

ZEITLICHE MULTISKALEN-ANALYSE VON BEWEGUNGSDATEN

MASTERARBEIT GEO 511

Februar 2011 bis Januar 2012

Alexandra Zeiler

Matrikelnr.: 05720339

Betreut von:

Prof. Dr. Ross Purves & Dr. Patrick Laube

Geographische Informationssysteme

Fakultätsvertreter:

Prof. Dr. Ross Purves

Geographisches Institut Universität Zürich

Winterthurerstrasse 190

CH-8057 Zürich

Zusammenfassung

Die Möglichkeit, mit GPS-Aufnahmeggeräten grosse Mengen an Informationen über die Bewegung von verschiedenen Objekten zu gewinnen, wird in der Forschung in vielen Bereichen genutzt, um das Bewegungsverhalten von Tieren und Personen zu untersuchen. Die zeitliche Skala wird dabei teilweise variiert, die Wahl der Skala beruht aber meist auf Vermutungen und Annahmen über skalenspezifische Verhaltensweisen. Der Einfluss und die Möglichkeiten explorativer Multiskalen-Analysen werden somit nur selten beachtet und genutzt.

In dieser Arbeit wurde eine explorative Multiskalen-Analyse Methode definiert und an zwei Datensätzen in insgesamt fünf Experimenten auf die Bewegungsparameter *Geschwindigkeit*, *Beschleunigung*, *Richtungsänderung* und *Gewundenheit* angewendet. Dabei enthielt der erste Datensatz Fussgänger-Bewegungen in einem eingeschränkten Raum und der zweite Datensatz die Bewegung von Tauben-Flügen in einem freien Raum.

Im ersten Experiment wurde der Einfluss des Map Matchings auf die Bewegungsparameter auf verschiedenen zeitlichen Skalen untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass der Einfluss auf kleinen Skalen grösser ist, dass Unsicherheiten in den Daten auf ebenfalls kleinen Skalen einen grossen Einfluss haben und dass bei den gegebenen Daten eine zeitliche Skala von 60 Sekunden existiert, ab welcher der Einfluss der Struktur des Strassennetzes dominierend ist.

Im zweiten Experiment wurde der Einfluss der zeitlichen Skala auf die Bewegungsparameter der Tauben-Daten untersucht. Es konnte dabei beobachtet werden, dass die Geschwindigkeit sowie die Beschleunigung auf grösseren Skalen abnehmen und daraus gefolgert werden, dass dieser Effekt durch die Art der Berechnung und der damit verbunden Unterschätzung der Distanz zu erklären ist.

Im dritten Experiment wurde die zeitliche Abhängigkeit der Bewegungsparameter der Tauben-Daten auf verschiedenen zeitlichen Skalen analysiert. Dabei wurde erkannt, dass bis zu einer Skala von 60 Sekunden die Unsicherheiten in den Daten die Parameter entscheidend beeinflussen und es deshalb nicht möglich ist, sinnvolle Aussagen über das Bewegungsverhalten zu machen. Zudem konnten Bewegungsereignisse erkannt und Rückschlüsse auf ihre zeitliche Phänomen-Skala gezogen werden.

Im vierten Experiment wurden das Lernverhalten der Tauben, die Ähnlichