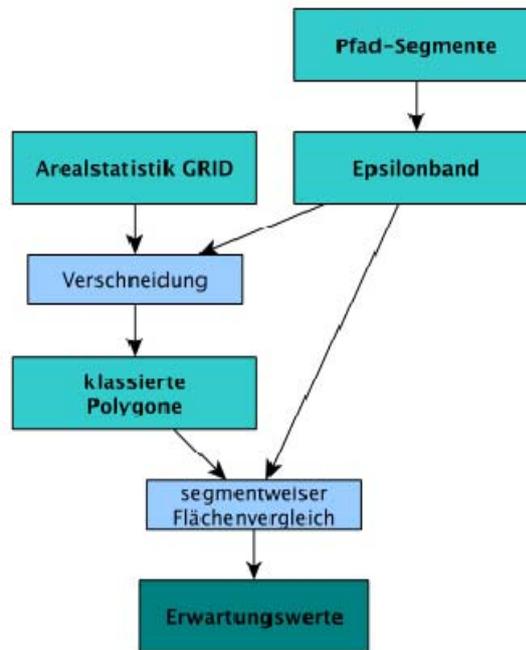


Abbildung 15 Berechnen der Erwartungswerte (eigene Abb.)

5.4.2 Einfluss der GPS-Unsicherheiten auf Segmentklassierung

Anschliessend soll untersucht werden, wie viele Punkte innerhalb eines Epsilonbandes dieselbe Klassierung aufweisen wie der effektiv erfasste Track. Anhand dieser Methode lässt sich eindrücklich zeigen, welche Einflüsse die Berücksichtigung normalverteilter Werte in einem Epsilonband im Vergleich zu einer Gleichverteilung auf das Gesamtergebnis hat. Andererseits widerspiegelt diese Methode auch, wie sich die durch GPS in die einzelnen Punkte des Bewegungspfads induzierte Unsicherheit auf die zu erwartende Klassierung auswirkt.

Zur Modellierung einer Normalverteilung innerhalb des Epsilonbandes wird das Band in mehrere schmalere Bänder von 1 m Breite aufgeteilt, was beispielsweise für ein Epsilonband von 20 m Breite 19 Teilbänder ergibt. Das mittlere Band wird aus Symmetriegründen bei 2 m belassen. Für diese Teilbänder wird eine Normalverteilung berechnet und entsprechend in die Attributtabelle eingefügt. Es ergeben sich quasi kontinuierlich normalverteilte Werte innerhalb des Epsilonbandes (Abbildung 16).

Die Ermittlung der identisch klassierten Bereiche eines Epsilonbandes erfolgt folgendermassen: Zuerst wird der GPS-Pfad wie bereits in den vorhergehenden Kapiteln in Segmente aufgesplittet. Entlang dieser Segmente werden sogleich ebenfalls Epsilonbänder generiert. Diese Epsilonbänder werden mit dem Landnutzungsraster verschnitten, es entstehen pro Segment in den meisten Fällen mehrere Polygone, die unterschiedlich klassiert sind.

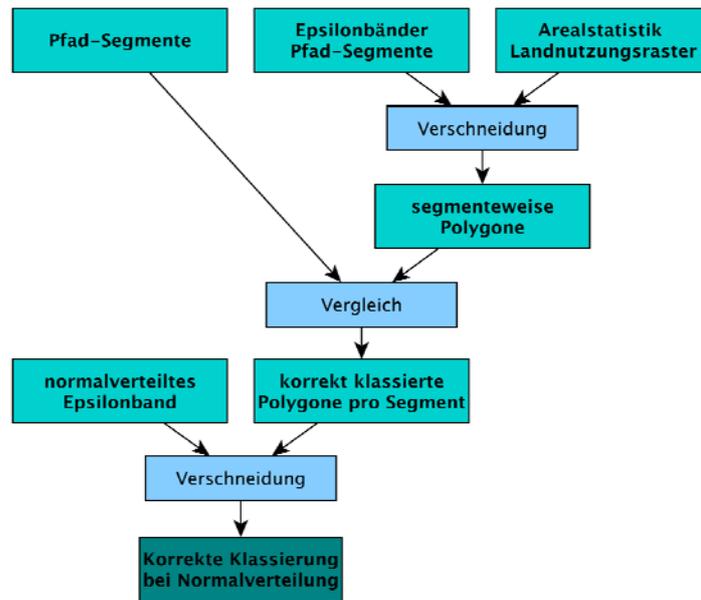


Abbildung 16 Ermitteln der Wahrscheinlichkeit korrekter Klassierung (eigene Abb.)

Da jedoch das Segment selbst per Definition einheitlich klassiert ist, weist nur eines der jeweiligen Polygone dieselbe Klassierung auf wie das Pfadsegment selbst. Dieses Polygon ist identisch klassiert, Punkte, die sich innerhalb dieses Unsicherheitsbereichs befinden, sind trotz Unsicherheit gleich klassiert wie das Pfadsegment. Werden nun sämtliche korrekt klassierten Teile der segmentweisen Epsilonbänder in ein Verhältnis zur gesamten Epsilonbandfläche gesetzt, erlaubt dies eine Abschätzung davon, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Pfad trotz GPS-Unsicherheit dieselben Klassierungen enthält. Zum Einbezug der Normalverteilung müssen lediglich noch die richtig klassierten Polygone mit dem normalverteilten Epsilonband verschnitten und anschliessend mit diesem verglichen werden.

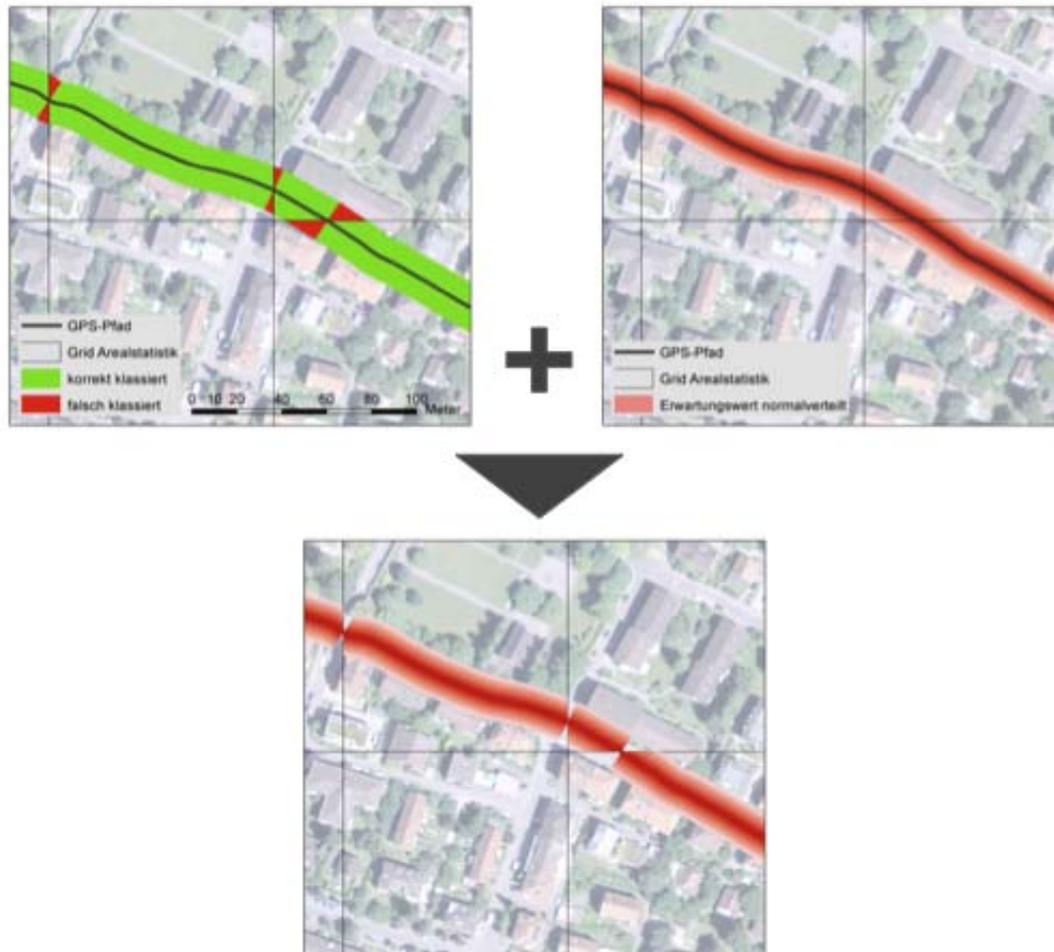


Abbildung 17 Erwartungswerte identischer Klassierung (eigene Abb.)

5.4.3 Analyse des Kontexts

Die zuvor durchgeführten Analysen zeigen zwar deutlich Einflüsse der GPS-Unsicherheit, jedoch soll in einem nächsten Schritt der Einfluss des zugrundeliegenden Rasterdatensatzes auf die Resultate untersucht werden. Dies erlaubt es, die Aussagen betreffend Kontext zu verifizieren. Anstelle des Arealstatistik-Datensatzes werden nun die Primärflächen des Vector25-Datensatzes benutzt. Diese Ebene beschreibt die primäre Bodenbedeckung in randscharf abgetrennten Polygonen in gesamthaft 28 Klassen. Mit Hilfe dieses Vektordatensatzes ist im Vergleich zum Arealstatistikraster eine höhere Zuverlässigkeit bei einer Aussage zum Kontext der Bewegung und – in diesem Zusammenhang besonders von Interesse – zum Kontext des auftretenden Fehlers zu erwarten, da Einflüsse durch die Art der Datenerfassung reduziert werden.

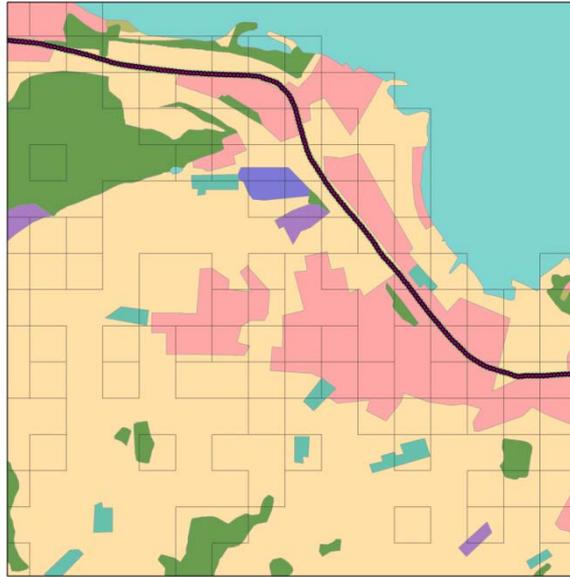


Abbildung 18 Vergleich Arealstatistik mit Vector25 (eigene Abb.)

Aus diesem Grund werden die zuvor eingeführten Erwartungswerte für die Bodenbedeckung gemäss Primärflächen-Polygonen nun sowohl für die *Ground Truth* als auch für den echten GPS-Track berechnet. Sämtliche identisch klassierten Erwartungswerte entlang der *Ground Truth* sowie des aufgezeichneten Pfads werden analog zur genannten Methode verglichen und ihre prozentuale Abweichung berechnet. Zusätzlich werden die Flächen- und somit Erwartungswerte-Anteile am Gesamterwartungswert ermittelt. Auf diese Weise lassen sich Schlüsse auf die Abweichungen in der Klassierung der einzelnen Abschnitte ziehen und Unterschiede zwischen *Ground Truth* und GPS-Pfad aufdecken.

5.5 Resultate und Interpretation

5.5.1 Verifizierung Methode von Skupin & Miller

Mit der anfänglich durchgeführten Verifizierung der Methode kann gezeigt werden, dass die theoretisch erwartete Anfälligkeit auf ein sich veränderndes Intervall in der Realität tatsächlich besteht. Die Abweichungen zwischen den jeweils längsten und kürzesten Aufenthaltszeiten pro Landnutzungs-kategorie (Abbildung 19) reichen von 1 bis 39 %. Zwar betonen die Autoren explizit, dass ihre Methode nur für Intervalle von einer Sekunde und grosse Datensätze entwickelt wurde. Durch die enorme Anzahl an GPS-Fixes des Nokia-Datensatzes werden natürlich gewisse ausgleichende Effekte erreicht. Nichtsdestotrotz bleibt die Methode anfällig für eine sich verändernde Distanz zwischen aufeinanderfolgenden Punkten. Sei diese nun durch ein verändertes Intervall oder durch eine höhere Fortbewegungsgeschwindigkeit herbeigeführt.

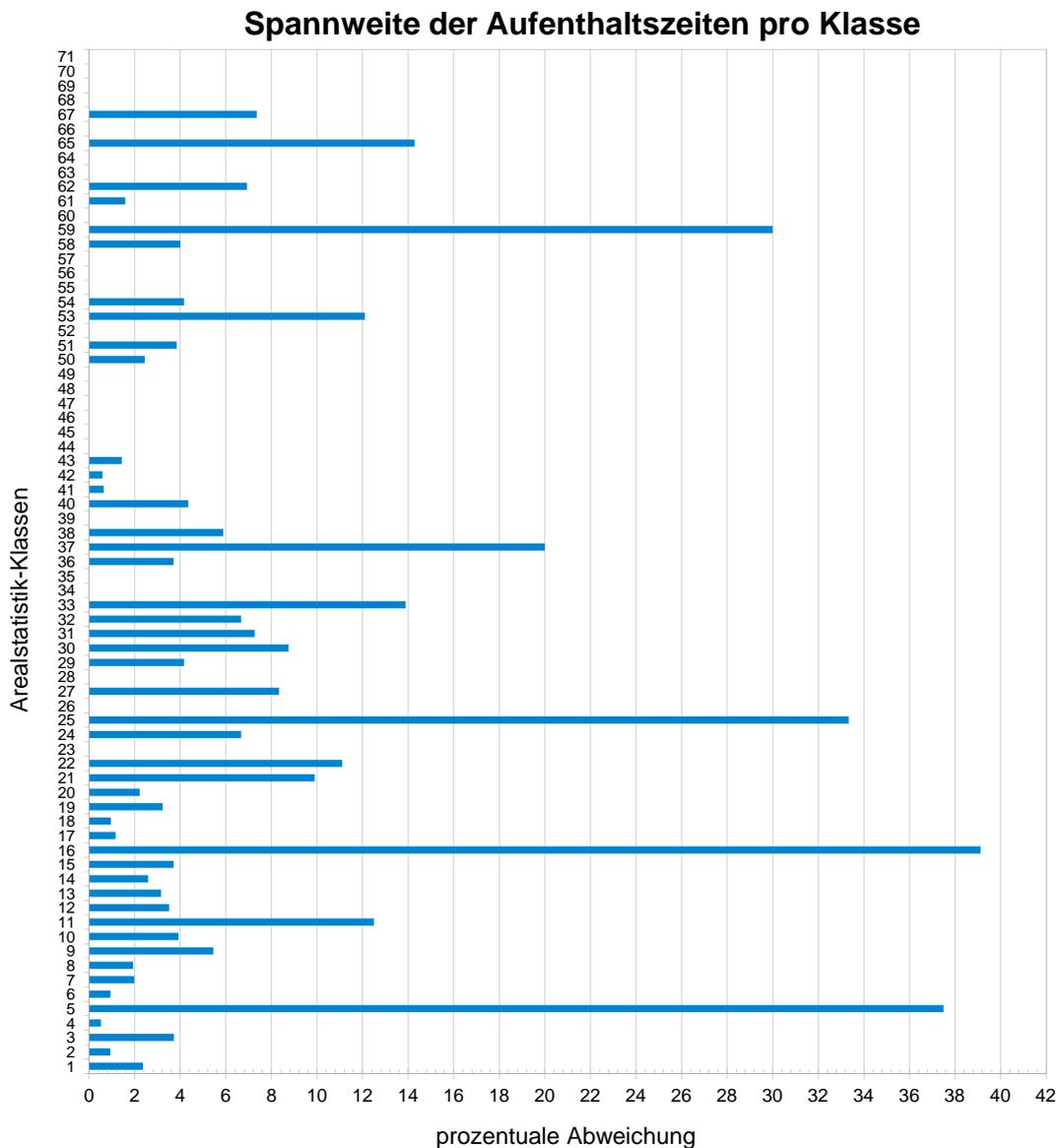


Abbildung 19 Spannweite der Punkte pro Klasse bei verändertem Intervall (eigene Abb.)

In Abbildung 20 wird zudem ersichtlich, welche Auswirkungen eine Veränderung des Aufzeichnungsintervalls auf die Anzahl klassierter Punkte pro Klasse hat. Die daraus ermittelten prozentualen Abweichungen zu der jeweiligen Anzahl Punkte der Landnutzungsklasse Nr. 35 zeigen, wie sich eine veränderte Distanz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Punkten auf die Zuverlässigkeit der Methode auswirkt. Gewisse Landnutzungsklassen – beziehungsweise gemäss Skupin und Miller die Aufenthaltszeit innerhalb einer solchen – werden durch veränderte Intervalle stark über-, andere stark unterrepräsentiert.

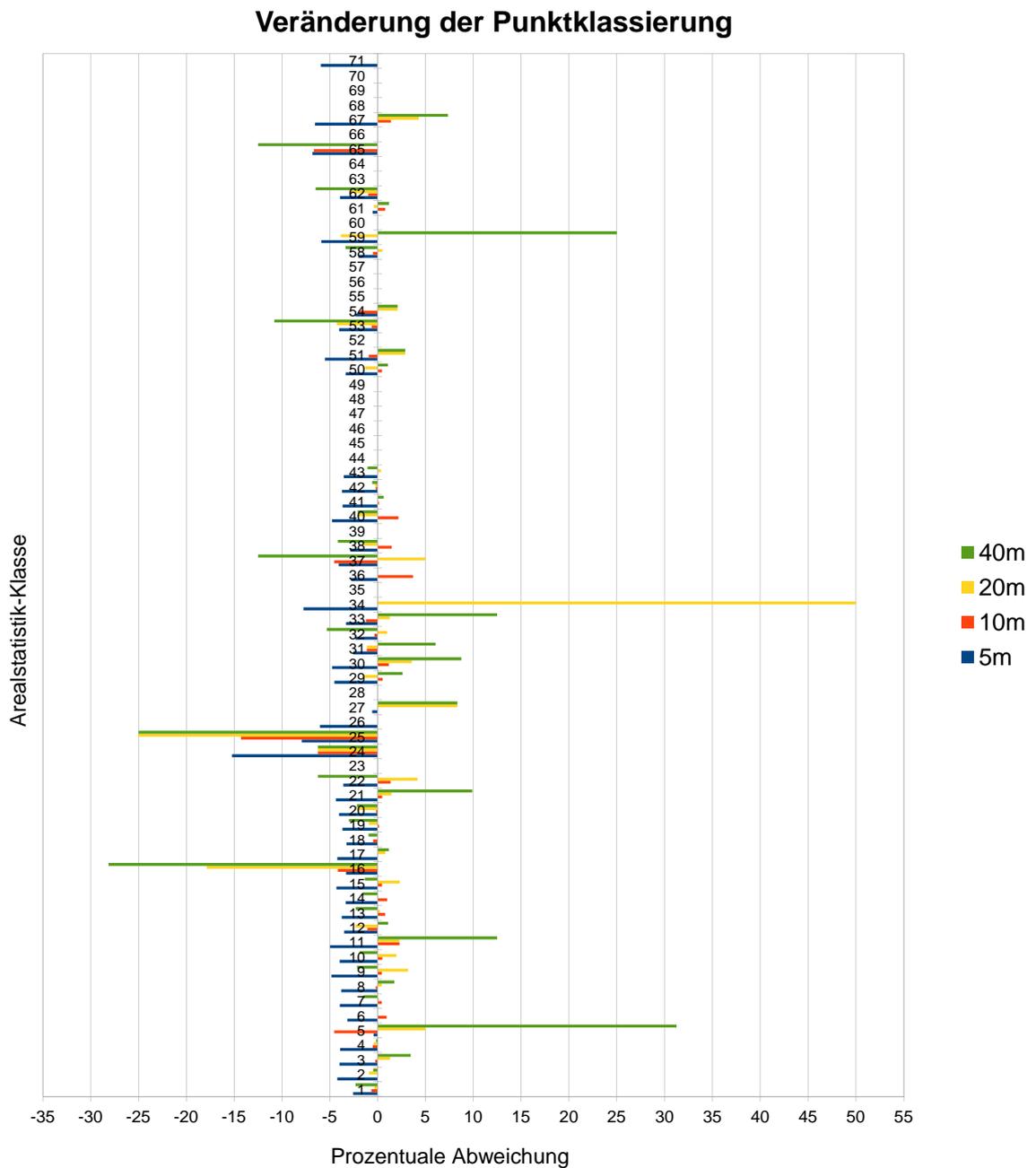


Abbildung 20 Abweichung der Anzahl klassierter Punkte von der Punktzahl der Klasse 35 (eigene Abb.)

5.5.2 Veränderung der Auftretenswahrscheinlichkeiten

Der Vergleich der Erwartungswerte zeigt, in welchen Landnutzungsklassen durch die Unsicherheiten der GPS-Messungen besonders grosse Veränderungen erkennbar sind. Tiefe Werte sind ein Indiz dafür, dass Klassen nur kurz durchlaufen wurden oder sich das Objekt entlang einer Klassengrenze bewegt hat. In beiden Fällen überlagern nur kleine Anteile der Epsilonbänder den Arealstatistik-Raster, was zu einem entsprechend geringen Erwartungswert für die dortige Landnutzungsklasse führt.

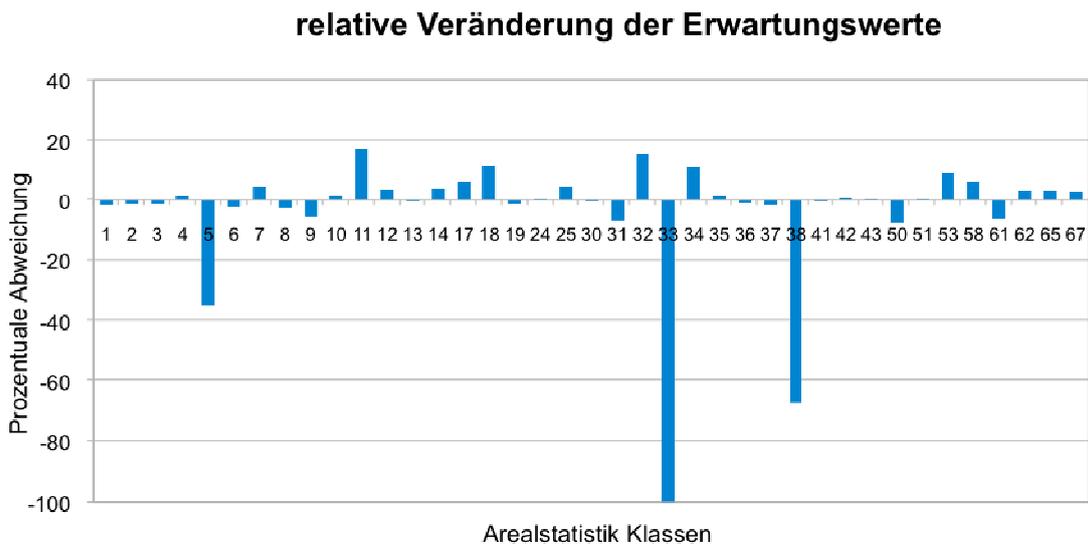


Abbildung 21 Abweichung der Auftretenswahrscheinlichkeiten (eigene Abb.)

Die resultierenden Werte (Abbildung 21) mögen auf den ersten Blick teils riesig erscheinen. Doch gilt es zu relativieren, dass in einzelnen Klassen nur einige wenige Punkte zu liegen kommen. In diesen Fällen hat ein einzelner abweichend klassierter Punkt einen enormen Einfluss auf das Resultat. Zu dieser Kategorie sind im vorliegenden Beispiel die Resultate der Klassen 5, 11, 33 und 38 zu zählen. Die in diesen Klassen auftretenden grossen Abweichungen dürften vor allem durch das sehr geringe Auftreten zustande kommen. Bei einem Blick auf die Nomenklatur der Arealstatistik erscheint dies plausibel, stehen diese vier Klassen doch für folgende Kategorien:

- 5 Reihen- und Terrassenhäuser
- 11 Landwirtschaftliche Gebäude
- 33 Golfplätze
- 38 Feldobst

Sämtliche vier Kategorien kommen entlang der Erhebungsstrecke nur in sehr geringer Zahl vor und sind auch über das gesamte Untersuchungsgebiet betrachtet eher selten.

Demgegenüber sind die Klassen 7, 14, 17, 18, 31, 32 und 50 wesentlich häufiger (>20 Segmente) entlang der Untersuchungsstrecke zu finden, weisen aber gleichzeitig Erwartungswertabweichungen von mehr als 5 % auf:

- 7 Mehrfamilienhäuser
- 14 Umschwung von nicht spezifizierten Gebäuden
- 17 Strassen, Wege
- 18 Strassengrün (Verkehrsinseln, Kreisel, künstliche Böschungen etc.)
- 31 Öffentliche Parkanlagen
- 33 Sportanlagen
- 50 Normalwald

In diesen Landnutzungsklassen ist der Einfluss von einzelnen abweichend klassierten Punkten relativ klein, eine Abweichung aufgrund von Umweltbedingungen dadurch wahrscheinlicher. Die sieben auffälligen Landnutzungsklassen können in drei Gruppen aufgeteilt werden: einerseits meist grossflächige Klassen wie Normalwald, Sportanlagen oder öffentliche Parkanlagen, die man entweder durchquert oder deren Begrenzungen man folgt. Wege führen meist Wäldern entlang oder quer durch sie durch. Nur selten werden Wälder durch Wege nur kurzzeitig gestreift. So verhält es sich auch mit Parkanlagen, die vielfach von Zäunen umgeben sind und nur durch Eingangsbereiche zugänglich sind. Sportanlagen und Umschwung von Gebäuden verfügen über dieselben Eigenschaften diesbezüglich. Zur zweiten Gruppe zählen Klassen, die für sich auf dem Boden bewegende Objekte unter normalen Umständen undurchdringlich sind, wo also lediglich einer äusseren Begrenzung gefolgt werden kann. Hierzu zählt die Klasse der Mehrfamilienhäuser. Die letzte Gruppe bilden Strassen und Wege. Diesen Objekten folgt man typischerweise oder sie werden gequert. Es scheint daher plausibel, dass die Unterschiede in den Erwartungswerten dieser Landnutzungsklassen wiederum durch die Unsicherheit der Position, insbesondere bei der Bewegung entlang von markanten Objektgrenzen, zustande kommen. Dies sowohl für Objekte, entlang derer die Bewegung stattgefunden hat, als auch für Objekte, auf denen sich das *moving object* bewegt hat. Diese Schlussfolgerung wird durch Abbildung 22 gestützt, welche die 72 Landnutzungsklassen aggregiert in den vier Klassen Siedlungsflächen, Landwirtschaftsflächen, bestockte Flächen und unproduktive Flächen wiedergibt. Es zeigt sich, dass die Auftretenswahrscheinlichkeiten in den zu Siedlungsflächen gehörenden Klassen gesamthaft betrachtet am meisten abweichen.

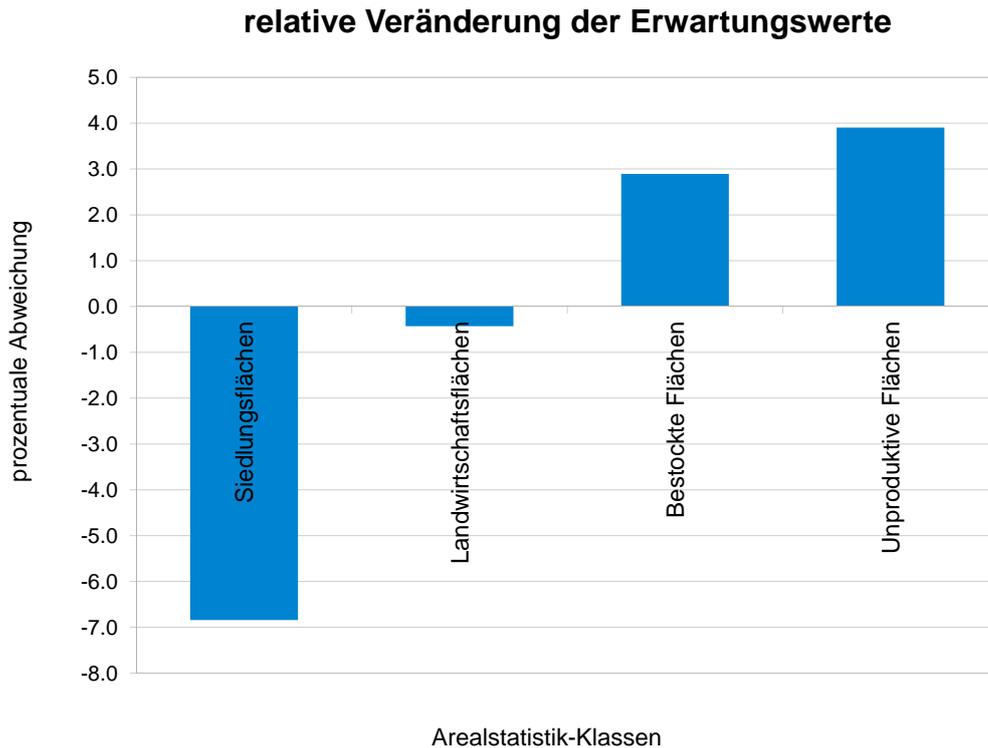


Abbildung 22 Veränderung der Auftretenswahrscheinlichkeit bei Aggregation in vier Klassen (eigene Abb.)

5.5.3 Veränderung der Segmentklassierung

Bei einer realistischen maximalen Abweichung von 10 m (Abbildung 23) wird deutlich, dass gesamthaft selbst bei einer nicht der realen Verteilung entsprechenden Gleichverteilung über 94 % aller durch die GPS-Unsicherheit möglichen Positionen korrekt klassiert wären bzw. sind. Wird zusätzlich eine besser der Realität entsprechende Normalverteilung simuliert, erhöht sich dieser Wert auf fast 97 %. Die möglichen Lageungenauigkeiten der einzelnen Punkte wirken sich gesamthaft nur geringfügig auf die Klassierungsgenauigkeit aus. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein GPS-Pfad mit jener Verteilung klassiert wird, wie er es gemäss seinen Daten ist, ist also sehr hoch. Dies trotz Unsicherheiten infolge GPS-Positionsbestimmung.

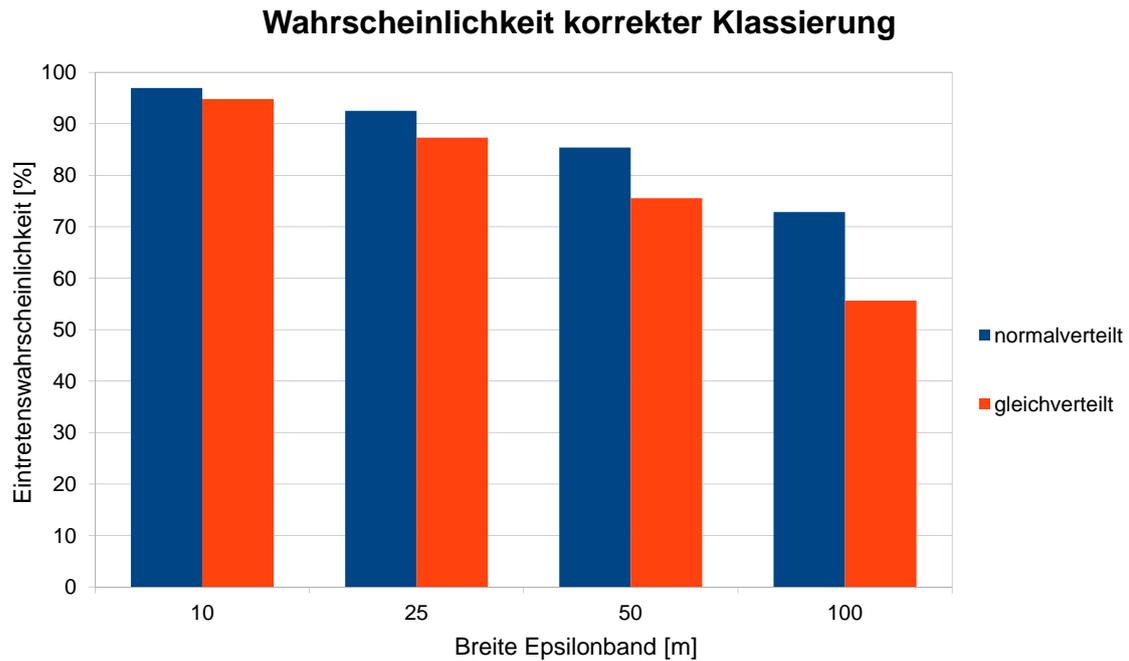


Abbildung 23 Vergleich der Wahrscheinlichkeiten korrekter Klassierung (eigene Abb.)

5.5.4 Analyse des Kontexts

Ein Überblick über die Erwartungswerte für die Auftretenswahrscheinlichkeit der Landbedeckungsklassen aus Vector25 (Abbildung 24) zeigen grosse prozentuale Abweichungen. Die Erwartungswerte des GPS-Pfads weichen in fünf von total zehn entlang der Route vorhandenen Klassen um über 25% von jenen der *Ground Truth* ab. Die Klassen Kiesgrube, See, Sumpf sowie Wald treten entlang des GPS-Pfads häufiger auf, hingegen hat die Klasse „BaumS“ (Baumschule) eine tiefere Auftretenswahrscheinlichkeit als in der *Ground Truth*.

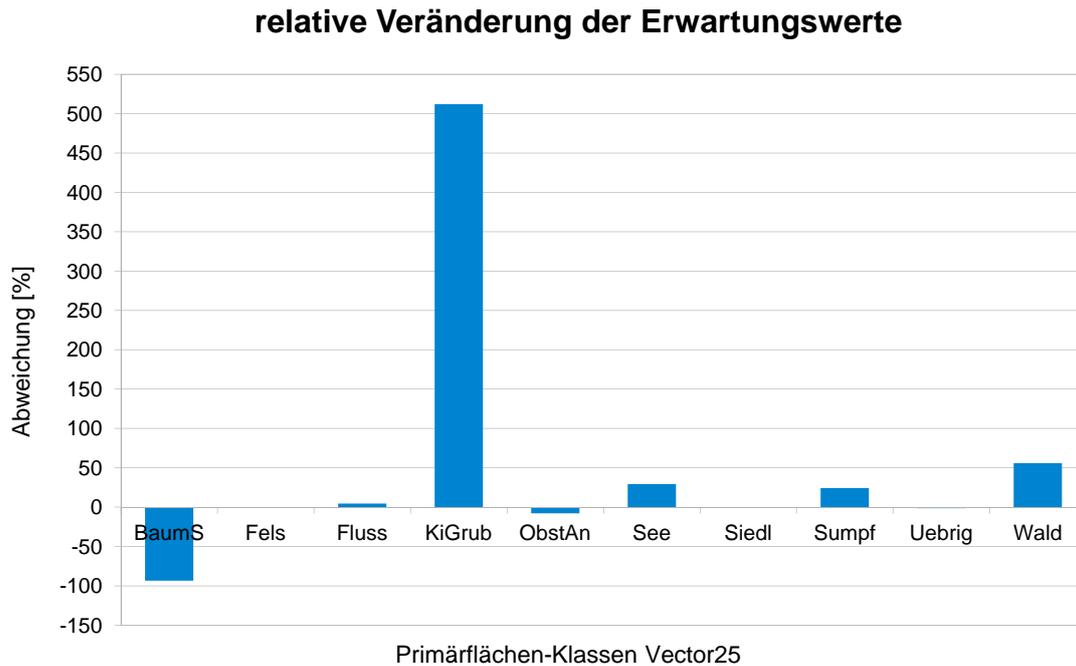


Abbildung 24 Abweichung der Auftretenswahrscheinlichkeit anhand von Vector25 (eigene Abb.)

Die über das gesamte Untersuchungsgebiet nur selten vorkommende Klasse „BaumS“ (Baumschule) wird gemäss den Erwartungswerten des GPS-Pfades um 93.3 % seltener durchquert als entlang der Ground Truth, also dem effektiv beschrittenen Weg. Das sich bewegende Objekt durchgeht die Klasse „Kiesgrube“ hingegen entsprechend der Erwartungswerte des GPS-Pfades um 500 % häufiger, als es in Wirklichkeit der Fall war. Beide Klassen sind jedoch nur von geringem Vorkommen. Die Klasse „Wald“ hingegen ist relativ häufig, zudem weist sie eine Abweichung von rund 55.8 % auf. Ein Zusammenhang zwischen der abweichenden Klassierung und den GPS-Unsicherheiten kann als sehr wahrscheinlich betrachtet werden. Dies bestätigt ein Blick auf die Karte bzw. die Metadaten der Bewegung. Nur ein sehr geringer Teil der Bewegung führte tatsächlich durch Wald hindurch. Viel häufiger waren Bewegungen entlang von Waldrändern, jedoch eindeutig ausserhalb des Waldes. In diesen Bereichen wurde die Klassierung des GPS-Pfades von der Beeinträchtigung des GPS-Signals durch die Vegetation mit grösster Wahrscheinlichkeit beeinträchtigt, die Bewegung also fälschlicherweise als „im Wald“ klassiert. Abbildung 25 veranschaulicht diesen Sachverhalt, die *Ground Truth* (blau) der Bewegung ist eindeutig ausserhalb des Waldes lokalisiert, die Fixes des GPS-Pfades hingegen werden innerhalb des Waldes positioniert. Dasselbe gilt für Pfadsegmente, die mit „See“ klassiert werden. Aufgrund der Erhebungsmethode der Daten mit dem Fahrrad und zu Fuss kann eine Bewegung innerhalb eines Gewässers per se ausgeschlossen werden. Da jedoch ein relativ grosser Teil der Erhebungsstrecke entlang des Zürichsees führte, muss diese falsche Klassierung aus den Unsicherheiten in den GPS-Daten hervorgehen. Die beiden Klassen „See“ und „Wald“ zeigen deutlich auf, in welchem Masse die Pfadklassierungen von der GPS-Unsicherheit abhängig sind.

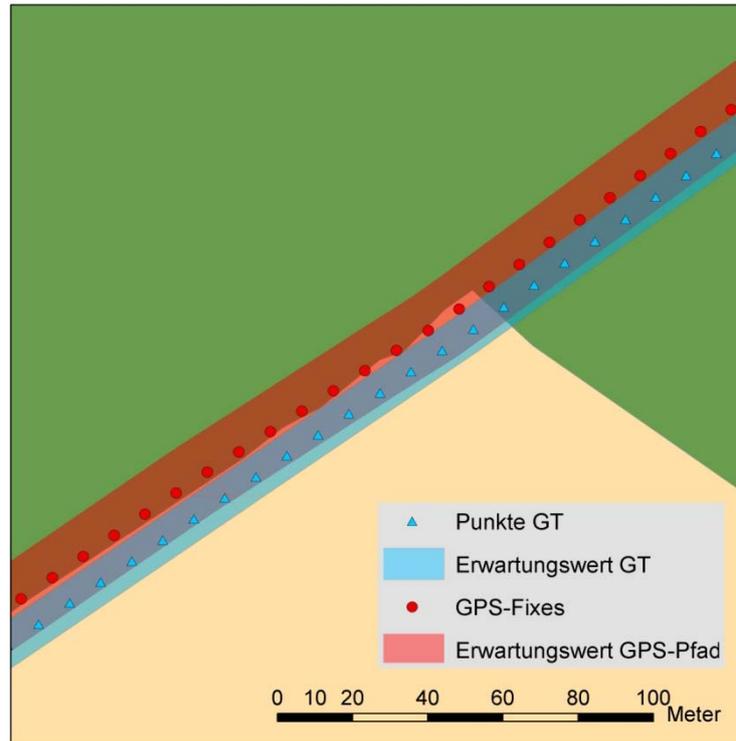


Abbildung 25 Bewegung entlang eines Waldrands (eigene Abb.)

5.6 Einschränkungen

Aussagen zu einem Zusammenhang zwischen den Resultaten und dem Kontext, also den mit den jeweiligen Landnutzungsklassen zusammenhängenden Umweltbedingungen aufgrund der Erhebungsart des Arealstatistik-Datensatzes, sind grundsätzlich nur unter Vorbehalt möglich. Arealstatistik wird mittels Stichprobenpunkten von jeweils 100 m Abstand in Nord- sowie in Ostrichtung erhoben. Die gemäss Zentralpunktmethodem erstellten Rasterzellen erhalten also jeweils für die gesamte Rasterzelle den Wert des sich dort befindenden Stichprobenpunkts. Eine Rasterzelle von 100 m * 100 m Auflösung kann somit theoretisch aus 9999 Quadratmeter Weideland bestehen, befindet sich jedoch am Stichprobenpunkt ein Obstbaum, so wird das gesamte Raster als Obstbaum-Raster klassiert. Theoretisch wäre es gar möglich, dass sich ein Objekt ausschliesslich auf asphaltierten Strassen bewegt, aber kein einziges Raster der Klasse „Strassen“ durchläuft.

Bei nicht flächenhaft auftretenden Phänomenen, wie beispielsweise Autobahngrün oder Hecken, kann davon ausgegangen werden, dass diese in Bezug auf den wirklichen Inhalt der Rasterzelle stark überrepräsentiert sind. Ein weiterer Grund für stark streuende Werte kann eine geringe räumliche Autokorrelation im Auftreten einer Landnutzungsklasse sein. In diesen Fällen folgen kaum mehrere Rasterzellen mit identischem Wert aufeinander, grössere zusammenhängende Flächen gleicher Klassierung sind dadurch selten. Ein Beispiel dafür wären Rasterzellen mit Landnutzungsklasse „Energieversorgungsanlagen“ oder Klassen wie „Autobahngrün“, die per Definition eher kleinräumig sind. Dies kann ebenfalls dazu führen,

dass Punktklassierungen in diesen Klassen sensibler auf einzelne abweichende Punkte reagieren als in zusammenhängenden, häufig vorkommenden Rasterwerten.

5.7 Zwischenfazit

Mit der Analyse der von Skupin und Miller entwickelten Methode konnte gezeigt werden, welche grundsätzlichen Mängel diese Methode aufweist. Zwar ist sie für grosse Datensätze, kleine Aufzeichnungsintervalle, tiefe Fortbewegungsgeschwindigkeiten und grob aufgelöste Landnutzungsraaster durchaus zur Berechnung von Aufenthaltszeiten innerhalb der einzelnen Klassen geeignet. Doch wenn sich die Rahmenbedingungen ändern, beispielsweise durch schnellere Fortbewegung oder geänderte Aufzeichnungsintervalle, offenbaren sich die Schwächen der Methode. Das kritische Mass ist dabei das Verhältnis der Rasterauflösung zur euklidischen Distanz zwischen aufeinanderfolgenden Punkten. Je kleiner dieses Verhältnis, desto geringer die Zuverlässigkeit der Methode. Da die euklidische Distanz zwischen Punkten auch infolge von durch GPS induzierter Unsicherheit verzerrt sein kann, liegt der Schluss nahe, dass die Point-in-Polygon-Methode sensibel auf Positionsunsicherheiten ihrer Inputdaten reagiert.

Die Analyse dieser Methode hinsichtlich ihrer Sensibilität gegenüber Unsicherheit von mit GPS erhobenen Daten zeigt, dass vor allem entlang von Landnutzungsklassen, die während der Datenerhebung typischerweise nicht durchquert wurden, sondern deren Grenzen gefolgt wurde, veränderte Auftretenswahrscheinlichkeiten auftreten. Dies lässt darauf schliessen, dass parallel zu Klassengrenzen verlaufende GPS-Pfade infolge der Unsicherheit vermehrt abweichend von ihrer *Ground Truth* klassiert werden. Grund dafür dürfte die Positionsungenauigkeit des GPS-Pfades sein. Dies kann dazu führen, dass ein Objekt, das sich auf einem Uferweg bewegt hat, sich gemäss GPS-Daten fälschlicherweise im Gewässer aufgehalten hat. Wie in Kapitel 4 aufgezeigt, verlaufen die GPS-Pfade in den meisten Fällen richtungstreu, das heisst, ihr Verlauf kommt – abgesehen von der seitlichen Abweichung – jenem der *Ground Truth* sehr nahe. Ein Bewegungspfad, der einer Klassengrenze folgt, wird somit mit grosser Wahrscheinlichkeit komplett mit der einen oder anderen Landnutzungs-klasse klassiert. Eine Klassierung in 50 % der einen und 50 % der anderen Klasse ist sehr wahrscheinlich.

Die Erwartung, dass vor allem die Klasse „Strasse und Wege“ (Klasse Nr. 17) von den Einflüssen der GPS-Unsicherheit betroffen ist, bestätigt sich im vorliegenden Beispiel nicht, obwohl sämtliche Datenerhebungskampagnen auf offiziellen Wegen durchgeführt wurden. Eine mögliche Ursache hierfür dürfte die Erhebungsmethode der zugrundeliegenden Daten sein. Wie in Kapitel 5.6 ausführlich besprochen, führt der Stichprobendatensatz Arealstatistik unter anderem dazu, dass einzelne Klassen stark unter-, andere überrepräsentiert sind, so auch die Klasse „Strassen und Wege“, die gemäss Erfassungskampagne der GPS-Pfade klar am häufigsten auftreten müsste. Doch diese Klasse kommt nur relativ selten vor, da Strassen verglichen mit der Rasterauflösung der Arealstatistik eine sehr geringe Breite aufweisen. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Stichprobenpunkt darauf zu liegen kommt, ist darum eher klein.

Zwar weicht die Analyse des Kontexts auf Basis des Primärflächen-Datensatzes Vector25 von der ursprünglichen Methode von Skupin und Miller ab. Doch zeigt sie auf, dass Kontextaussagen mithilfe eines randscharfen Vektordatensatzes verglichen mit dem relativ grob aufgelösten Arealstatistik-Rasterdatensatz, der die Resultate allein durch seine Erhebungsmethode bereits stark beeinflusst, von höherer Zuverlässigkeit sein dürften.

6 Trip-Segmentierung

Im Folgenden soll anhand einer eigenen Segmentierungsmethode aufgezeigt werden, wie GPS-Unsicherheiten die Segmentierung beeinflussen können.

6.1 Datenerhebung

Für diese Methode werden Daten von Lauftrainings verwendet, dies darum, weil die Intensität eines Laufes stärker von der Topographie bestimmt wird als beispielsweise Einheiten auf dem Fahrrad. Bei Letzterem haben Faktoren wie Wind, Strassenbeschaffenheit und Sitzposition einen zu gewichtigen Einfluss, als dass sich diese Pfade für eine sinnvolle Segmentierung nach ihrer Intensität eignen würden. Ein Läufer wird von Wind zwar ebenfalls gebremst bzw. beschleunigt, jedoch in weit geringerem Ausmass als ein Fahrradfahrer. Zudem bietet ein Läufer durch seine konstant gehaltene Körperposition gleichbleibenden Windwiderstand, was auf einem Fahrrad durch verschiedene Sitzpositionen bzw. Lenkerhaltungen nicht der Fall ist.

6.2 Methode

Zur Untersuchung des Unsicherheitseinflusses auf Segmentierungen von GPS-Pfaden wurde in einem ersten Schritt eine eigene Segmentierungsmethode entwickelt. Da sämtliche hierfür verwendeten Daten während Lauftrainingseinheiten erhoben wurden, wird versucht, die Pfade in Abhängigkeit der Topographie in Segmente gleicher Leistungsbereiche zu unterteilen. In der Literatur von Sportwissenschaftlern finden sich verschiedene Definitionen von *human locomotion*, also menschlicher Fortbewegung. Meist wird dabei unterschieden zwischen „walk“, „jog“ und „run“, teilweise noch erweitert durch „sprint“. In Tabelle 2 sind die Bereiche gemäss verschiedenen Autoren beschrieben:

Report	Geschwindigkeit (m/s)				
	Stand	Walk	Jog	Run	Sprint
Burgess et al. (2006)	NA	0.0	2.0	3.3	5.0
Di Salvo et al. (2007)	0.0	0.0	0.0	3.0	6.4
Impellizzeri et al. (2006)	0.0	0.7	2.1	3.3	6.0
Bangsbo et al. (1991)	0.0	0.8	1.9	2.8	6.7
Dogramaci et al. (2006)	0.0	0.5	2.0	4.0	6.0
Krustrup et al. (2002)	0.0	0.8	1.9	2.8	6.0
Mohr et al. (2003)	0.0	0.8	1.9	2.8	6.7
Dwyer & Gabbett (2012)	0.0	0.2	2.1	3.6	5.6

Tabelle 2 Geschwindigkeitsbereiche gemäss Dwyer und Gabbett (2012)

Da die Geschwindigkeit bei sämtlichen Erhebungsläufen mit wenigen Ausnahmen innerhalb des Bereichs „Run“ lag, wird dieser Bereich noch etwas spezifischer ausgeführt. Die persönlichen Trainingsbereiche des Autors eignen sich daher besser zur Segmentierung der erfassten GPS-Pfade als die Geschwindigkeitsbereiche aus Dwyer und Gabbett (2012).

Die Laufgeschwindigkeit wird im Folgenden gemäss Tabelle 3 in fünf Bereiche eingeteilt:

Modus	Langsames Joggen	Joggen	Laufen	Zügiges Laufen	Schnelles Laufen
Pace (^{min} / _{km})	6	5	4.5	4	3.5
Geschwindigkeit (^m / _s)	2.78	3.33	4.26	4.17	4.76
Höhenmeter / Std	714.29	857.14	952.38	1071.43	1224.49

Tabelle 3 Leistungsbereiche in Abhängigkeit von horizontaler und vertikaler Geschwindigkeit

In einem weiteren Schritt wird zusätzlich zur horizontalen Geschwindigkeit die Topographie miteinbezogen. Da die Laufgeschwindigkeit mit zunehmender Steigung des Untergrunds bei gleichbleibender Belastungsintensität abnimmt, wird für jeden Leistungsbereich die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Steilheit des Geländes berechnet. Als Basis hierfür dient eine aus dem Wandertourismus bekannte Faustregel, nach der in einer Stunde 4.2 flache Kilometer oder 300 Höhenmeter zurückgelegt werden. Für eine Strecke von 4.2 km mit 7.14 % Steigung (300 Höhenmeter) benötigt ein durchschnittlich trainierter Wanderer demnach rund zwei Stunden. Diese Faustregel wird nun auf die Leistungsbereiche in Tabelle 3 hochgerechnet. Folglich können im Bewegungsmodus „zügiges Laufen“ in zwei Stunden 15 Kilometer mit 1071 m Höhendifferenz zurückgelegt werden.

Die vertikale Unsicherheit innerhalb der GPS-Daten macht eine Nutzung in diesem Kontext sehr schwierig. Die Höhe über Meer wird bei jeder Positionsaufzeichnung neu erfasst. Hierbei sind jedoch Filter im Gegensatz zur horizontalen Bewegung schwierig zu implementieren, denn die Annahme einer möglichst gradlinigen Bewegung ist die Höhe betreffend nicht zulässig. Zwar ist die Unsicherheit in vertikaler Richtung mit rund 6 m (Kuter & Kuter, 2010) deutlich geringer als in horizontaler Richtung, nichtsdesto-trotz resultiert dies in sehr stark streuenden Höhenangaben. Die vorgestellte Segmentierungsmethode ist durch den Parameter Steigung stark von den einzelnen Höhenwerten abhängig, weshalb die z-Komponente der einzelnen Punkte im Folgenden aus dem digitalen Höhenmodell swissALTI^{3D} übernommen wird. Bei einer Implementierung mit Höhendaten, die mittels GPS bestimmt werden, wäre die Methode äusserst ungenau.

Für die fünf Leistungs- bzw. Trainingsbereiche soll nun die zurückgelegte Horizontalstrecke pro Zeiteinheit – in diesem Falle pro Sekunde – aus der Steigung berechnet werden. Für die Steigung in Prozent gilt folgende einfache Gleichung:

$$\text{slope} = \frac{\Delta h}{s} \times 100$$

Formel 3 Neigung

Dabei bezeichnet Δh den Höhenunterschied zwischen Anfangs- und Endpunkt der zurückgelegten Strecke (s).

Die in Abhängigkeit von Δh zurückgelegte Strecke lässt sich durch die Formel 4 berechnen.

$$s_{\text{horizontal}} = s_{\text{max}} \frac{(\Delta h_{\text{max}} - \Delta h)}{\Delta h_{\text{max}}}$$

Formel 4 horizontale Strecke in Abhängigkeit des Höhenunterschieds

Δh_{max} steht hier für die gemäss Faustregel (Tabelle 3) maximal mögliche Höhendifferenz in einer Leistungsklasse innerhalb einer Sekunde. Entsprechend ist s_{max} die maximal zurückzulegende horizontale Strecke in derselben Zeitspanne. Δh beschreibt die effektiv zurückgelegte Höhe innerhalb einer Sekunde. Auf diese Weise kann nun die innerhalb einer Sekunde zurückgelegte Horizontalstrecke unter Einbezug der absolvierten Höhe berechnet werden.

Durch Umformen ergibt sich schliesslich die Formel, mit deren Hilfe die horizontal zurückgelegte Distanz aus der Steigung in Prozent ermittelt werden kann:

$$s_{\text{horizontal}} = \frac{\text{slope} \times s_{\text{max}} \times \Delta h_{\text{max}}}{\text{slope} \times s_{\text{max}} + \Delta h_{\text{max}}}$$

Formel 5 horizontale Strecke in Abhängigkeit der Neigung

Im Folgenden werden aus sämtlichen GPS-Pfaden und deren *Ground Truth* neue zusätzliche Aufzeichnungsintervalle generiert, indem aus den sekundlich aufgezeichneten Positionsdaten eine Selektion vorgenommen wird. Auf diese Weise können nachträglich beinahe beliebige Intervalle simuliert werden. Für die nachfolgende Analyse werden Aufzeichnungsintervalle von einer, zwei und zehn Sekunden erzeugt, was pro aufgezeichnetem Pfad je zwei neue Pfade ergibt. Durch diese Aufzeichnungsintervalle ergeben sich zusätzlich zur Positionsunsicherheit der aufgezeichneten Punkte veränderte Segmentlängen, da die Abschnittslängen zwischen den erfassten Punkten jeweils mittels euklidischer Distanz angegeben werden. Verglichen mit dem Originalpfad erfahren die Abschnitte mit wachsendem Aufzeichnungsintervall somit eine zunehmende Verkürzung, was sich wiederum auf die Ergebnisse der Steigungsberechnung auswirkt. Um diesen Effekt auszublenden, werden nicht die echten *Ground-Truth*-Pfade verwendet, sondern zwischen *Ground-Truth*-Punkten ebenfalls die jeweils direktesten Verbindungen betrachtet. Somit bleibt der Fokus auf dem Einfluss der Positionsunsicherheit der aufgezeichneten Punkte.

Für die Strecke (s) zwischen zwei aufeinanderfolgenden Punkten wird jeweils deren Länge sowie deren Steigung berechnet.

$$s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

Formel 6 euklidische Distanz zwischen zwei Punkten

Für die auf diese Weise berechneten Abschnitte kann in einem nächsten Schritt berechnet werden, welcher Leistungsklasse sie angehören. Hierfür werden die Steigungen in Klassen zu je 2% eingeteilt, anschliessend wird für jeden Abschnitt unter Einbezug von dessen Länge die Leistungsklasse ermittelt. Es können einerseits die Abschnitte jeweils mit ihrer *Ground-Truth*-Entsprechung paarweise verglichen werden, andererseits aus den Abschnitten Segmente identischer Leistungsklassen gebildet werden. Um allfällige Einflüsse, die sich aus der Segmentierungsmethode ergeben, gesondert identifizieren zu können, werden die Analysen an drei charakteristischen GPS-Pfaden durchgeführt. Diese werden im Folgenden als Track 1, Track 2 und Track 3 bezeichnet (Abbildung 26).

Abbildung 26 Charakterisierung der Pfade (eigene Abb.)

Da die Leistung beim Bergablaufen nicht allein von der Geschwindigkeit und der Neigung abhängt, sondern hier weitere Faktoren eine Rolle spielen, werden Abstiegs-Faustregeln nicht auf die Leistungsbereiche umgerechnet. Es werden daher im Folgenden nur ansteigende bzw. flache Pfadabschnitte in Leistungsbereiche eingeteilt. Bergabpassagen werden als eine generalisierte Segmentklasse betrachtet.

6.3 Technische Ausführung

Die Methode wird mithilfe von ArcGIS 10.0 sowie des Tabellenkalkulationsprogramms in OpenOffice von Apache durchgeführt. Nach erfolgtem Import der Grundlagendaten (GPS-Pfade, Vector25-Datensatz, swissALTI^{3D} -DHM) wird in einer ersten Phase die *Ground Truth* erstellt.

Die Original-Punkte des GPS-Pfades werden anschliessend kopiert. Die so erzeugten Duplikate können mittels des Tools *Snap* unter Eingabe eines maximalen Verschiebungswertes auf die zuvor erzeugte Linie der *Ground Truth* übertragen werden. Dies entspricht dem in Kapitel 2.1.2 erwähnten einfachen *Map Matching*. Die *Ground Truth* erhält auf diese Weise ihre „eigenen“ Wegpunkte, deren Anzahl mit jener der Original-Punkte identisch ist.

Es folgt die Aufteilung der GPS-Pfade sowie deren *Ground Truth* in einzelne Abschnitte zwischen aufeinanderfolgenden Punkten. Durch das Tool *split line at points* können Linien jeweils an Punkten eines Eingabepunktensatzes aufgesplittet werden.

Das Tool *Interpolate Shape* ermöglicht es, aus einem einfachen zweidimensionalen *Line Feature* eine 3D-Linie zu generieren. Hierfür wird ein Oberflächendatensatz benötigt, im vorliegenden Falle ist dies das DHM swissALTI^{3D}.

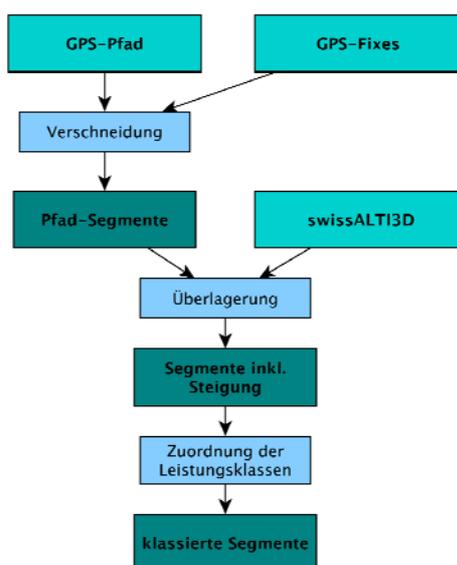


Abbildung 27 Klassierung der Segmente nach ihrer Leistungsklasse (eigene Abb.)

Die 2D-Linie wird auf die dreidimensionale Oberfläche eingepasst, wodurch eine dreidimensionale Linie entsteht. Durch *add z-Information* kann eine Anzahl von höhen-spezifischen Informationen eingefügt werden, unter anderem die durchschnittliche Neigung (*avg slope*) eines Abschnitts. Dadurch wird für jedes Linien-Segment ein Attribut mit der durchschnittlichen Neigung in Prozent erzeugt. Um festzustellen, welche Abschnitte bergauf bzw. bergab führen, wird die Höhe jedes Wegpunktes mit dem darauffolgenden Wegpunkt verglichen. Ein negativer Wert entspricht einem Gefälle, ein positiver einer Steigung. Die einzelnen Abschnitte werden mittels eines Index in -1 (bergab) bzw. +1 (bergauf) klassiert.

Für jede *Line Feature Class* wird die zugehörige Attributtabelle exportiert und in OpenOffice weiterverwendet. Hier wird aus den Attributen „Segmentlänge“ und „Steigung“ für jedes Segment die Zugehörigkeit zu einer Leistungsklasse für sämtliche drei Intervalle berechnet. Der zuvor erzeugte Index dient hier zur Ausscheidung von Bergabpassagen, welche als eine einzige neigungsunabhängige Klasse behandelt werden. Die auf diese Weise manipulierte Attributtabelle wird anschliessend wieder in ArcGIS importiert. Nun können die Klassenzugehörigkeiten der einzelnen Segmente visualisiert werden. Abschliessend wird für jeden Abschnitt eines GPS-Pfades analysiert, wie weit seine Klassierung von jener seiner

Ground-Truth-Entsprechung abweicht. Dieser paarweise Vergleich wird dadurch erweitert, dass die Abweichung der einzelnen Abschnitte entsprechend ihrer Ausprägung klassiert wird. Dies zeigt, wie stark die Abweichung tatsächlich ist.

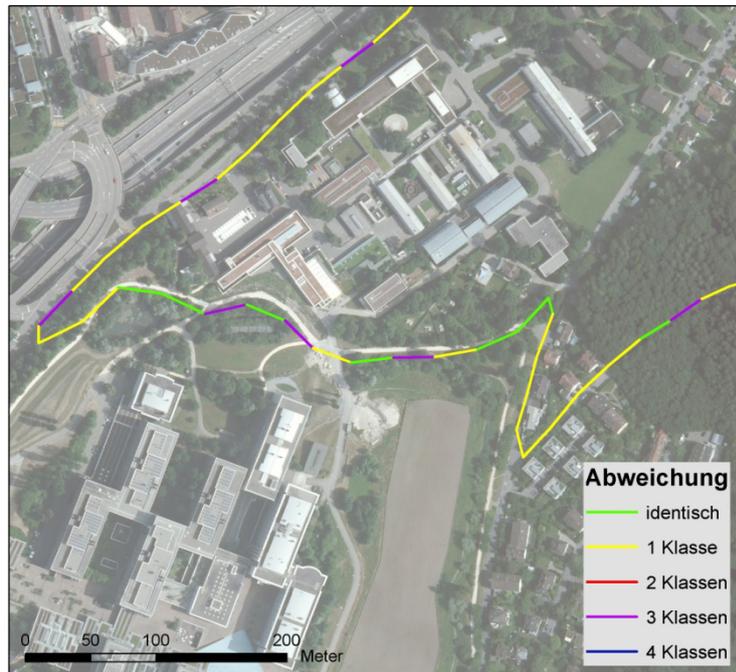


Abbildung 28 Im Vergleich zur Ground Truth abweichend klassierte Segmente (eigene Abb.)

6.4 Resultate

6.4.1 Verkürzung von Segmenten und Pfaden

Die Analyse der Segmenteinteilung in steigungsabhängige Leistungsklassen ergibt teils grosse Unterschiede zwischen den Ergebnissen verschiedener Aufzeichnungsintervalle. Es fällt auf, dass die Länge der Segmente und damit auch die Gesamtlänge des Pfades mit der Vergrösserung des Intervalls eine zunehmende Verkürzung erfährt. Dies ist nicht weiter verwunderlich, wird doch die euklidische Distanz zwischen aufeinanderfolgenden Punkten berechnet. Sobald die Richtung eines einzelnen Segments von derjenigen der vorhergehenden Segmente abweicht, der Pfad also eine Kurve beschreibt, wird durch ein vergrössertes Intervall eine Verkürzung der direkten Verbindungslinie bewirkt. In Tabelle 4 wird dieser Sachverhalt deutlich. Die Länge sämtlicher Pfade nimmt bei zunehmendem Intervall ab. Dies trifft in gleichem Masse für die GPS-Pfade wie auch für die *Ground-Truth*-Pfade zu. Beide unterliegen derselben Gesetzmässigkeit.

Leistungsklasse	Intervall 1 sec			Intervall 2 sec			Intervall 10 sec			
	GPS-Pfad	Abweichung	Ground Truth	GPS-Pfad	Abweichung	Ground Truth	GPS-Pfad	Abweichung	Ground Truth	
Track 1	bergab	3124.99	-4.9	2978.16	3090.61	-17.5	2630.25	2801.23	-20.7	2319.93
	L. Joggen	316.52	21.5	403.01	307.36	39.1	504.69	642.76	2.5	659.06
	Joggen	261.98	34.3	398.45	260.32	38.2	421.54	307.87	-26.3	243.67
	Laufen	294.12	22.5	379.36	286.83	34.5	438.14	542.46	25.6	729.46
	Z. Laufen	597.22	17.2	721.68	581.57	19.7	724.13	550.09	29.8	783.94
	S. Laufen	1814.06	-19.3	1478.21	1684.47	-15.3	1461.06	1223.04	2.9	1259.21
	Gesamtlänge	6408.91	-0.1	6358.89	6211.16	-0.5	6179.80	6067.45	-1.2	5995.27
Track 2	bergab	4612.49	-0.3	4598.23	4547.36	-0.6	4520.87	4377.09	-6.0	4130.73
	L. Joggen	209.132	5.7	221.72	211.51	14.5	247.51	199.12	-13.2	175.92
	Joggen	204.68	4.3	213.94	209.22	-7.3	195.07	138.28	-3.4	133.71
	Laufen	319.67	5.1	336.98	329.54	-4.5	315.36	428.51	-9.6	391.09
	Z. Laufen	316.54	11.8	358.72	347.19	13.1	399.33	540.48	-8.4	498.63
	S. Laufen	1719.93	-6.3	1618.33	1374.4	-6.9	1285.43	1086.35	17.2	1312.47
	Gesamtlänge	7382.46	-0.5	7347.92	7019.18	-0.8	6963.55	6769.84	-1.9	6642.54
Track 3	bergab	7904.62	0.0	7901.99	7825.64	-0.2	7810.05	7786.337	-0.2	7774.65
	L. Joggen	1264.74	-7.0	1182.32	978.49	19.2	1211.06	1233.464	4.3	1288.75
	Joggen	1226.27	4.9	1290.08	1397.26	-1.9	1370.89	1711.759	16.1	2039.33
	Laufen	1387.66	1.8	1412.92	1374.89	-1.5	1354.74	1284.657	4.5	1345.59
	Z. Laufen	1173.03	-8.8	1078.21	1269.66	-13.8	1115.72	1335.325	-24.8	1070.20
	S. Laufen	2055.10	3.1	2120.75	2020.17	-2.2	1975.83	1314.893	-18.9	1105.68
	Gesamtlänge	15011.42	-0.2	14986.26	14866.10	-0.2	14838.29	14666.435	-0.3	14624.21

Tabelle 4 Längen aller identisch klassierten Abschnitte pro Leistungsklasse

6.4.2 Einfluss des Aufzeichnungsintervalls

Es werden nun die GPS-Pfade der Intervalle von zwei Sekunden bzw. zehn Sekunden jeweils mit dem Intervall von einer Sekunde verglichen. Daraus wird der Einfluss des Aufzeichnungsintervalls auf die Resultate ersichtlich (Abbildung 29). Vergleicht man die Längenabweichung der identisch klassierten Segmente der einzelnen Intervalle, zeigen sich zwei deutliche Tendenzen: Einerseits bestehen bei allen drei Untersuchungspfaden sehr geringe Differenzen zwischen den Intervallen von einer und zwei Sekunden. Einzig bei Track 3 weicht die Gesamtlänge der Leistungsklasse „Langsames Joggen“ im Intervall von zwei Sekunden merklich ab. Andererseits unterscheiden sich die Längen der Leistungsklassen-segmente des Intervalls von zehn Sekunden sehr deutlich von jenen des Intervalls von einer Sekunde. Diese Tendenz besteht bei allen drei Untersuchungspfaden. Die Abweichung der Gesamtsegmentlänge der Leistungsklasse „Schnelles Laufen“ ist sowohl im Intervall von zwei als auch in jenem von zehn Sekunden negativ. Es werden also wesentlich mehr Segmente des Intervalls von einer Sekunde in dieser Leistungsklasse eingeordnet als bei den beiden übrigen Intervallen. Die kleinsten Unterschiede treten bei der Einteilung der Segmente „bergab“ auf, hier weicht einzig der Pfad „wellig“ des Intervalls von zehn Sekunden merklich ab.

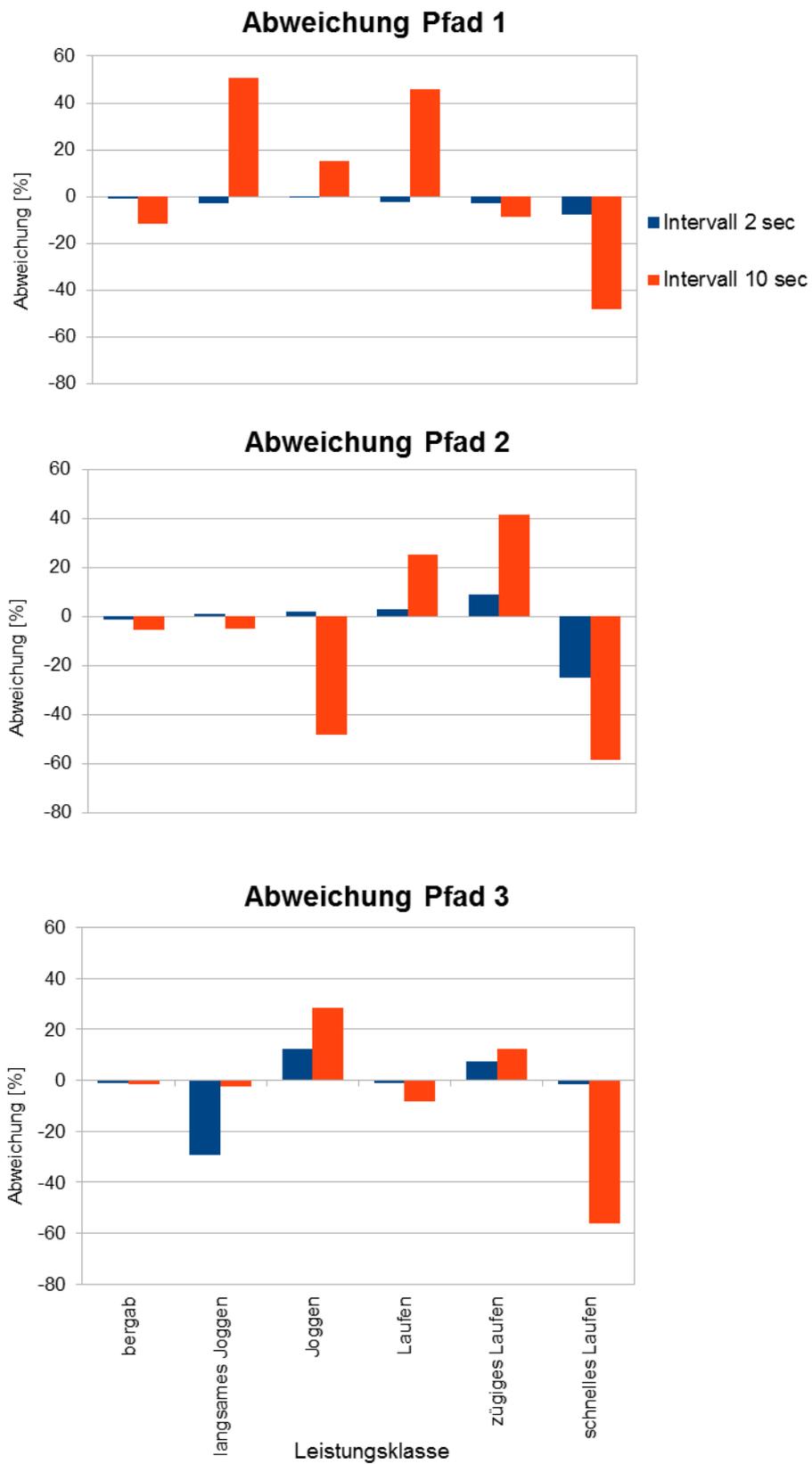


Abbildung 29 Längenabweichung vom Intervall 1 sec (eigene Abb.)

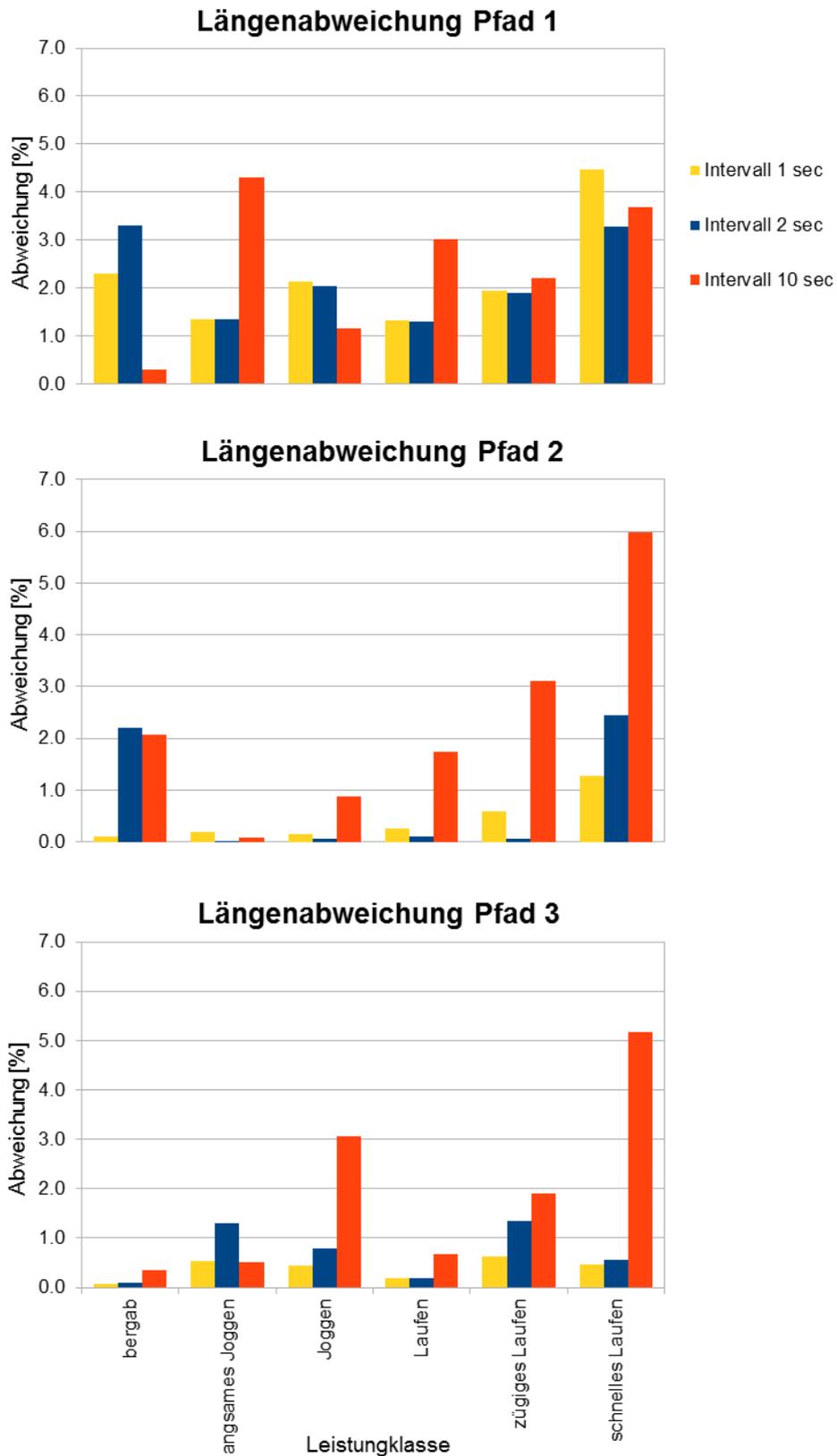


Abbildung 30 Längenabweichung der aufgezeichneten Pfade der Ground Truth 1 sec (eigene Abb.)

Die Resultate aus Abbildung 30 vergleichen die Resultate der verschiedenen Aufzeichnungsintervalle mit der *Ground Truth* des kleinsten Intervalls, jenem von einer Sekunde. Die

Ergebnisse dieses Vergleichs zeigen primär, welchen Einfluss die Wahl des Intervalls auf die Segmentierungsmethode hat. Der Vergleich der einzelnen GPS-Pfade mit der realen *Ground Truth* der Fortbewegung, also nicht der jeweiligen *Ground-Truth*-Entsprechung, sondern der echten *Ground Truth* (bzw. deren kleinster Auflösung von einer Sekunde), verdeutlicht, wie sich die Verteilung der Leistungsklassen an der Gesamtpfadlänge bei unterschiedlichen Intervallen verändert.

Während beim eher flachen Track 3 sowie dem coupierten Track 2 die Abweichung mit grösserem Aufzeichnungsintervall ansteigt, sind zwischen den Resultaten der Intervalle von einer bzw. zwei Sekunden kaum Unterschiede auszumachen. Im Falle von Track 1 hingegen treten durch alle drei Intervalle grössere Abweichungen auf. Auffällig hierbei ist, dass im Gegensatz zu den beiden anderen Pfaden jener mit einem Intervall von zehn Sekunden nur in den Leistungsklassen „Langsames Joggen“ und „Laufen“ stärker abweicht.

6.4.3 Verteilung der Leistungsklassen

Wie bereits aus Tabelle 4 hervorgeht, bestehen teils grosse Unterschiede in der Länge identisch klassierter Segmente zwischen *Ground Truth* und GPS-Pfad. Diese reichen von 0.2 % bis 39.1 %. Bei diesem Extremwert, der bei der Aufzeichnung von Track 1 mit einem Intervall von zwei Sekunden auftritt, werden 307.359 m des GPS-Pfades der Leistungsklasse „Zügiges Laufen“ zugewiesen, zu der jedoch ganze 504.688 m des *Ground Truth* Pfades gezählt werden. Für Track 2 und Track 3 treten allgemein kleinere Abweichungen auf, hier bewegen sich die Unterschiede nur in wenigen Fällen im zweistelligen Prozentbereich.

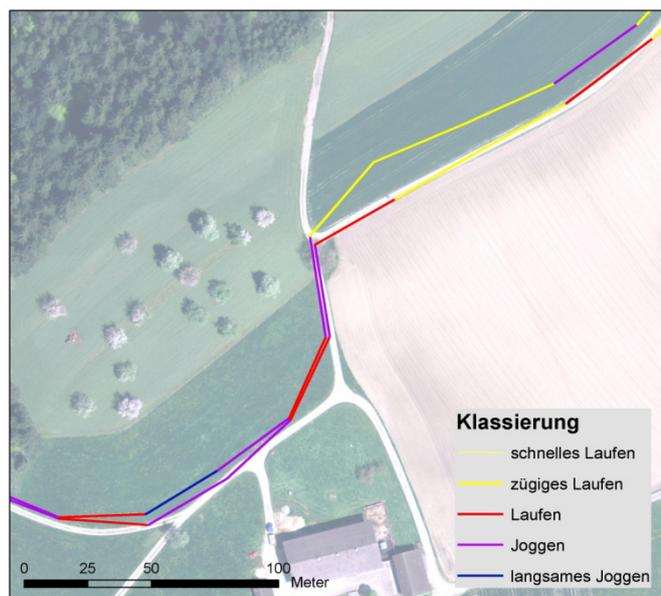


Abbildung 31 Klassierung der Segmente gemäss GPS-Track und Ground Truth (eigene Abb.)

Die Verteilung der einzelnen Leistungsklassen entlang der analysierten Strecken verdeutlicht, dass sich die Abweichungen zwischen den GPS-Pfaden der einzelnen Untersuchungspfade und ihrer jeweiligen *Ground-Truth*-Entsprechung auf relativ tiefem Niveau bewegen. In Abbildung 32-34 werden die Anteile der Leistungsklassen an der Gesamtlänge der verschiedenen Pfade in Prozent der Gesamtlänge dargestellt. Unterschiede, die auf der zuvor beschriebenen Verkürzung beruhen, entfallen. Im Falle von Track 2 unterscheiden sich die Verteilungen der Segmente des GPS-Pfades und der *Ground-Truth*-Pfade bei sämtlichen Aufzeichnungsintervallen kaum, zeigen jedoch bei grösserem Intervall leichte Tendenz zu einem erhöhten Anteil der Leistungsklassen „Zügiges Laufen“ und „Laufen“. Der Anteil an Bergabpassagen beträgt in sämtlichen Pfaden rund 60 %, während 16 % bis 22 %

gemäss der höchsten Leistungsklasse „Schnelles Laufen“ klassiert sind, welche bei kleinen Aufzeichnungsintervallen leicht stärker vertreten ist.

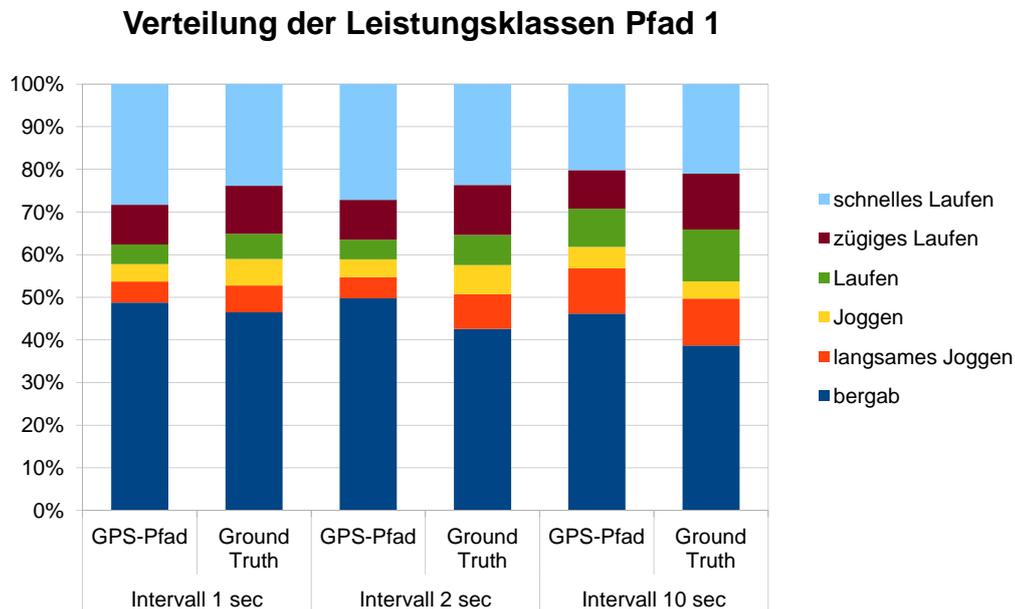


Abbildung 32 Anteil der Leistungsklassen an der Gesamtlänge von Track 1 (eigene Abb.)

Die Untersuchungspfade Track 3 (Abbildung 34) und Track 1 (Abbildung 32) zeigen einen ähnlichen Sachverhalt. Im Falle des flachen Pfades von Track 3 unterscheiden sich die GPS-Pfade weit geringer von denjenigen der *Ground-Truth*-Entsprechung. Die maximale Abweichung beträgt hier 24.8 %, bei Track 1 sind es 39.1 %. Auffällig hierbei ist vor allem die sehr geringe Streuung innerhalb der einzelnen Pfade der flachen Untersuchungsstrecke von Track 3. Die Verteilung ist hier äusserst homogen mit jeweils rund 50 % Bergabanteil. Wiederum werden bei kleinen Intervallen eine grössere Anzahl von Segmenten mit der Leistungsklasse „Schnelles Laufen“ klassiert.

Verteilung der Leistungsklassen Pfad 2

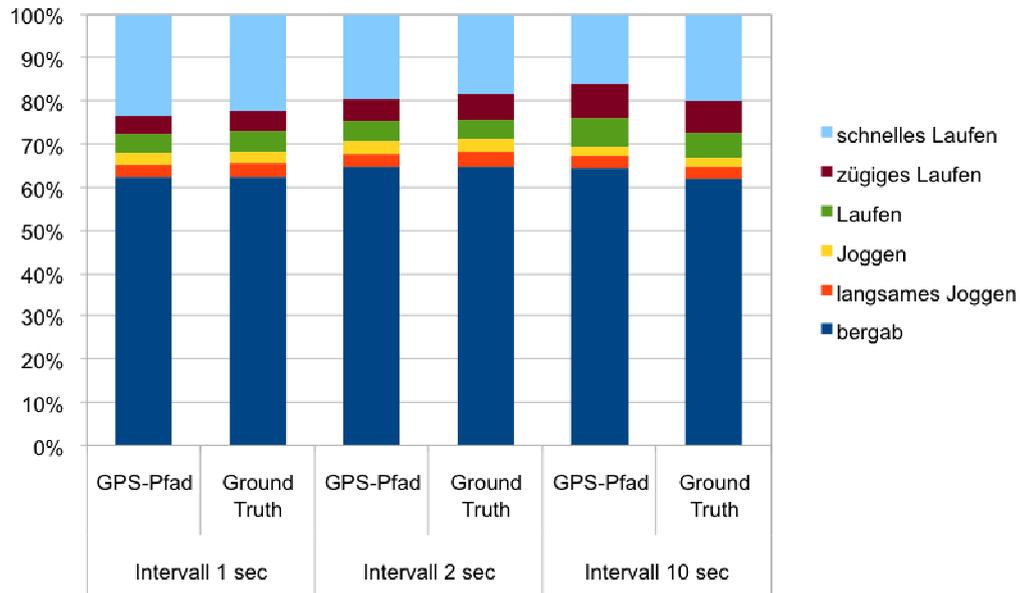


Abbildung 33 Anteil der Leistungsklassen an der Gesamtlänge von Track 2 (eigene Abb.)

Die Segmentierung von Track 1 zeigt ein interessantes Muster: Bei sämtlichen Aufzeichnungsintervallen sind die einzelnen Leistungsklassen stärker vertreten als bei der jeweiligen *Ground Truth*. Die Bergabanteile bewegen sich zwischen 38 % und 48 %, während die Leistungsklasse „Schnelles Laufen“ wiederum dem grössten Anteil entspricht, erneut mit tendenziell höherem Anteil bei Pfaden kurzer Intervalle. Für die Intervalle von zwei oder weniger Sekunden zeigen sich sowohl zwischen den GPS-Pfaden wie auch zwischen den beiden *Ground-Truth*-Pfaden kaum Unterschiede. Dies bestätigt auch Tabelle 4 (Seite 58), welche die Gesamtlängen der Segmente wiedergibt. Die Resultate des GPS-Pfades und der *Ground Truth* im Intervall zehn Sekunden weichen hingegen deutlicher von jenen der anderen Intervalle ab.

Verteilung der Leistungsklassen Pfad 3

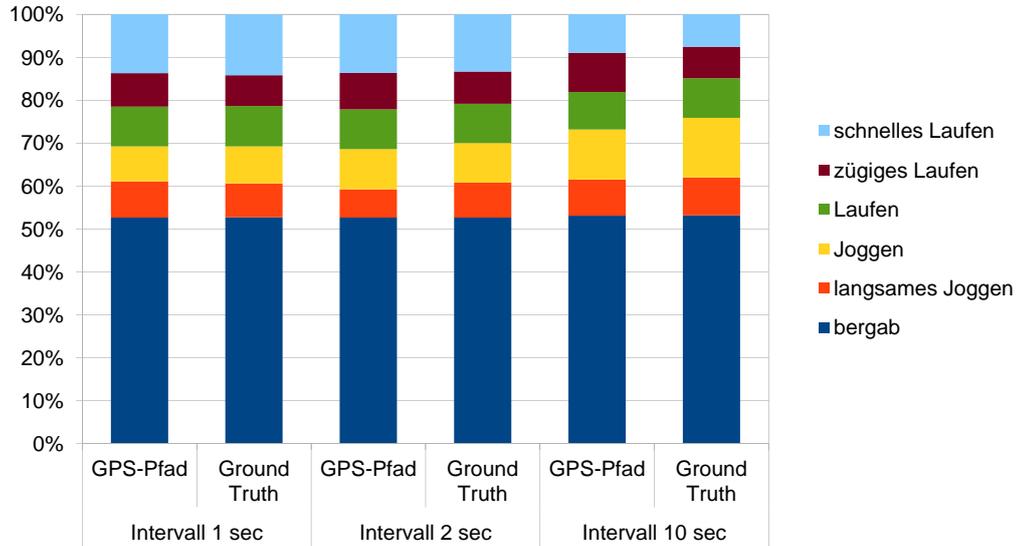


Abbildung 34 Anteil der Leistungsklassen an der Gesamtlänge von Track 3 (eigene Abb.)

6.4.4 Einfluss der GPS-Unsicherheit

Die bisherigen Resultate zeigen noch relativ bescheidene Abweichungen der GPS-Pfade von ihrer jeweiligen *Ground-Truth*-Entsprechung. In einem nächsten Schritt wird darum ein paarweiser Vergleich der einzelnen Pfadabschnitte vorgenommen und analysiert. Hierbei werden die Teilstrecken zwischen aufeinanderfolgenden GPS-Punkten betrachtet. Für diese wurden zuvor ihre Zugehörigkeiten zu einer der steigungsabhängigen Leistungsklassen berechnet. Abbildung 35 zeigt die Resultate dieser Analyse unterteilt nach Aufzeichnungsintervall und Charakteristik des Untersuchungspfades:

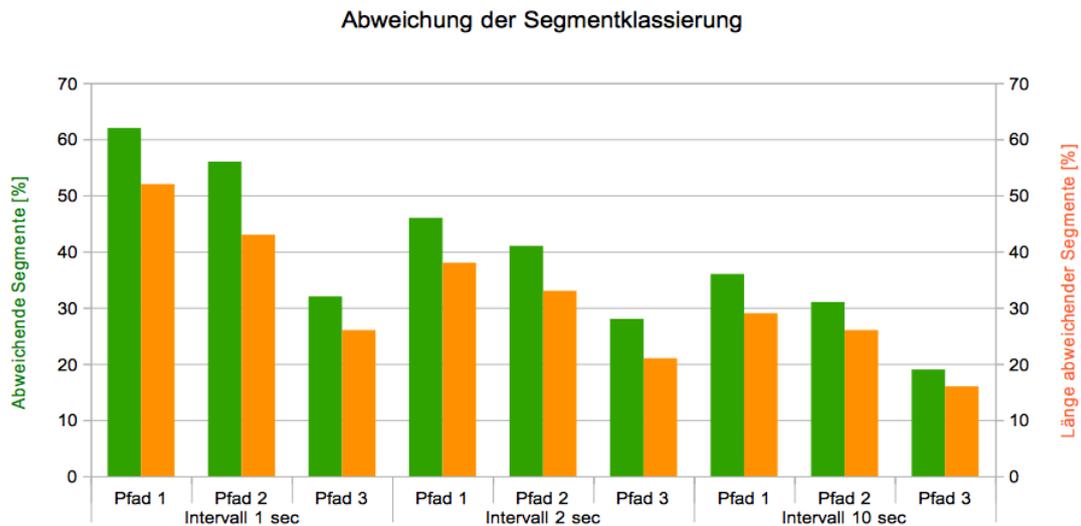


Abbildung 35 Anteil abweichend klassierter Segmente an jeweiligen GPS-Pfaden (eigene Abb.)

Es sind mehrere Muster zu erkennen. Je grösser das Aufzeichnungsintervall, desto geringer fällt die Anzahl abweichend klassierter Teilstrecken verglichen mit der jeweiligen *Ground-Truth*-Entsprechung aus. Im Fall von Track 2 unterscheiden sich von den mit einem Intervall von zehn Sekunden aufgezeichneten Teilstrecken nur gerade 8 % hinsichtlich ihrer Leistungsklassenzugehörigkeit. Beim welligen Track 1 sind es bereits deren 16 %, die nicht identisch klassiert sind. Wird das Aufzeichnungsintervall nun verkleinert, steigt der Prozentsatz abweichend klassierter Abschnitte deutlich an. Die allgemeine Verteilung bleibt jedoch bestehen. Stets treten die grössten Abweichungen entlang des welligen Untersuchungspfades Track 1 auf. Am wenigsten weichen die Teilstrecken von Track 3 in ihrer Klassierung ab. Bei in einem Intervall von einer Sekunde erfassten Abschnitten werden 28-42 % Abweichung erreicht. Ein noch immer sehr grosser Anteil von Segmenten wird in diesen Fällen abweichend von seiner *Ground Truth* klassiert.

6.5 Interpretation

6.5.1 Einfluss des Aufzeichnungsintervalls

Die aufgezeigten prozentualen Veränderungen der Längen identisch klassierter Segmente in Abbildung 29 zeigen auf, welche Leistungsklassen im einen oder anderen Pfad mehr oder weniger stark vertreten sind. Die dabei aufgetretenen Abweichungen zwischen den Intervallen von zwei und zehn Sekunden und dem Original-GPS-Pfad sind beträchtlich. Am auffälligsten ist die grosse Abweichung in der Gesamtsegmentlänge der Leistungsklasse „Schnelles Laufen“, die in allen drei Untersuchungspfaden auszumachen ist. Doch auch zwischen dem GPS-Pfad mit Intervall zwei Sekunden und dem Originalpfad bestehen innerhalb dieser Leistungsklasse in allen vorliegenden Fällen negative Abweichungen. Die Ursache dafür dürfte bei beiden Intervallen in der Erfassungsmethode zu finden sein. Infolge eines grösseren Aufzeichnungsintervalls nimmt selbstverständlich auch die euklidische Distanz zwischen aufeinanderfolgenden GPS-Punkten zu. Die gesamten Pfade erfahren eine Verkürzung, da sie bei grösserem Intervall zunehmend begradigt werden. Kurven werden sozusagen „abgekürzt“.

Dieser Effekt wirkt sich nicht nur auf die horizontale Form der Pfade aus, auch ihre Höhenprofile werden dadurch verändert. Gerade bei einem hoch aufgelösten Höhenmodell wie dem verwendeten swissALTI^{3D} mit seinen 2 m Zellengrösse hat ein grösseres Intervall zur Folge, dass die Höhenprofile der Pfade eine Glättung erfahren. Kleinräumige Geländestrukturen wie Böschungen oder Gräben werden geglättet und sind in einem Höhenprofil mit Aufzeichnungsintervall zehn Sekunden kaum mehr erkennbar, während sie sich bei einem solchen von einer Sekunde noch deutlich widerspiegeln. Je höher dabei die Fortbewegungsgeschwindigkeit und somit die euklidische Distanz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Wegpunkten, desto ausgeprägter tritt dieser glättende Effekt auf. Dies ist eine mögliche Erklärung für die bei allen Untersuchungspfaden erkennbare negative Abweichung der Längen identisch klassierter Segmente in der Leistungsklasse „Schnelles Laufen“. Da es sich dabei um die schnellste Leistungsklasse handelt, betragen die Abstände von einem Punkt

zum nächsten bis zu 50 m, was unweigerlich zu einer starken Glättung insbesondere der Höhenprofile führt.

Besonders beim welligen Untersuchungspfad sind auch in den Klassen „Laufen“ und „Langsames Joggen“ ähnlich grosse Veränderungen in der Gesamtsegmentlänge zu erkennen. Auch diese dürften auf den Glättungseffekt grösserer Intervalle zurückzuführen sein. Da davon ausgegangen werden kann, dass die Fortbewegungsgeschwindigkeit entlang der Untersuchungspfade unabhängig vom Aufzeichnungsintervall ist, ist der Glättungseffekt infolge veränderten Intervalls in sämtlichen Leistungsklassen ähnlich ausgeprägt.

Diese Erkenntnisse legen nahe, dass die grossen negativen Unterschiede innerhalb der Leistungsklasse „Schnelles Laufen“ primär auf die Segmentierungsmethode selbst zurückzuführen sind. Durch diese wird die Klasse „Schnelles Laufen“ in den meisten Untersuchungspfaden gegenüber den anderen Klassen stark überrepräsentiert. Dies nicht etwa, weil sich das bewegende Objekt stets in diesem sehr intensiven Bereich bewegt hat. Vielmehr fliesst die Höhendifferenz zu stark in die Gewichtung der Leistungsklassen ein. Bei zunehmender Geländeneigung besteht die Tendenz, ohne Intensitätssteigerung in eine gemäss Methode höhere Leistungsklasse zu gelangen. Besonders in steilem Gelände sind daher überproportional viele Segmente mit der Klasse „Schnelles Laufen“ klassiert. Dies erklärt auch den hohen Anteil dieser Leistungsklasse in den Verteilungen gemäss Abbildung 32-34. Entlang von Track 3 sind die Leistungsklassen hingegen relativ homogen verteilt, die Abweichungen daher entsprechend geringer. Der Pfad verläuft grösstenteils gradlinig, es treten kaum harte Richtungsänderungen auf. Der verkürzende Effekt infolge vergrösserten Aufzeichnungsintervalls ist hier daher weniger ausgeprägt wirksam. Dies wird auch in Tabelle 4 bestätigt.

Die Rolle des Aufzeichnungsintervalls zeigt auch Abbildung 30. Vor allem bei Track 2 und Track 3, die sich beide in relativ offenem Gelände befinden, steigt mit zunehmendem Aufzeichnungsintervall auch die Abweichung vom tatsächlichen Bewegungspfad. Dies bestätigt die bereits in Tabelle 4 gemachten Beobachtungen. Hier zeigt sich nun ein zusätzlicher Einflussfaktor, der im Falle des welligen Tracks 1, der zu einem grossen Teil durch Wald führt, in Abweichungen resultiert, die keine Abhängigkeit vom Aufzeichnungsintervall zeigen. Die erfassten Intervalle dieses Pfads zeigen in sämtlichen Intervallen verhältnismässig hohe Abweichungen der klassierten Abschnittslängen von der *Ground Truth*. Es liegt der Schluss nahe, dass dies auf den Einfluss der Unsicherheit der Positionsbestimmung durch GPS zurückzuführen ist. Darauf deuten vor allem die Abweichungen der Intervalle von einer bzw. zwei Sekunden. Beim grössten Intervall zeigt sich auch hier der bereits zuvor beschriebene ausgleichende Effekt, der trotz des vermutlich grösseren Positionsfehlers keine merklich grössere Abweichung zeigt als bei den beiden anderen Pfaden.

6.5.2 Verteilung der Leistungsklassen

Wie schon zuvor ausgeführt, zeigen sich zwischen den drei Untersuchungspfaden teils grosse Unterschiede im Vorkommen der einzelnen Leistungsklassen. Die Klasse „bergab“ nimmt je nach Beschaffenheit des Geländes 38-64 % aller Segmente ein. Die übrigen 34 bis

60 % teilen sich die verbleibenden fünf Klassen auf. Im Falle der Tracks 1 und 2 ist dabei die Leistungsklasse „Schnelles Laufen“ weit stärker vertreten als Track 3. Auch diese Verteilungen lassen sich mit grosser Wahrscheinlichkeit auf die Segmentierungsmethode zurückführen. In ansteigendem Gelände werden Segmente relativ rasch einer höheren Leistungsklasse zugeordnet, selbst wenn die Intensität nicht wirklich zugenommen hat. Dies hat zur Folge, dass der Anteil der Klassen „Zügiges Laufen“ bis „Langsames Joggen“ bei stärker coupiertem Gelände rasant abnimmt, wie dies in den Abbildung 32-34 deutlich ersichtlich ist. Je steiler demnach das Gelände wird, desto mehr Segmente werden als der Leistungsklasse „Schnelles Laufen“ zugehörig klassiert. Der zuvor beschriebene glättende Faktor des vergrösserten Intervalls zeigt auch hier seine Wirkung. Der flache Pfad von Track 3 zeigt eine sehr homogene Verteilung über alle drei Intervalle. Dies ist auf den gradlinigen Verlauf des Pfades und die damit verbundene geringe Verkürzung der einzelnen Abschnitte zurückzuführen.

Aussagen zum Einfluss der Unsicherheit der GPS-Positionsbestimmung sind aufgrund der Verteilungen schwierig. Einzig beim welligen Pfad von Track 1 ist ein Muster zu erkennen. Bei diesem steigen gemäss *Ground Truth* in sämtlichen Intervallen die Anteile der Klassen „Zügiges Laufen“ bis „Langsames Joggen“, dies auf Kosten sowohl der Klasse „Schnelles Laufen“ als auch der Klasse „bergab“.

6.5.3 Einfluss der GPS-Unsicherheit

Deutlicher hervorheben lässt sich die Rolle der Unsicherheit in der Positionsbestimmung mit GPS beim paarweisen Vergleich einzelner Abschnitte. Auf diese Weise werden theoretisch lageidentische Teilstrecken einander gegenübergestellt und ihre Klassierung gemäss Leistungsklasse verglichen. Diejenige Teilstrecke, die jeweils mit GPS erfasst wurde, weicht in der Praxis infolge GPS-Unsicherheit von ihrer *Ground-Truth*-Entsprechung ab. Für die in Abbildung 35 aufgeführten Abweichungen scheinen verschiedene Erklärungen plausibel. Die generell kleinsten Abweichungen zeigen sich bei sämtlichen Aufzeichnungsintervallen entlang von Track 3. Dies dürfte primär an der flachen Charakteristik des Pfades mit nur sehr wenig Höhenunterschied liegen. Die Einordnung der Teilstrecken basiert daher fast ausschliesslich auf der zurückgelegten Horizontalstrecke zwischen zwei Punkten. Diese nahezu vollständige Geschwindigkeitsabhängigkeit führt dazu, dass die Positionsunsicherheit in x- und y-Richtung der beteiligten Punkte einen weitaus geringeren Einfluss auf die Klassierung hat. Es fliesst somit vor allem die daraus folgende Längenänderung der Abschnitte und die damit zusammenhängende Veränderung der berechneten Geschwindigkeit innerhalb der entsprechenden Teilstrecke in deren Klassierung ein. Je grösser dabei das Aufzeichnungsintervall, desto kleiner ist diese durch die GPS-Unsicherheit bewirkte Längenänderung relativ zur Abschnittslänge. Bei kleinem Intervall und demzufolge eher kurzen euklidischen Distanzen zwischen aufeinanderfolgenden Punkten steigt folglich der Einfluss der Positionsunsicherheit der Punkte auf die Abschnittslänge und damit auch auf die Klassierung. Dies wird untermauert durch die Aussagen von Jerde & Visscher (2005), gemäss denen bei der Parametrisierung von Bewegungen anhand von GPS-Daten der Einfluss umso geringer ist, je grösser das Intervall gewählt wird.

Für die beiden Untersuchungspfade Track 1 und 2 gelten diese Gesetzmässigkeiten ebenfalls, jedoch unterliegen die beiden Pfade zusätzlich dem Einfluss der dritten Dimension. Bei deren Beschreitung wurde eine grössere Anzahl Höhenmeter zurückgelegt, was zu einem stärkeren Einfluss des zugrundeliegenden Höhenmodells führt. Die horizontale Lagegenauigkeit eines Punktes hat folglich nicht nur Auswirkungen auf die Abschnittslänge und damit auf die Länge und Neigung. Durch den Umstand, dass theoretisch identische Punkte durch die Positionsunsicherheit in einer anderen Rasterzelle zu liegen kommen und somit einen abweichenden Höhenwert erhalten, wird die Länge und v.a. die Neigung des Abschnitts abermals verändert. Dies zeigt sich in den grossen Abweichungen sämtlicher Pfade bei Aufzeichnungsintervallen von einer und zwei Sekunden. Die grösste Abweichung wird auf dem welligen Track 1 erreicht, hier sind 42 % aller Segmente bei einer sekundlichen Aufzeichnung verglichen mit ihrer *Ground Truth* unterschiedlich klassiert.

Ein weiterer Erklärungsansatz für die unterschiedlichen Ergebnisse zwischen den drei Untersuchungspfaden kann in deren Charakteristik gründen: Track 3 verlief fast vollständig in offenem Gelände, lediglich auf wenigen hundert Metern wurde ein Waldstück gekreuzt. Die übrigen Kilometer verliefen vorwiegend über Felder und durch ländliche Gebiete. Die Signale der Satelliten dürften auf relativ direktem Weg zum Empfänger übertragen worden sein, *Multipath*-Effekte somit einen geringen Einfluss ausgeübt haben. Hinzu kommt, dass dieser Pfad verhältnismässig gradlinig verläuft. Der Verlauf ändert nur selten abrupt seine Richtung, Abschnitte weichen daher in ihrer Länge nur selten deutlich von ihrer *Ground-Truth*-Entsprechung ab. Bei stark verwinkelten Pfaden wie Track 1 und Track 2 dürfte dieser Effekt hingegen einen grösseren Einfluss auf die Resultate haben. Befindet sich die *Ground Truth* auf der Aussenseite einer Kurve des GPS-Pfades, erfahren die Teilstrecken der *Ground-Truth*-Entsprechung in diesem Bereich eine relative Verlängerung verglichen mit ihrem Pendant auf dem GPS-Pfad selbst. Diese Längenveränderung wirkt sich direkt auf die Klassierung der Teilstrecken aus, abweichende Klassenzugehörigkeiten sind entlang kurviger Pfade somit wahrscheinlicher. Da Track 1 mehrheitlich Waldwegen folgt, liegt der Schluss nahe, dass dieser Effekt neben der GPS-Unsicherheit für die durchwegs höchsten Abweichungen in sämtlichen Intervallen verantwortlich ist.

6.6 Einschränkungen

Die Resultate dieser Analyse unterliegen allerdings gewissen einschränkenden Einflüssen: Die Auflösung des zugrundeliegenden digitalen Höhenmodells von 2 m sorgt gerade bei kleinen Aufzeichnungsintervallen und tiefer Fortbewegungsgeschwindigkeit, beides resultiert in kurzen Teilstrecken, für Unsicherheiten hinsichtlich der wahren Höhe der an der Strecke beteiligten Punkte. Dies hat auch Auswirkungen auf die Berechnung der Steigungen dieser Abschnitte und schliesslich auch auf deren Einordnung in die einzelnen Leistungsklassen. Jedoch dürfte der Einfluss der daraus resultierenden Unsicherheit relativ gering sein, da sich die Geländebeschaffenheit auf begehbaren Wegen im Schweizer Mittelland einerseits innerhalb von 2 m kaum abrupt ändert. Andererseits würden derart kleinräumige Veränderungen wie z.B. Senken oder kleine Gräben die Laufgeschwindigkeit nur unwesentlich beeinflussen, die Einordnung der Abschnitte in die Leistungsbereiche also kaum verändern.

Ein weiterer einschränkender Faktor ist die Lageungenauigkeit der *Ground-Truth*-Punkte sowohl in Bewegungsrichtung als auch senkrecht dazu. Erstere ergibt sich durch das *Snapping* der GPS-Fixes auf die Vektoren aus Vector25. Da die gewählte *Snapping*-Methode relativ einfach ist – die Punkte werden senkrecht auf die Vektoren kopiert – kommt es insbesondere in Kurven zu Verzerrungen. Befindet sich der *Ground-Truth*-Vektor auf einer Kurvenaussenseite des GPS-Pfades, werden die Abstände zwischen den einzelnen Punkten grösser, als sie es in Wirklichkeit sein dürften. Liegt der Vektor hingegen auf der Kurveninnenseite des GPS-Pfades, erfolgt eine Verkürzung der Abstände. Umgemünzt auf die Fortbewegung heisst dies, dass die Bewegung bzw. deren Parameter eine Beschleunigung bzw. Bremsung erfahren. Besonders ins Gewicht fällt dies bei sehr engen Kurven und grossem Aufzeichnungsintervall. Die Unsicherheit senkrecht zur Bewegungsrichtung entstammt der Lageungenauigkeit der Vector25-Daten, die gemäss Swisstopo 3-8 m betragen. Durch die manuelle Korrektur dürfte diese Unsicherheit aber in den meisten Fällen weniger als 2 m betragen, ist also um ein Vielfaches kleiner als die zu erwartende Unsicherheit der Positionsbestimmung durch GPS. Der Einfluss der Lageungenauigkeit der *Ground-Truth*-Punkte auf die vorgestellte Segmentierungsmethode wird durch ein verlängertes Aufzeichnungsintervall stark reduziert, weshalb er insbesondere bei Intervallen von zehn Sekunden sehr klein wird.

Hinzu kommen mögliche Rundungsfehler beim Berechnen der steigungsabhängigen Geschwindigkeit. Da sich diese jedoch gleichermassen auf die echten Pfade wie auch auf die *Ground-Truth*-Pfade auswirken, können deren Einflüsse vernachlässigt werden.

6.7 Zwischenfazit

Anhand der vorgestellten Segmentierungsmethode für Laufstrecken entsprechend ihrer Leistungsklasse kann gezeigt werden, welche Einflüsse von Unsicherheiten in der Positionsbestimmung mithilfe von GPS-Satelliten auf Segmentierungsmethoden bestehen. Bei einem Aufzeichnungsintervall von einer Sekunde treten Abweichungen in der Klassierung von 28-42 % auf. Diese Teilstrecken der Pfade sind somit verglichen mit der tatsächlichen Bewegung falsch klassiert. Bei einem vergrösserten Aufzeichnungsintervall sind zwar die Abweichungen mit der *Ground-Truth*-Entsprechung geringer, doch erfolgt durch den längeren Zeitraum zwischen den einzelnen Positionsaufzeichnungen ein Informationsverlust, der je nach verwendetem Bewegungsparameter seinerseits Fehler induziert.

Für eine nachträgliche Segmentierung eines Bewegungspfades in Abschnitte gleicher Leistungsklasse kann aufgezeigt werden, dass Unsicherheiten in der Positionsbestimmung nur einen sehr geringen Einfluss auf das Resultat ausüben. Zwar treten lokal teils grosse Unterschiede zwischen Abschnitten eines GPS-Pfades und seiner *Ground-Truth*-Entsprechung auf, doch scheinen sich diese Unterschiede über die Gesamtheit des Pfades mehrheitlich auszugleichen. Diese Harmonisierung ist umso ausgeprägter, je kleiner das Intervall und je grösser somit die Anzahl Abschnitte ist. Die prozentualen Anteile der einzelnen Segmentklassen weisen eine relativ hohe Ähnlichkeit auf, wobei die auftretenden Differenzen neben

den Unsicherheitseinflüssen auch auf die Segmentierungsmethode selbst zurückzuführen sind.

Wirklich deutlich treten die Einflüsse der Positionsungenauigkeit erst bei einem paarweisen Vergleich der einzelnen Teilstrecken hervor. Diese zeigen denn auch die erwarteten beträchtlichen Abweichungen infolge der GPS-Unsicherheit. Besonders bei kurzem Aufzeichnungsintervall und demzufolge kleinem Verhältnis zwischen Abschnittslängen und auftretender Unsicherheit treten grosse Abweichungen auf. Es wäre nun jedoch falsch, daraus auf eine bessere Eignung von grösseren Aufzeichnungsintervallen für Segmentierungsmethoden zu schliessen. Einerseits wurden abweichende Segmente des GPS-Pfades und seiner *Ground-Truth*-Entsprechung analysiert, die geringen Abweichungen basieren in diesen Fällen höchstwahrscheinlich auf Glättungseffekten infolge des grösseren Intervalls. Andererseits zeigt sich, dass durch die ausgleichenden Effekte über die gesamte Pfadlänge betrachtet bei kleinen Intervallen eine geringere Abweichung hinsichtlich der Verteilung erreicht werden kann. Aus Gründen des geringeren Informationsverlusts sind kleine Intervalle nach Möglichkeit auch hier zu bevorzugen.

Zwar stellt die entwickelte Segmentierungsmethode durch ihre Positionsabhängigkeit in drei Dimensionen einen Extremfall dar und lassen sich die Resultate darum nicht eins zu eins auf andere Segmentierungsmethoden übertragen. Doch es wird deutlich, dass Methoden, die auf aus GPS-Pfaden abgeleiteten Bewegungsparametern basieren, sehr anfällig für Unsicherheiten in den verwendeten Pfaden sein können.

7 Diskussion

Die in den vorhergehenden Kapiteln gesammelten Erkenntnisse und Resultate werden in diesem Kapitel analysiert und in die Beantwortung der Forschungsfragen eingeordnet.

7.1 GPS-Unsicherheit in der Standortbestimmung

Die Positionsunsicherheit eines einzelnen aufgezeichneten Standorts, die je nach Autor mit weniger als 7.8 m (Cai et al., 2013) bis zu 15 m (Arnold & Zandbergen, 2011) angegeben wird, kann anhand der im Rahmen dieser Arbeit erfassten Daten nicht genau beziffert werden. Da zur Erfassung einer exakten *Ground Truth* weitere umfangreiche Schritte nötig sind, die jedoch kein erklärtes Ziel der vorliegenden Arbeit darstellen, können einzig Aussagen zur Grössenordnung der Positionsfehler gemacht werden. Die in den Kapiteln 5 und 6 durchgeführten Analysen auf Basis einer Abweichung von 10 m zeigen, dass diese als Schätzung durchaus zutreffend ist. Die gemachten Beobachtungen bestätigen, dass sich die GPS-Fixes, abgesehen von Extremsituationen mit ungenügendem Satellitenempfang oder in Momenten scheinbaren Stillstands, meist weniger als 10 m von ihrer *Ground Truth* entfernt befinden.

7.2 GPS-Unsicherheiten in der Bewegungsanalyse

Während bisherige Arbeiten zum Thema der GPS-Unsicherheiten in Bewegungspfaden von einem normalverteilten Fehler ohne Korrelation ausgehen (z.B. Laube & Purves, 2011), zeigen die Resultate der vorliegenden Arbeit, dass betreffend Fehlerverteilung – zumindest mit der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Gerätschaft – sehr wohl von einer starken räumlichen Korrelation ausgegangen werden kann. Die beobachteten Phänomene und Pfadausprägungen aus Kapitel 4 zeigen diesen Sachverhalt eindrücklich. GPS-Pfade verlaufen demnach in den meisten Fällen parallel zu ihrer *Ground Truth*, also dem tatsächlichen Bewegungspfad. Zwar besteht weiterhin ein Positionsfehler, was zu einer seitlichen Verschiebung des GPS-Pfades führt, doch die primäre Bewegungsrichtung gemäss GPS-Pfad stimmt mit der realen Bewegungsrichtung relativ genau überein. Die GPS-Unsicherheit wirkt sich dabei vor allem auf die Wiederholbarkeit bzw. Reproduzierbarkeit von GPS-Pfaden aus. Wird versucht, einen identischen Pfad wiederholt abzuschreiten und zu erfassen, kann unter zunehmend von Idealbedingungen abweichenden Umweltverhältnissen nur eine mässige Reproduzierbarkeit erreicht werden. Es zeigt sich zwar, dass die Annahme der Richtungstreuung weiterhin zutreffend ist, doch weichen die einzelnen GPS-Pfade unterschiedlich ausgeprägt von der *Ground Truth* ab. In zunehmend urbanem Gebiet (Abbildung 10) werden schliesslich die Einflüsse der Unsicherheiten auf den GPS-Pfad besonders deutlich. Durch Abschattung des GPS-Empfängers und daher oft wechselnder Konstellation empfangener Satelliten werden innerhalb von Gebäudeschluchten die Bewegungspfade durch GPS-Pfade am ungenauesten wiedergegeben. Hier spielen auch *Multipath-Effekte* (Kaplan & Hegarty, 2006), also die Reflexion von Satellitensignalen an beispielsweise Gebäudehüllen, eine gewichtige Rolle. Sie sorgen in urbanem Raum dafür, dass nur noch eine ungenügende Reproduzierbarkeit gegeben ist. Kapitel 4.1.1 gibt einen Anhaltspunkt dafür,

welche Auswirkungen dieser Effekt auf die Genauigkeit und Wiederholbarkeit einer Positionsbestimmung hat.

Für die aus den aufgezeichneten GPS-Pfaden abgeleiteten Bewegungsparameter, die bei der Bewegungsforschung verwendet werden, sind die Erkenntnisse dieser Arbeit von grosser Bedeutung. Es zeigt sich nämlich, dass sie wesentlich zuverlässiger sind, als dies Jerde und Visscher (2005) vorschlagen. Sie legen dar, dass ab einer Distanz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Punkten von weniger als fünf Mal der Standardabweichung des Positionsfehlers keine zuverlässigen Aussagen zur Bewegung mehr möglich sind. Die daraus resultierende Schlussfolgerung, dass ein ausreichend grosses Aufzeichnungsintervall gewählt werden muss, um relativ zuverlässige Bewegungsparameter zu erhalten, kann aufgrund der Resultate der vorliegenden Arbeit zumindest stark angezweifelt werden. Die Bewegungsparameter Geschwindigkeit, Beschleunigung und Richtung können durch die räumliche Korrelation des Fehlers mit geringerem Vorbehalt verwendet werden, als dies bisher angenommen wurde. Infolge dieser räumlichen Korrelation der Positionsfehler einzelner aufgezeichneter Punkte werden die Parameter unter den meisten Szenarien sehr genau wiedergegeben. Dies legt nahe, dass bei kleinen Aufzeichnungsintervallen die Zuverlässigkeit der Bewegungsparameter nicht abnimmt und somit nicht auf Kosten eines Informationsverlusts grössere Intervalle zu bevorzugen sind.

Die Erkenntnisse aus Analysen von sehr kleinräumigen Bewegungsausprägungen, wie sie vor allem in den Bewegungswissenschaften durchgeführt werden (Coutts & Duffield, 2010), werden durch die vorliegende Arbeit gestützt. Die Resultate dieser Arbeit legen nahe, dass bei kurz aufeinanderfolgenden Richtungsänderungen oder sehr raschen Veränderungen der Fortbewegungsgeschwindigkeit durch die Positionsunsicherheit in GPS-Pfaden und insbesondere durch *Pseudo Movement* (4.1.1) bei sehr tiefen Geschwindigkeiten Bewegungsparameter fehlerhaft wiedergegeben werden. Durch implementierte Filter werden zudem die GPS-Pfade geglättet, was bei abrupt ändernden Bewegungen zu einem Fehler führt. Da der Effekt des *Pseudo Movements* auch unter idealen Empfangsbedingungen besteht, kann dieser nicht beseitigt werden. Die kritische Einstellung von Coutts und Duffield gegenüber der Analyse von Feldsportarten mittels GPS kann mit den Ergebnissen dieser Arbeit unterstützt werden, denn die genannten Unsicherheiten haben stets Bestand.

Die in Kapitel 5 beschriebene Analyse des von Skupin und Miller (2012) entwickelten Beitrags zur *Nokia Mobile Data Challenge* zeigt, dass der Einfluss der in den Pfaden enthaltenen Unsicherheit relativ gross ist. Vor allem bei Bewegungen entlang von Klassengrenzen, beispielsweise entlang des Ufers eines Gewässers, können Pfad-unsicherheiten zu Klassierungen der Pfade führen, die nicht der Realität entsprechen. Die Ausprägung dieser falschen Klassierung ist dabei unmittelbar von den Umgebungsbedingungen abhängig, da diese die Grössenordnung der Unsicherheit direkt beeinflussen. Die Resultate zeigen, dass der verwendete Rasterdatensatz einen relativ grossen Einfluss auf die Aussagekraft der Resultate ausübt. Aussagen zum Kontext der Bewegung sind daher nur begrenzt zulässig. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Abweichungen durch GPS-Unsicherheiten zustande kommen und diese vor allem in Siedlungsgebieten am stärksten ausgeprägt sind, was sich weitgehend mit den Erwartungen deckt. Es sind somit zwar Tendenzen zu erkennen, doch

von den auftretenden Abweichungen innerhalb der verschiedenen Landnutzungsklassen auf eine Abhängigkeit zwischen Landnutzungsklasse und GPS-Unsicherheit zu schliessen, ist aufgrund der geringen Datenmenge und der niedrigen Gebietsabdeckung der verwendeten Pfade schwierig. Die Beobachtungen entlang eines Untersuchungspfades, für dessen Klassierung ein Vector25-Vektordatensatz verwendet wurde, zeigen, dass dieser verglichen mit dem Arealstatistik-Rasterdatensatz für die Analyse des Bewegungskontexts und dessen Einfluss auf die Ausprägung der GPS-Unsicherheit zuverlässigere Aussagen ermöglicht, insbesondere bei einer geringen Anzahl an Untersuchungspfaden. Die Nutzung eines randscharfen Vektordatensatzes, wie in Kapitel 5.4.3 vorgeschlagen, wird daher für die Analyse des Kontexteinflusses auf die GPS-Unsicherheit stark empfohlen. Die starke räumliche Korrelation der GPS-Unsicherheit eines jeden Aufzeichnungspunktes führt in diesen Anwendungen dazu, dass aufgezeichnete Pfade zwar eine hohe Übereinstimmung mit der *Ground Truth* in ihrer Richtung und meist auch Geradlinigkeit aufweisen. Doch die Erkenntnisse aus Kapitel 4 und insbesondere Abbildung 11 zeigen, dass die Abweichung bei wiederholt abgeschrittenen Pfaden nicht konstant ausfällt. Es ist also möglich, dass sich der GPS-Pfad einmal links von der *Ground Truth* befindet, ein anderes Mal jedoch rechts davon verläuft. Dies hat zur Konsequenz, dass die Bewegung entlang einer Grenze, zum Beispiel eines Gewässers, im einen Falle vollständig als Bewegung im Wasser klassiert wird, sich im anderen Falle gemäss GPS-Pfad jedoch gänzlich an Land zugetragen hat. Eine Klassierung in je 50 % „an Land“ und 50 % „im Wasser“, wie sie gemäss unkorrelierter Verteilung des Fehlers eigentlich zu erwarten wäre, ist aus den genannten Gründen sehr unwahrscheinlich.

Die von verschiedenen Autoren erarbeiteten Methoden zur Erkennung des Fortbewegungsmodus aus GPS-Pfaden basieren grösstenteils auf spezifischen Grenzwerten der aus den Daten abgeleiteten Bewegungsparameter. Den Methoden von Bohte und Maat (2009), Gong et al. (2012), Zhang et al. (2008) und Zheng et al. (2008) gemein ist ihre grosse Abhängigkeit von korrekt erkannten Stopps. Sämtliche dieser Segmentierungsmethoden gehen davon aus, dass Stopps jeweils der Anfang und das Ende einer Bewegung sind. Mit Hilfe dieser Zeitpunkte, an denen die Fortbewegungsgeschwindigkeit gleich null ist, werden die Pfade in Segmente gleicher Fortbewegungsart unterteilt. Die Identifizierung dieser Stopps wird durch Unsicherheiten in GPS-Daten stark beeinflusst. *Pseudo Movement* (4.1.1) kann hierbei dazu führen, dass Stopps – besonders in urbanem Raum und somit bei nicht idealen Empfangsbedingungen – nicht erkannt werden. Dies macht den Einbezug weiterer Faktoren für eine exakte Stopp-Bestimmung nötig. So zum Beispiel die Identifizierung realistischerweise nicht möglicher Bewegungen, wie sie im Falle von *Pseudo Movement* aufgezeichnet werden. Dass ein sich bewegendes Objekt, in diesen verwendeten Beispielen stets ein Mensch, eine derart rasche Veränderung der Geschwindigkeit wie auch der Bewegungsrichtung innerhalb kürzester Zeit herbeiführen kann, ist nicht realistisch. Der Unterscheidung zwischen *Pseudo Movement* in Momenten tatsächlichen Stillstandes und tatsächlich stattfindender Bewegung eines Objekts kommt daher für diese Segmentierungsmethoden eine Schlüsselrolle zu. Sind die einzelnen Segmente einmal abgegrenzt und unterschieden, werden sie entsprechend ihres Bewegungsmodus klassiert. Für sämtliche Bewegungsarten wird eine charakteristische Ausprägung ihrer Bewegungsparameter definiert. Auch hier bedient man sich der Parameter Geschwindigkeit, Beschleunigung und Richtungsänderung pro Zeit. Während die weit verbreitete Meinung einer unkorrelierten Fehlerverteilung einen

grossen Einfluss der GPS-Unsicherheit erwarten lässt, zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, nach denen eine starke räumliche Korrelation der Positionsfehler besteht, dass die Fehler infolge GPS-Unsicherheit bedeutend kleiner ausfallen dürften. Insbesondere der Parameter der Bewegungsrichtung wird durch GPS-Pfade mit hoher Genauigkeit wiedergegeben, wie Kapitel 4.1.2 eindrücklich zeigt. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Segmentierungsmethode für Lauftrainingseinheiten (Kapitel 6) basiert im Gegensatz dazu nicht auf Stopps zur Identifizierung der einzelnen Moduswechsel, sondern bedient sich einzig der Parameterausprägung. Sie vermag aufzuzeigen, dass die Verzerrung infolge GPS-Unsicherheit besonders bei stark verwinkelten Pfaden und kurzen Segmenten einen grossen Einfluss auf die Bestimmung der Bewegungsparameter hat. So wird durch die festgestellte Richtungstreue zwar der Parameter Richtung sehr exakt wiedergegeben. Der Parameter Geschwindigkeit kann jedoch durch die Positionsunsicherheit eine Veränderung erfahren. Da der Zeitaspekt zur Ermittlung der Geschwindigkeit durch das gewählte Aufzeichnungsintervall gegeben und somit für die tatsächliche Bewegung und den GPS-Pfad identisch ist, hängt die Geschwindigkeit einzig von der Abbildungsgenauigkeit der zurückgelegten Strecke ab. Diese kann je nach Gewundenheit des aufgezeichneten Pfades teilweise stark variieren. Wird die Bewegung gemäss GPS-Pfad mit einer Abweichung in Bewegungsrichtung links der tatsächlichen Bewegung wiedergegeben, erfährt die zurückgelegte Strecke in Linkskurven eine Verkürzung, in Rechtskurven fällt sie hingegen länger aus als in der Realität. Dies hat direkte Auswirkungen auf die distanzabhängigen Parameter wie Geschwindigkeit und Beschleunigung. Zwar nimmt der Einfluss dieses Effekts mit zunehmender Segmentlänge ab, doch gerade bei kurzen Segmenten und verwinkelten Pfaden ist er zu beachten. Insbesondere, weil verwinkelte Pfade meist von Fussgängern beschritten werden – für andere Bewegungsarten kommen kleinräumige Richtungsänderungen gemäss Definition gar nicht in Frage –, deren zurückgelegte Strecken in der Regel kürzer sind als mit Verkehrsmitteln und bei denen der Einfluss dieses Effekts durchaus spürbar sein dürfte. In Kapitel 4 konnte gezeigt werden, dass es aufgrund der räumlichen Korrelation der Fehlerausprägung kein kritisches Minimalmass für die Wahl des Aufzeichnungsintervalls gibt. Diese Arbeit legt somit nahe, dass im Sinne eines möglichst geringen Informationsverlusts ein kleines Intervall gewählt werden sollte. Dies ist wiederum davon abhängig, welche Lebensdauer von der Energieversorgung wie auch vom Speichermedium erwartet wird. Grosse Auszeichnungsintervalle führen zu einer Art Glättung der Pfade, die kleinräumige abrupte Veränderungen der Bewegung mitunter völlig ignoriert. Auf diese Art können möglicherweise interessante Phänomene der Bewegung durch die GPS-Aufzeichnung vollständig verloren gehen. Gerade für die Segmentierung von Bewegungspfaden aufgrund von Stopps ist ein kleines Aufzeichnungsintervall eminent wichtig, da die Identifikation von *Pseudo Movement* und damit zusammenhängend das Erkennen von Stopps bei grösseren Intervallen zunehmend schwierig wird. Je grösser das Intervall, desto länger der Zeitraum, in dem über den tatsächlichen Aufenthaltsort des sich bewegenden Objekts Informationen gänzlich fehlen. Es kann daher bei einem grossen Intervall vorkommen, dass *Pseudo Movement* sich nicht aus den GPS-Daten ableiten lässt und ein Stopp zur Segmentierung eines Pfades nicht erkannt wird.

7.3 Visualisierung von Pfad-Unsicherheiten

Die *Errorband*-Modelle von Shi und Liu (2000) eignen sich hervorragend zur Visualisierung von Unsicherheiten in GPS-Pfaden. Doch entgegen bisheriger Annahmen, wie sie zum Beispiel von de Bruin (2008) propagiert werden, ist ein Fehlerband mit knochenartiger Form, also einer jeweils maximalen Breite um die beiden Stützpunkte und einer markanten Verjüngung in deren Mitte, für die Verwendung mit GPS-Bewegungsdaten eher ungeeignet. De Bruin geht davon aus, dass die Positionsfehler von mit GPS erfassten Punkten zufällig verteilt sind. Für den Fall, dass dem so ist, wäre eine konkave Knochenform des Fehlerbandes rein mathematisch betrachtet korrekt. Doch wie gezeigt werden konnte, ist die Annahme einer zufälligen Fehlerverteilung in GPS-Pfaden nicht zutreffend. Durch die starke Korrelation der Positionsfehler und der damit zusammenhängenden, in 4.1.2 beschriebenen Richtungsstreuung der GPS-Pfade hinsichtlich des Verlaufs ihrer *Ground Truth* entspricht ein Fehlerband in Form eines Epsilonbandes mit konstanter Breite wesentlich besser der Realität als eines in Knochenform. Dies gilt vor allem für kleine Aufzeichnungsintervalle, bei denen nur sehr geringe Unklarheiten über den Aufenthaltsort des Objekts zwischen zwei GPS-Fixes bestehen. Je grösser jedoch das gewählte Intervall, desto grösser ist wiederum die Informationslücke zwischen zwei Punkten. Da die Annahme einer vollständig gradlinigen Bewegung für natürliche Objekte selten zutreffend ist, tendiert ein Fehlerband mit zunehmendem Intervall zur Form einer konvexen Hülle, wie sie Downs und Horner (2012) mit ihrer *Time Geographic Density Estimation* vorschlagen. Dabei wird aufgrund der Eigenschaften des sich bewegenden Objekts eine Bewegungsspannweite zwischen zwei aufeinanderfolgenden Punkten festgelegt, die schliesslich die Konvexität dieser Hülle bestimmen. Diese hängt dabei massgeblich von der maximal zu erwartenden Fortbewegungsgeschwindigkeit ab. Für die Analyse von Bewegungen mit einem grossen Aufzeichnungsintervall und somit ebenso grossen Informationslücken scheint diese Methode sehr realitätsnah. Bei kleinen Intervallen, bei denen ein nur minimaler Unsicherheitsbereich hinsichtlich des Aufenthaltsortes des sich bewegenden Objekts besteht, scheint die Verwendung der in dieser Arbeit vorgeschlagenen Epsilonbänder angebracht.

8 Schlussfolgerungen

Übergeordnetes Ziel dieser Arbeit war es, auftretende Positionsfehler, die bei der Positionsbestimmung mit GPS auftreten, zu veranschaulichen und deren Folgen für die Anwendungsbereiche praktisch aufzuzeigen. Nach einer Datenerfassungskampagne, die über einen längeren Zeitraum durchgeführt wurde, wurden die aufgezeichneten Daten zur Weiterverarbeitung aufbereitet und in ArcMap visualisiert. Mit Hilfe dieser GPS-Pfade wurden auffällige Phänomene entlang der während der Erfassung beschrifteten Wege aufgespürt und daraus Schlussfolgerungen für die Fehlerverteilung auf in der Praxis erhobene GPS-Daten abgeleitet.

In einem zweiten Schritt wurde anhand zweier Methoden, stellvertretend für eine ganze Gruppe ähnlicher Vorgehensweisen, untersucht, wie gross der Einfluss von in GPS-Daten enthaltenen Unsicherheiten auf die Aussagekraft dieser Methoden ist. Die erste Methode stammt von Skupin und Miller (2012) und dient zur Ermittlung von Zeitabschnitten, in denen sich das *moving object* innerhalb einer gewissen Landnutzungsklasse aufgehalten hat. Diese *Point-in-Polygon-Analyse* wurde mit eigenen Daten nachgestellt und auf ihre Sensibilität einerseits gegenüber veränderten Aufzeichnungsintervallen und Rasterauflösungen, andererseits gegenüber Unsicherheiten der verwendeten GPS-Daten untersucht. Dabei wurden neben realistischen Abweichungen von 10 m im Sinne einer Sensitivitätsanalyse auch wesentlich grössere Abweichungen simuliert. Als zweite Gruppe wurden Segmentierungsmethoden analysiert. Hierfür wurde in Anlehnung an aus der Literatur bekannte Methoden zur Pfad-Segmentierung eine eigene Segmentierungsmethode entwickelt. Anhand dieser selbst entwickelten Methode wurde dargestellt, welche Abhängigkeit der Bestimmungsgenauigkeit von den Unsicherheiten der Input-Daten besteht.

Im Folgenden wird nun aufgeführt, welche Ziele in dieser Arbeit erreicht und welche Erkenntnisse gewonnen wurden. Abschliessend wird aufgezeigt, in welcher Form weitere Forschungsarbeit lohnend und wünschenswert wäre.

8.1 Erreichtes

- Es wurde mit einer umfangreichen Datenerfassungskampagne eine ausreichende Datengrundlage für die spätere Arbeit geschaffen. Dabei wurde darauf geachtet, dass sämtliche in unseren Breiten möglichen Umweltbedingungen abgedeckt sind.
- Daraus abgeleitet wurden GPS-Pfade hinsichtlich auffälliger Phänomene untersucht und mittels Erkenntnissen aus der Literatur zu erklären versucht. Da die beobachteten Verläufe der Pfade den Erwartungen gemäss Literatur teilweise fundamental widersprachen, wurden für die weitere Arbeit mit den erfassten Pfaden eigene Annahmen abgeleitet.
- Anschliessend wurde eine geeignete Möglichkeit zur Darstellung der *Ground Truth*, des während der Datenerfassung tatsächlich beschrifteten Weges, gesucht. Der

Vektordatensatz Vector25 von Swisstopo stellte sich als geeignet heraus, da er selbst über eine wesentlich geringere Unsicherheit verfügt als die erfassten GPS-Daten. Die jeweilige *Ground Truth* wurde folglich per Selektion aus Vector25 extrahiert.

- Um eine möglichst genaue Vergleichbarkeit der GPS-Pfade und ihrer *Ground Truth* zu gewährleisten, wurden GPS-Fixes mit Hilfe eines einfachen *Map Matchings* zu entsprechenden Punkten auf den Vector25-Vektoren transformiert. Dies erleichterte insbesondere die spätere Analyse der Segmentierungsmethoden.
- Stellvertretend für aus der Literatur bekannte Methoden wurden die *Point-in-Polygon*-Methode von Skupin und Miller (2012) sowie eine selbst entwickelte Methode zur Segmentierung von GPS-Pfaden von Lauftrainingseinheiten auf ihre Sensibilität gegenüber GPS-Unsicherheiten analysiert.
- Abschliessend wurden die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zur Validierung von Aussagen in etablierter Literatur genutzt und mögliche Anschlussforschungen vorgeschlagen.

8.2 Erkenntnisse

- Es musste festgestellt werden, dass ein Bewusstsein für die Funktionsweise von GPS und die daraus resultierende Unsicherheit in mit GPS erhobenen Datensätzen nicht flächendeckend vorhanden ist, ja teilweise gar völlig fehlt. So wird nur in einem geringen Teil der wissenschaftlichen Arbeiten, die sich mit GPS-Bewegungsdaten befassen, überhaupt auf mögliche Unsicherheiten eingegangen.
- Zwar befassen sich einige Autoren mit GPS-Unsicherheiten und deren Einflüssen auf die Parametrisierung von Bewegung, doch beruhen diese fast ausschliesslich auf theoretischen Überlegungen zur Verteilung der Positionsfehler. Die propagierte Annahme, wonach Positionsfehler zufällig verteilt und nicht räumlich korreliert sind, kann in dieser Arbeit nicht bestätigt werden. Ihre Richtigkeit muss aufgrund der gemachten Beobachtungen gar stark angezweifelt werden. Schliesslich zeigten sämtliche erfassten GPS-Pfade in ihrer Unsicherheitsausprägung eine starke räumliche Korrelation. Dies hat zur Folge, dass die aus GPS-Daten abgeleiteten Bewegungsparameter Geschwindigkeit, Beschleunigung und Richtung wesentlich zuverlässiger sind, als bisher fälschlicherweise angenommen wurde.
- Aufgrund der beobachteten stark ausgeprägten räumlichen Korrelation der Positionsfehler sind die Bewegungsparameter nur sehr begrenzt anfällig auf GPS-Unsicherheiten. Verschiedentlich erwähnte kritische Aufzeichnungsintervalle, bei deren Unterschreiten Bewegungsparameter keine verlässlichen Aussagen mehr erlauben, können mit den Ergebnissen dieser Arbeit nicht bestätigt werden.
- Gestützt auf die zuvor genannten Punkte kann, ja sollte, wenn immer möglich, das kleinstmögliche Aufzeichnungsintervall gewählt werden. Es besteht kein

stichhaltiger Grund, zugunsten höherer Parameterzuverlässigkeit einen Informationsverlust zu akzeptieren. Somit sollten einzig die zur Verfügung stehende Speicherkapazität und die gewünschte Laufzeit der Stromversorgung für die Wahl des Aufzeichnungsintervalls ausschlaggebend sein.

- Die Analyse der *Point-in-Polygon*-Methode von Skupin und Miller (2012) vermochte zu verdeutlichen, dass insbesondere Aussagen zu grenznahen Bewegungspfaden mit Vorsicht zu interpretieren sind. Gerade in diesen Bereichen, seien es nun Grenzen von Landnutzungsklassen oder sonstiger aufgrund einer gewissen Eigenschaft unterschiedener Bereiche, können Klassen infolge Lageunsicherheit der Pfade stark über- beziehungsweise unterrepräsentiert werden.
- Zur Visualisierung von Unsicherheiten in mit GPS aufgezeichneten Bewegungspfaden eignen sich Epsilonbänder mit einer konstanten Breite sehr gut. Entgegen anderslautender Meinungen, wonach sich diese Bänder zwischen zwei aufeinanderfolgenden Punkten verjüngen sollten, ist eine konstante Breite oder bei grösseren Aufzeichnungsintervallen gar konvexe Form für GPS-Datensätze mit räumlich korrelierten Positionsfehlern eher zutreffend.
- Die beschriebene räumliche Korrelation der Positionsfehler einzelner GPS-Fixes nimmt mit zunehmender Gebäudedichte tendenziell ab. In Häuserschluchten ist die räumliche Fehlerkorrelation daher weniger stark ausgeprägt als beispielsweise in offenem Gelände. In Waldgebieten konnte zwar eine stärkere Ausprägung der Unsicherheit festgestellt werden, die räumliche Korrelation ist jener unter Idealbedingungen jedoch sehr ähnlich.

8.3 Ausblick

Wie bereits gezeigt, sind die durchgeführten Analysen nicht nur von der GPS-Unsicherheit abhängig. Auch die Genauigkeit der übrigen verwendeten Datensätze trägt ihren Teil zur Repräsentativität der Ergebnisse bei. Der als *Ground Truth* gewählte Vector25-Datensatz unterliegt selbst einer gewissen räumlichen Unsicherheit, was dazu führt, dass lediglich Aussagen zur Grössenordnung der Abweichungen möglich sind. Die Auflösung der benutzten Rasterdatensätze, des digitalen Höhenmodells swissALTI^{3D} sowie des Landnutzungsdatensatzes Arealstatistik, beeinflusst die Resultate direkt. Eine höhere Auflösung würde den Einfluss der Auflösung reduzieren, die verbleibende Unsicherheit liesse mit grösserer Wahrscheinlichkeit allein auf die Unsicherheit der GPS-Positionsbestimmung schliessen. Im Falle von Arealstatistik kommt hinzu, dass durch die Erhebungsmethode mittels Stichprobenpunkten eine Aussage über die Wechselwirkung zwischen dem Kontext der Bewegung und der aufgezeichneten GPS-Pfade nur begrenzt möglich ist. Zwar gilt die Arealstatistik gemeinhin als anerkannter Datensatz zur Analyse der Landnutzung, doch dürften die Anzahl der in dieser Arbeit verwendeten GPS-Pfade zu gering und die Ausdehnung des Untersuchungsgebiets zu klein sein, um von einem ausgleichenden Effekt über das gesamte Gebiet ausgehen zu können. Hinzu kommt, dass sämtliche verwendeten

Daten mit demselben Gerät aufgezeichnet wurden. Geräteseitige Einflüsse, zum Beispiel durch herstellerepezifische Filter, können daher nicht ausgeschlossen werden.

Für genauere Analysen der umgebungsabhängigen Abbildungsgenauigkeit von GPS-Pfaden wäre eine gross angelegte Studie notwendig. Es wäre ratsam, unter standardisierten Bedingungen, beispielsweise genau definierten Pfaden, deren *Ground Truth* mit hochpräzisen Vermessungsmethoden bestimmt werden, wiederholt dieselben Bewegungen durchzuführen. Durch eine derartige Versuchsanlage könnten unter genau definierten Umgebungsbedingungen hohe Wiederholungsraten erzielt werden, was schliesslich auch statistisch stichhaltige Aussagen zum Einfluss der Unsicherheit in Abhängigkeit von der Umwelt erlauben würde. Ebenfalls in eine derartige Studie miteinbezogen werden sollte im Sinne einer geringeren Geräteabhängigkeit eine grössere Anzahl an GPS-Empfängern. Auf diese Weise liesse sich der Einfluss von herstellerepezifischen Filtern erkennen sowie ein charakteristisches Genauigkeitsprofil für jedes verwendete Gerät erstellen. Dadurch könnten für jedes Gerät Empfehlungen erarbeitet werden, welche Genauigkeit abhängig von den Umgebungsbedingungen zu erwarten wäre. Darüber hinaus könnte eine derartige Studie dazu beitragen, die Visualisierung von Pfad-Unsicherheiten zu verbessern. Eine umgebungsabhängige Ausprägung der Epsilonband-Breite würde einen wertvollen Beitrag zu einer verbesserten Bewegungsanalyse leisten.

Literatur

- Adrados, C., Girard, I., Gendner, J.-P., & Janeau, G. (2002). Global Positioning System (GPS) location accuracy improvement due to selective availability removal. *Comptes Rendus Biologies*, 325(2), 165–170.
- Andrienko, G., & Andrienko, N. (2007). Extracting Patterns of Individual Movement Behaviour from a Massive Collection of Tracked Positions. *Workshop on Behaviour Modelling and Interpretation*, 1–16.
- Arnold, L. L., & Zandbergen, P. a. (2011). Positional accuracy of the Wide Area Augmentation System in consumer-grade GPS units. *Computers & Geosciences*, 37(7), 883–892.
- Ashbrook, D., & Starner, T. (2003). Using GPS to learn significant locations and predict movement across multiple users. *Personal and Ubiquitous Computing*, 7(5), 275–286.
- Bangsbo, J., Norregaard, L., & Thorso, F. (1991). Activity Profile of Competition Soccer. *Canadian journal of sports science*, 2(16), 110–6.
- Bhatta, B. (2010). *Global Navigation Satellite Systems* (438). BS Publications: Hyderabad.
- Bohte, W., & Maat, K. (2009). Deriving and validating trip purposes and travel modes for multi-day GPS-based travel surveys: A large-scale application in the Netherlands. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 17(3), 285–297.
- Burgess, D., Naughton, G., & Norton, K. (2006). Profile of Movement Demands of National Football Players in Australia. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 4(9), 334–341.
- Cai, C., Gao, Y., Pan, L., & Dai, W. (2013). An analysis on combined GPS/COMPASS data quality and its effect on single point positioning accuracy under different observing conditions. *Advances in Space Research*, 1–12.
- Cossaboom, M., Georgy, J., Karamat, T., & Noureldin, A. (2012). Augmented Kalman Filter and Map Matching for 3D RISS/GPS Integration for Land Vehicles. *International Journal of Navigation and Observation*, 2012, 1–16.
- Coutts, A. J., & Duffield, R. (2010). Validity and reliability of GPS devices for measuring movement demands of team sports. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(1), 133–135.
- Czommer, R. (2000). *Leistungsfähigkeit fahrzeugautonomer Ortungsverfahren auf der Basis von Map-Matching-Techniken* (145). Verlag der Bayerischen Akademie der

Wissenschaften in Kommission bei der C.H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung:
München.

- De Bruin, S. (2008). Modelling Positional Uncertainty of Line Features by Accounting for Stochastic Deviations from Straight Line Segments. *Transactions in GIS*, 12(2), 165–177.
- DeCesare, N. J., Squires, J. R., & Kolbe, J. a. (2005). Effect of forest canopy on GPS-based movement data. *Wildlife Society Bulletin*, 33(3), 935–941.
- Dell'Ariccia, G., Dell'Omo, G., Wolfer, D. P., & Lipp, H.-P. (2008). Flock flying improves pigeons' homing: GPS track analysis of individual flyers versus small groups. *Animal Behaviour*, 76(4), 1165–1172.
- Di Salvo, V., Baron, R., Tchan, H., Calderon Montero, F., Bachl, N., & Pigazzi, F. (2007). Performance Characteristics According to Playing Position in Elite Soccer. *International Journal of Sports Medicine*, 3(28), 222–227.
- Dogramaci, S., & Watsford, M. (2006). A Comparison of Two Different Methods for Time-Motion Analysis in Team Sports. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 1(6), 73–84.
- Doukhnitch, E., Salamah, M., & Ozen, E. (2008). An efficient approach for trilateration in 3D positioning. *Computer Communications*, 31(17), 4124–4129.
- Downs, J. A., & Horner, M. W. (2012). Analysing infrequently sampled animal tracking data by incorporating generalized movement trajectories with kernel density estimation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 36(4), 302–310.
- Duffield, R., Reid, M., Baker, J., & Spratford, W. (2010). Accuracy and reliability of GPS devices for measurement of movement patterns in confined spaces for court-based sports. *Journal of science and medicine in sport / Sports Medicine Australia*, 13(5), 523–5.
- Dwyer, D. B., & Gabbett, T. J. (2012). Global Positioning System Data Analysis: Velocity Ranges And A New Definition of Sprinting For Field Sport Athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(3), 818–824.
- El-Rabbany, A. (2002). *Introduction to GPS* (p. 176). Artech House: Boston.
- Eon, R. G. D., Serrouya, R., Smith, G., & Kochanny, C. O. (2002). error and bias in GPS radiotelemetry mountainous terrain. *Wildlife Society Bulletin*, 30(2), 430–439.
- Eriksen, A., Wabakken, P., Zimmermann, B., Andreassen, H. P., Arnemo, J. M., Gundersen, H., Storaas, T. (2011). Activity patterns of predator and prey: a simultaneous study of GPS-collared wolves and moose. *Animal Behaviour*, 81(2), 423–431.

- Garmin. (2010). Garmin Forerunner 310 XT Manual [Zugriff 25.08.2013]
http://static.garmincdn.com/pumac/Forerunner310XT_OM_EN.pdf
- Gong, H., Chen, C., Bialostozky, E., & Lawson, C. T. (2012). A GPS/GIS method for travel mode detection in New York City. *Computers, Environment and Urban Systems*, 36(2), 131–139.
- Goodchild, M. F. & Zhang, J.-X. (2008) Spatial accuracy 2.0. *Proceedings of the Eighth International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*, (1), 1–7.
- Guo, Y., Poulton, G., Corke, P., Bishop-Hurley, G. J., Wark, T., & Swain, D. L. (2009). Using accelerometer, high sample rate GPS and magnetometer data to develop a cattle movement and behaviour model. *Ecological Modelling*, 220(17), 2068–2075.
- Impellizzeri, F., Marcora, S., Castagna, C., Reilly, T., Sassi, A., Iaia, F., & Rampinini, E. (2006). Physiological and Performance Effects of Genertic Versus Specific Aerobic Training in Soccer Players. *International Journal of Sports Medicine*, 6(27), 483–492.
- Jerde, C. L., & Visscher, D. R. (2005). GPS Measurement Error Influences on Movement Model Parameterization. *Ecological Applications*, 15(3), 806–810.
- Jones, C.-B. (1997). *Geographical Information Systems and Computer Cartography* (319). Addison Wesley Longman: Reading.
- Kaplan, E. D., & Hegarty, C. J. (2006). *Understanding GPS* (685). Artech House: Boston.
- Keller, B., Bergen, P. Von, Wattenhofer, R., & Welten, S. (2012). On the Feasibility of Opportunistic Ad Hoc Music Sharing. *Nokia Mobile Developer Challenge Workshop (MDC)*
- Klobuchar, J. A. (1991). Ionospheric Effects on GPS. *GPS World*, 04.
- Köhne, A., & Wössner, M. (2013). KOWOMA [Zugriff 31.08.2013]
<http://www.kowoma.de>.
- Krustrup, P., Mohr, M., & Bangsbo, J. (2002). Activity Profile and Physiological Demands of Top-Class Soccer Assistant Refereeing in Relation to Training Status. *Journal of Sports Sciences*, 20(11), 861–871.
- Kuter, N., & Kuter, S. (2010). Accuracy comparison between GPS and DGPS: A field study at METU campus, 42(3), 3–14.

- Laube, P., Dennis, T., Forer, P., & Walker, M. (2007). Movement beyond the snapshot – Dynamic analysis of geospatial lifelines. *Computers Environment and Urban Systems*, 31(5), 481–501.
- Laube, P., & Purves, R. S. (2011). How fast is a cow? Cross-Scale Analysis of Movement Data. *Transactions in GIS*, 15(3), 401–418.
- Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., & Rhind, D.W. (2001). *Geographic Information Science* (536). John Wiley & Sons: Hoboken.
- MacGougan, G., O’Keefe, K., & Klukas, R. (2010). Accuracy and reliability of tightly coupled GPS/ultra-wideband positioning for surveying in urban environments. *GPS Solutions*, 14(4), 351–364.
- Malleswari, B. L., Muralikrishna, I. V, Lalkishore, K., Seetha, M., & Hegde, P. (2009). The Role of Kalman Filter in the Modelling of GPS Errors. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 15(5), 95-105.
- Mohr, M., Krustrup, P., & Bangsbo, J. (2003). Match Performance of High-Standard Soccer Players with Special Reference to Development of Fatigue. *Journal of Sports Sciences*, 21(7), 519–528.
- Nokia (2012). Nokia Mobile Data Challenge. [Zugriff: 15.04.2013]
<http://research.nokia.com/page/12000>
- Orellana, D., Bregt, A., Ligtenberg, A., & Wachowicz, M. (2011). Exploring visitor movement patterns in natural recreational areas. *Tourism Management*. 33(). 672-682.
- Perkal, J. (1966). On the Length of Empirical Curves. *Michigan Inter-University Community of Mathematical Geographers*. (10). Ann Arbor.
- Radio-Electronics.com (2013). Resources and Analysis for Electronics Engineers. [Zugriff: 25.08.2013]
<http://www.radio-electronics.com/info/satellite>
- Raizman, E. a, Rasmussen, H. B., King, L. E., Ihwagi, F. W., & Douglas-Hamilton, I. (2013). Feasibility study on the spatial and temporal movement of Samburu’s cattle and wildlife in Kenya using GPS radio-tracking, remote sensing and GIS. *Preventive veterinary medicine*, 111(1-2), 76–80.
- Rempel, R. S., Rodgers, A. R., & F, A. K. (1995). Performance of a GPS Animal Location System under Boreal Forest Canopy. *The Journal of Wildlife Management*, 59(3), 543–551.
- Sadilek, A. (2012). Modeling Human Behavior at a Large Scale. *Ph.D. Thesis*. University of Rochester.

- Shi, W. (2010). *Principles of Modeling Uncertainties in Spatial Data and Spatial Analysis* (432). Taylor & Francis: London.
- Shi, W., & Liu, W. (2000). A Stochastic Process-Based Model for the Positional Error of Line Segments in GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(1), 51–66.
- Skupin, A., & Miller, H. J. (2012). Nokia MDC Atlas : An Exploration of Mobile Phone Users , Land Cover, Time and Space. *Nokia MDC*.
- Slingsby, A., Beecham, R., & Wood, J. (2012). Visual analysis of social networks in space and time. *Nokia MDC*.
- Swisstopo (2009). Arealstatistik nach Nomenklatur 2004 – Standard. [Zugriff: 05.06.2013]
<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/infothek/nomenklaturen/blank/blank/noas04/01.html>
- Swisstopo (2013a). Landschaftsmodell Vector25 [Zugriff: 31.05.2013]
<http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/landscape/vector25.html>.
- Swisstopo (2013b). Höhenmodell swissALTI3D [Zugriff: 25.07.2013]
<http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/height/swissALTI3D.html>.
- Taylor, G., Uff, J., & Al-hamadani, A. (2001). GPS positioning using map-matching algorithms, drive restriction information and road network connectivity, 1–6.
- Topographix (2013). The GPS Exchange Format [Zugriff: 20.06.2013]
<http://www.topografix.com/gpx.asp>
- U.S. Department of Defense (1995). Global Positioning System, Standard Positioning Service Signal Specification.
- U.S. Department of Defense (2008). Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard.
- U.S. Government. (2013). Official U.S. Government Information about the Global Positioning System (GPS) and related topics. [Zugriff: 15.07.2013]
<http://www.gps.gov/systems/gps/>
- Worboys, M & Duckham, M (2004). *GIS - A Computing Perspective* (448). CRC Press: Boca Raton.

- Ying, J. J., Chang, Y., Huang, C., & Tseng, V. S. (2012). Demographic Prediction Based on User's Mobile Behaviors, *2012*(1), 1-6.
- Zhang, L., Dalyot, S., Eggert, D., & Sester, M. (2008). Multi-Stage Approach to Travel-Mode Segmentation and Classification of GPS Traces. *Institut für Kartographie und Geoinformatik (IKG), Leibniz Universität Hannover*.
- Zhang, L., Thiemann, F., & Sester, M. (2010). Integration of GPS traces with road map. *Proceedings of the Second International Workshop on Computational Transportation Science - IWCTS '10*, 17.
- Zheng, Y., Liu, L., Wang, L., & Xie, X. (2008). Learning Transportation Mode from Raw GPS Data for Geographic Applications on the Web. *Proceeding of the 17th international conference on World Wide Web WWW 08*, 4(49), 247.

Anhang

A Nomenklatur Arealstatistik

Codes für die 4 Hauptbereiche

Code	Hauptbereich	Kurzdefinition
1	Bestockte Flächen	Mit Bäumen und Gebüschwald bildenden Straucharten bewachsene Flächen; Wald und Gehölze ohne Obstbäume und Bestockungen auf Siedlungsflächen.
2	Landwirtschaftsflächen	Flächen, die der erwerbsmässigen Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln dienen: Ackerland, Wiesen und Weiden, Kulturen des Obst-, Reb- und Gartenbaus, einschliesslich alpwirtschaftliche Nutzflächen und Obstbäume, jedoch ohne übrige Bestockungen auf Kulturland.
3	Unproduktive Flächen	Unbestockte Flächen ausserhalb der Siedlungsflächen, die aufgrund der klimatischen und topografischen Lage landwirtschaftlich nicht (mehr) nutzbar sind, insbesondere Gewässer, vegetationslose Flächen und unproduktive Vegetation.
4	Siedlungsflächen	Für Wohnen, Verkehr, nichtland- und -forstwirtschaftliche Produktion, Handel und Dienstleistungen, Ver- und Entsorgung sowie Erholung bestimmte Areale und Anlagen (inkl. Umschwung mit allfälligen Bestockungen).

Codes für die 17 bzw. 27 aggregierten Klassen

Aggregation zu 17 Klassen		Aggregation zu 27 Klassen		Zugehörige Grundkategorien
1	Industrie- und Gewerbeareal	1	Industrie- und Gewerbeareal	1, 2
2	Gebäudeareal	2	Wohnareal	3–8
		3	Öffentliches Gebäudeareal	9, 10
		4	Landwirtschaftliches Gebäudeareal	11, 12
		5	Nicht spezifiziertes Gebäudeareal	13, 14
3	Verkehrsflächen	6	Strassenareal	15–19
		7	Bahnareal	20, 21
		8	Flugplatzareal	22, 23
4	Besondere Siedlungsflächen	9	Besondere Siedlungsflächen	24–30
5	Erholungs- und Grünanlagen	10	Erholungs- und Grünanlagen	31–36
6	Obst-, Reb- und Gartenbauflächen	11	Obstbauflächen	37, 38
		12	Rebbauflächen	39
		13	Gartenbauflächen	40
7	Ackerland	14	Ackerland	41
8	Naturwiesen, Heimweiden	15	Naturwiesen	42
		16	Heimweiden	43, 44
9	Alpwirtschaftsflächen	17	Alpwiesen	45
		18	Alp- und Juraweiden	46–49
10	Wald (ohne Gebüschwald)	19	Geschlossener Wald	50, 51
		20	Aufgelöster Wald	52–56
11	Gebüschwald	21	Gebüschwald	57
12	Gehölze	22	Gehölze	58, 59, 60
13	Stehende Gewässer	23	Seen	61
14	Fliessgewässer	24	Fliessgewässer	62, 63
15	Unproduktive Vegetation	25	Unproduktive Vegetation	64–68
16	Vegetationslose Flächen	26	Vegetationslose Flächen	69, 70, 71
17	Gletscher, Firn	27	Gletscher, Firn	72

Codes für die 72 Grundkategorien

Code	Grundkategorie	Kurzdefinition
1	Industrie- und Gewerbegebäude	Grundfläche aller Gebäude mit überwiegend industrieller oder gewerblicher Nutzung. Die Zuteilung erfolgt teilweise mit Hilfe des Eidg. Gebäude- und Wohnungsregisters.
2	Umschwung von Industrie- und Gewerbegebäuden	Areale mit überwiegend industrieller oder gewerblicher Nutzung. Dazu gehören auch Zufahrten, Wege, Plätze, Industriegeleise, Bestockungen (Bäume, Gebüsche, Sträucher) sowie Gärten, Obstbäume und Reben innerhalb des Areals.
3	Ein- und Zweifamilienhäuser	Grundfläche von ein- oder mehrgeschossigen, freistehenden Wohngebäuden mit ein oder zwei Wohnungen und überwiegender Wohnnutzung (1).
4	Umschwung von Ein- und Zweifamilienhäusern	Flächen, die einem Ein- oder Zweifamilienhaus zugeordnet werden können und meist zum selben Grundstück gehören (1, 2).
5	Reihen- und Terrassenhäuser	Grundfläche von mindestens drei aneinander gebauten Einfamilien- oder Terrassenhäusern mit überwiegender Wohnnutzung (1).
6	Umschwung von Reihen- und Terrassenhäusern	Flächen, die einer Reihen- oder Terrassenhaussiedlung zugeordnet werden können und meist zum selben Grundstück gehören (1, 2).
7	Mehrfamilienhäuser	Grundfläche von mehrgeschossigen Wohngebäuden mit mindestens drei Wohnungen und überwiegender Wohnnutzung (1).
8	Umschwung von Mehrfamilienhäusern	Flächen, die einem einzelnen Mehrfamilienhaus oder einer Mehrfamilienhaussiedlung zugeordnet werden können und meist zum selben Grundstück gehören (1, 2).
9	Öffentliche Gebäude	Vorwiegend unbewohnte öffentliche Gebäude ausserhalb der besonderen Siedlungsflächen sowie der Erholungs- und Grünanlagen wie Verwaltungsgebäude, Schulhäuser, Kindergärten, Kirchen, Spitäler, Helme, Anstalten, Gefängnisse und Kasernen usw. (1, 2).
10	Umschwung von öffentlichen Gebäuden	Areale von öffentlichen Gebäuden ausserhalb der besonderen Siedlungsflächen sowie der Erholungs- und Grünanlagen (1, 2).
11	Landwirtschaftliche Gebäude	Grundfläche von landwirtschaftlichen Gebäuden wie Bauernhäuser, Wohnhäuser, Ökonomiebauten, Feldställe, Alpställe, Scheunen, Schuppen oder Speicher.
12	Umschwung von landwirtschaftlichen Gebäuden	Flächen, die einem landwirtschaftlichen Gebäude zugeordnet werden können. Dazu gehören Ein- und Zufahrten, befestigte Hausplätze, Bauerngärten, Hühnerhöfe, Futter- und Jauchesilos.
13	Nicht spezifizierte Gebäude	Gebäude mit Mischnutzung, mit unbekannter Nutzung oder Bauten, die dem Dienstleistungssektor zugeordnet werden können wie Bürogebäude, Banken, Restaurants, Hotels, Verkaufsläden oder Warenhäuser.
14	Umschwung von nicht spezifizierten Gebäuden	Flächen, die einem nicht spezifizierten Gebäude zugeordnet werden können und meist zum selben Grundstück gehören (2).
15	Autobahnen	Befestigte Flächen von kreuzungsfreien, mehrspurigen und durch bauliche Massnahmen richtungsgetrennten Strassen, inklusive befestigte Flächen von Autobahnparkplätzen und Raststätten.
16	Autobahngrün	Durch Autobahnen beanspruchte Grün- oder Steiflächen innerhalb des Wildschutzauns, wie Böschungen, Grünflächen von Parkplätzen und Raststätten und innerhalb der Anschlusswerke, die auch mit Bäumen und Gebüsch bestockt sein können.
		(1) Die Zuteilung erfolgt hauptsächlich mit Hilfe des Eidg. Gebäude- und Wohnungsregisters. (2) Dazu zählen Zufahrten, Wege, Plätze, Bestockungen (Bäume, Gebüsche, Sträucher) sowie Gärten, Obstbäume und Reben innerhalb des Areals.

Code	Grundkategorie	Kurzdefinition
17	Strassen, Wege	Durch Strassenfahrzeuge des öffentlichen und privaten Verkehrs benutzbare, mit Hart- oder Naturbelag befestigte Flächen ohne Autobahnen und Parkplätze. Dazu gehören Strassen ab der 5. Klasse nach Landeskarte, befahrene Plätze, Trottoirs, Haftstufen, Parkfelder entlang von Strassen sowie Stütz- und Futtermauern. Nicht enthalten sind 4. und 5.-Klass-Strassen im Wald.
18	Strassengrün	Durch den Bau von Strassenanlagen entstandene Rest- oder Steiflächen. Dazu gehören isolierte Grünflächen (Verkehrinseln, -kreisel), künstliche Böschungen von Einschnitten und Dämmen entlang von Strassen bis und mit 2. Klasse nach Landeskarte, Grünstreifen ohne andere Nutzung zwischen Strasse und Wald (Strassen bis und mit 2. Klasse).
19	Parkplatzareal	Mit Hart- oder Naturbelag befestigte Flächen, die dem ruhenden Verkehr dienen. Dazu gehören markierte Parkfelder quer zur Fahrtrichtung oder auf Plätzen des Strassenareals, planierte Abstellplätze mit Naturbelag, Parkplätze mit mehr als 10 Parkfeldern innerhalb des Industrieareals oder des Hausumschwungs, Tram- und Buswendeschleifen.
20	Befestigtes Bahnareal	Gleisanlagen (Schienen und Schotterbett) und Gebäude von Bahnen für den Personen- und Gütertransport, inklusive Perrons und Lagerplätze im Bereich von Bahnhöfen, Bahngeleise im Wald, Stütz- und Futtermauern und nicht begrünte Galerien.
21	Bahngrün	Durch den Bau von Bahnanlagen entstandene Rest- oder Steiflächen ohne landwirtschaftl. Nutzung, oft künstliche Böschungen von Einschnitten und Dämmen entlang offener Bahnstrecken.
22	Flugplätze	Durch den Flugbetrieb beanspruchte befestigte Flächen, inklusive Pisten, Rollwege, Abstellplätze für Flugzeuge und dazugehörige Gebäude (Abfertigungshallen, Terminals, Hangars usw.).
23	Graspisten, Flugplatzgrün	Durch den Flugbetrieb beanspruchte Grünflächen ohne landwirtschaftliche Nutzung, wie markierte Graspisten und unbefestigte Abstellplätze für Flugzeuge. Dazu gehören auch Zierrasen, der Umschwung von Gebäuden, Gebüsch und Sträucher innerhalb des Flugplatzareals.
24	Energieversorgungsanlagen	Areale, die zur Gewinnung und Verteilung von Energie dienen wie Staumauern und -dämme, Ausgleichsbecken, Druckleitungen, Elektrizitätswerke, Anlagen der Strom- und Gasverteilung sowie Areale von Solar- und Windkraftwerken, inklusive Zufahrten, Wege, Plätze, Gebäude und Bestockungen (Bäume, Sträucher, Gebüsch) innerhalb des Areals.
25	Abwasserreinigungsanlagen	Areale, die der Abwasserreinigung dienen, inklusive zugehörige Zufahrten, Wege, Plätze, Gebäude und Bestockungen.
26	Übrige Ver- und Entsorgungsanlagen	Areale von Ver- und Entsorgungsanlagen wie Wasserversorgung, Kehrverbrennung, Kompostierung, Antennenanlagen sowie Mehrzweckplätze, inklusive zugehörige Zufahrten, Wege, Plätze, Gebäude und Bestockungen (Bäume, Sträucher, Gebüsch).
27	Deponien	Areale, die der Endlagerung von Hauskehricht, Schlacke, Klärschlamm, Sondermüll, Aushub oder Bauschutt dienen, inkl. zugehörige Zufahrten, Wege, Plätze, Gebäude, Gehölz und Gebüsch.
28	Abbau	Areale, die dem Abbau von Rohstoffen wie Kies, Sand, Gestein, Lehm, Torf oder Salz dienen. Dazu gehören auch Förderanlagen, Zufahrten, Wege, Plätze, Gebäude, Gehölz, Gebüsch und Tümpel innerhalb des Areals.
29	Baustellen	Flächen, die durch Bautätigkeit ihrer ursprünglichen Nutzung entzogen sind und in eine andere, zum Teil noch nicht erkennbare Nutzung überführt werden. Dazu gehören das gesamte Baustellenareal in seiner momentanen Ausdehnung, Aushub- und Humusdeponien, Werk- und Installationsplätze, Baubaracken ebenso wie gerodete Waldflächen.

Code	Grundkategorie	Kurzdefinition
30	Bau- und Siedlungsbrachen	Brach liegende Areale im oder am Rand des Siedlungsgebietes, die noch keiner neuen Nutzung zugeführt wurden, insbesondere nicht mehr landwirtschaftlich genutztes Bauerwartungsland, Industriebrachen und Ruinen.
31	Öffentliche Parkanlagen	Grünanlagen, die der Allgemeinheit dienen, öffentlich zugänglich sind und eine Erholungsfunktion haben, wie Parks, Spielplätze, verkehrsfreie Uferpromenaden, begehbare Stadtmauern und Bollwerke, Biotope, botanische oder zoologische Gärten.
32	Sportanlagen	Areale von Anlagen, welche für Sport- und Freizeitaktivitäten benutzt werden wie Leichtathletikanlagen, Badeanstalten, Fussballfelder, Tennisplätze, Minigolfanlagen, Motocrosspisten oder Pferdesportanlagen aber auch Hallen und gedeckte Stadien. Dazu gehören auch Zufahrten, Wege, Plätze, Gebäude und Bestockungen (Bäume, Sträucher, Gebüsch) innerhalb des Areals.
33	Golfplätze	Areale von Golfplätzen, insbesondere die für den Golfsport speziell gepflegten Rasenflächen sowie Hecken und Biotope, jedoch ohne landwirtschaftlich genutzte Flächen.
34	Campingplätze	Areale von Campingplätzen und Caravansiedlungen mit saisonaler oder ganzjähriger Nutzung. Dazu gehören auch nicht belegte Plätze sowie Zufahrten, Wege, Abstellplätze und Bestockungen (Bäume, Sträucher, Gebüsch) innerhalb des Areals.
35	Schrebergärten	Areale von individuell, nicht erwerbsmässig genutzten und zu grösseren Einheiten zusammen gefassten Pflanzflächen mit Erholungsfunktion und festen Installationen wie Gartenhäuschen, Grillplatz oder Aussenmöblierungen, inkl. zugehörige Zufahrten, Wege, Plätze, Gebäude und Bestockungen (Bäume, Sträucher).
36	Friedhöfe	Areale, die zur Bestattung von Menschen oder Tieren genutzt werden. Dazu gehören auch parkähnliche Flächen sowie Zufahrten, Wege, Plätze, Gebäude und Bestockungen (Bäume, Sträucher, Gebüsch) innerhalb des Areals.
37	Obstanlagen	Landwirtschaftliche Produktionsflächen, die überwiegend für den Intensivobstbau genutzt werden und einen Bestand von mehr als 300 Obstbäumen pro Hektare aufweisen. In der Regel handelt es sich um eingezäunte Niederstammanlagen.
38	Feldobst	Geordnete Baumbestände in Reihenstruktur von weniger als 300 Bäumen pro Hektare oder Streuobst mit Unternutzung (Wiese, Weide), mit mindestens drei maximal 25 m voneinander entfernt stehenden Hochstammbäumen, meist in der Nähe von Siedlungen oder Einzelhöfen, auch entlang von Feldwegen.
39	Rebbaufflächen	Landwirtschaftliche Produktionsflächen, die ausschliesslich für den Rebbau in Draht-, Stichel-, Terrassen- oder Hochbauform (Pergola) genutzt werden, inklusive Grün- und Restflächen sowie vorübergehend nicht bepflanzte Rebbaufflächen.
40	Gartenbauflächen	Landwirtschaftliche Produktionsflächen, welche dauernd für den Erwerbsgartenbau genutzt werden. Dazu gehören auch Folientunnel und Gewächshäuser, Schnittblumen-, Gemüse- und Landschaftsgärtnerereien, Christbaumkulturen, mehrjährige Beerenkulturen, Baum- und Rebschulen, nicht aber der Feldgemüsebau.
41	Ackerland	In einer Fruchtfolge stehende Ackerflächen und Kunstwiesen, deren Felder mindestens 625 m² gross und 10 m breit sind und in der Regel weniger als 20% Hangneigung aufweisen.
42	Naturwiesen	Nicht in einer Fruchtfolge stehendes Dauergrünland im ganzjährig besiedelten Gebiet mit mindestens einer jährlichen Schnittnutzung zur Futtergewinnung.
43	Heimweiden	Landwirtschaftsflächen der Dauersiedlungszone, welche vorwiegend beweidet werden und meist in der Umgebung der Landwirtschaftsbetriebe liegen, aber auch Restflächen im Bereich des Wies- und Ackerlandes, die auf Grund der Topographie oder anderer Faktoren nur eingeschränkt bewirtschaftet werden können.

Code	Grundkategorie	Kurzdefinition
44	Verbuschte Wiesen und Heimweiden	Wies- und Weideland der Dauersiedlungszone, welches mit Gebüsch, Sträuchern oder Jungbäumen von max. 3 m Höhe und einem DG der Verbuschung von 50–80% überwachsen ist.
45	Alpwiesen	Abselts der Dauersiedlungen liegendes Dauergrünland der Maiensäss- und Alpstufe, auf welchem neben einer allfälligen Weidenutzung Dürfutter gewonnen wird.
46	Günstige Alp- und Juraweiden	Dauernd beweidete alpwirtschaftliche Produktionsflächen, welche durch saisonale Betriebe (Alpen) oder Ganzjahresbetriebe mit saisonal bedeutend grösserem Viehbestand (Jura, Voralpen) bewirtschaftet werden.
47	Verbuschte Alp- und Juraweiden	Alpweideflächen, welche mit Gebüsch, Zwergsträuchern oder Jungbäumen mit einem DG der Verbuschung von 50–80% überwachsen und in ihrer Nutzung stark eingeschränkt sind.
48	Versteinte Alp- und Juraweiden	Alpweideflächen, welche vorwiegend durch Geröll oder anstehenden Fels in ihrer Nutzung stark eingeschränkt sind. Der DG der vegetationslosen Flächen liegt zwischen 50 und 80%.
49	Schafalpen	Abgelegene oder unwegsame Alpwirtschaftsflächen im Hochgebirge, welche entweder als Kleinviehweiden (Schafe, Ziegen) oder zur Heugewinnung (Wildheuplanggen) genutzt werden können.
50	Normalwald	Geschlossene, aus Waldbäumen bestehende Bestockungen mit einem minimalen Deckungsgrad (= DG) von 60% und einer Oberhöhe von mehr als 3 m.
51	Schmaler Wald	Geschlossene, aus Waldbäumen bestehende Bestockungen mit einer Breite von 25 bis 50 m, einem minimalen Deckungsgrad von 60% und einer Oberhöhe von mehr als 3 m.
52	Aufforstungen	Flächen, welche durch gezielte forstliche Massnahmen aus einer landwirtschaftlich genutzten oder unproduktiven Fläche in Wald überführt werden.
53	Holzschläge	Zum Zweck der Holznutzung grossflächig geschlagene oder aufgelichtete Baumbestände mit einem Deckungsgrad bis zu 60%.
54	Waldschäden	Waldflächen, welche aufgrund von Schadenereignissen (Windwurf, Waldbrand, Käferbefall) den ursprünglichen Deckungsgrad von 60% nicht mehr erreichen.
55	Aufgelöster Wald (auf Landwirtschaftsflächen)	Infolge landwirtschaftlicher Nutzung (Beweidung, Schnitt- oder Streuenutzung) nicht geschlossene Bestockungen über 3 m Höhe mit einer Mindestbreite von 50 m und einem DG von 20–60%..
56	Aufgelöster Wald (auf unproduktiven Flächen)	Auf Grund natürlicher Faktoren (Standort, Klima, Boden, Geologie) dauernd nicht geschlossene Bestockungen über 3 m Höhe mit einer Mindestbreite von 50 m und einem DG von 20–60%.
57	Gebüschwald	Ausgedehnte, homogene Bestockungen der Straucharten Alpenröhle, Legföhre, Hasel, Wachholder oder strauchförmiger Weiden mit 25 m Mindestbreite und einem minimalen DG von 60%.
58	Feldgehölze, Hecken	Isolierte, linienförmige Bestockungen aus Waldbäumen und Sträuchern im Kulturland- und Siedlungsbereich, mit einer Maximalbreite von 25 m und einer Oberhöhe von mehr als 3 m.
59	Baumgruppen (auf Landwirtschaftsflächen)	Nicht lineare Bestockungen aus Waldbäumen mit landwirtschaftlicher Unternutzung. Mindestens drei Bäume im Abstand von weniger als 25 m.
60	Baumgruppen (auf unproduktiven Flächen)	Stark aufgelöste Bestockungen aus Waldbäumen, vor allem im Berggebiet im Übergang zwischen Wald und unproduktiven Flächen. Mindestens 3 Bäume im Abstand von weniger als 25 m.

Code	Grundkategorie	Kurzdefinition
61	Stehende Gewässer	Dauernd oder jahreszeitlich von Wasser bedeckte offene Flächen von Seen, Stauseen und Teichen.
62	Wasserläufe	Dauernd oder jahreszeitlich von fliessenden Gewässern (Flüsse, Bäche, Kanäle) überflutete Flächen inklusive Geröll- und Geschiebebänke sowie künstliche Uferböschungen, ohne Trockenrinnen und Bäche von weniger als 6 m Breite im Wald.
63	Hochwasserverbauungen	Durch Wildbachsperrn verbaute Fliessgewässer sowie Anlagen, die der Geschiebeablagerung (Geschiebefänger) oder der Verhinderung von Überflutungen dienen (Hochwasserdämme, welche auch bestockt oder landwirtschaftlich genutzt sein können) .
64	Gebüsch, Strauchvegetation	Flächen von mindestens 625 m ² , welche überwiegend mit Gebüsch, Zwergstrauchvegetation oder einwachsenden Bäumen unter 3 m Höhe und mehr als 80 % Deckungsgrad der Verbuschung überwachsen sind.
65	Unproduktive Gras- und Krautvegetation	Vorwiegend mit Gras- oder Krautvegetation, Gebüsch und Geröll bedeckte Flächen ohne landwirtschaftl. Nutzung, meist im Übergangsbereich zwischen Alpweiden und Hochgebirge, wie abgelegene, nicht mehr genutzte Weiden, Bachtobel, Steilhänge oder Pioniervegetation in Lawinenschneisen und auf Erosionsflächen.
66	Lawinen- und Steinschlagverbauungen	Flächen, die der Verhinderung des Anrisses oder der Bremsung, Ablenkung und Schadensbegrenzung von Lawinen oder Steinschlag dienen; Priorität gegenüber anderen Nutzungen (Weide, Wald, Aufforstungen) .
67	Feuchtgebiete	Ungenutzte Flächen, welche unter dauerndem Wassereinfluss stehen wie Röhrichte, vernässte Stellen in Naturschutzgebieten, nicht landwirtschaftlich genutzte Flach- und Hochmoore. Dazu gehören auch Baumgruppen und Hecken.
68	Alpine Sportinfrastruktur	Für Ski- und Bergtourismus erstellte, permanente Installationen, Anlagen und Terrainveränderungen (Pistenplanierungen, Rodungen und Verbindungswege ohne Weidenutzung) im Alpenraum.
69	Fels	Vorwiegend mit anstehendem Fels bedeckte, zu über 80% vegetationslose Flächen.
70	Geröll, Sand	Vorwiegend mit Geröll, Sand oder Humus bedeckte, zu über 80% vegetationslose Flächen.
71	Landschaftseingriffe	Durch Bautätigkeit oder Erdbewegungen temporär beeinträchtigte Flächen, aus denen anschliessend keine Siedlungsnutzung hervorgeht, wie Renaturierungen von Fliessgewässern, Bau von Leitungen, Drainagen, Pistenplanierungen, Terrinaufschüttungen, Rebbergmeforationen, Waldstrassenbau (4. Klasse).
72	Gletscher, Firn	Überwiegend mit Eis oder ewigem Schnee bedeckte Flächen mit einer Mindestfläche von 0,25 ha und einem Deckungsgrad von mehr als 80% zum Zeitpunkt des grössten Ausaperungsgrades.

B Nomenklatur Vector25

Thematische Ebene	Beschreibung	Topologietypen	Anzahl Objektarten
Strassennetz	Strassen- und Wegnetz	Linie	35
Eisenbahnnetz	Eisenbahnnetz	Linie	9
Übriger Verkehr	Fähren, Seilbahnen usw.	Linie	5
Gewässernetz	Gewässerachsen und Uferlinien	Linie	13
Primärflächen	Primäre Bodenbedeckung (Wald, See, usw.)	Fläche, Linie	43
Gebäude	Diverse Gebäudearten	Fläche, Linie	13
Hecken und Bäume	Diverse Objektarten der Vegetation	Linie, Punkt	5
Anlagen	Künstliche Areale und Anlagen	Fläche, Linie	3
Einzelobjekte	Diverse künstliche Objektarten	Linie, Punkt	29
Total			155*

* Tendenz steigend

ObjectVal	Beschreibung (Objektart)
Z_BaumS	Baumschule
Z_Fels	Fels
Z_Fluss	Fluss
Z_Gebue	Gebüsch
Z_GerGeb	Geröll mit Gebüsch
Z_GerGle	Geröll auf Gletscher
Z_Geroel	Geröll
Z_GerWa	Geröll in Wald
Z_GerWaO	Geröll in offenem Wald
Z_Glet	Gletscher
Z_GsPist	Graspiste
Z_HaPist	Piste mit Hartbelag
Z_KiGrub	Kiesgrube
Z_LeGrub	Lehmgrube
Z_ObstAn	Obstanlage
Z_Reben	Reben
Z_See	See
Z_Siedl	Siedlung
Z_StauDa	Staudamm
Z_StauMa	Staumauer
Z_SteBru	Steinbruch
Z_SumGeb	Sumpf und Gebüsch
Z_Sumpf	Sumpf
Z_SumWa	Sumpf in Wald
Z_SumWaO	Sumpf in offenem Wald
Z_Uebrig	Übriges Gebiet
Z_Wald	Wald
Z_WaldOf	Wald offen

ObjectVal	Beschreibung (Objektart)
Z_Gebaeude	Gebäude / Einzelhaus
Z_Innenhof	Innenhof
Z_Gasthof	Abgelegener Gasthof
Z_Huette	Hütte
Z_Kirche	Kirche
Z_Kuehlturm	Kühlturm
Z_Lagertank	Lagertank
Z_Perron	Perrondach
Z_Schiesstand	Schiesstand, Schützenhaus
Z_Schloss	Schloss, Burg
Z_Station	Station / ÖV Haltestelle
Z_Treibhaus	Treibhaus
Z_WBecken	Wasserbecken (Schwimmbäder, ARA)

ObjectVal	Beschreibung (Objektart)
Z_BhArea	Bahnhofareal
Z_FlArea	Flughafenareal
Z_FlugBh	Flughafenbahnhofareal

Persönliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und die den verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Zürich, 30.09.2013

Reto Wick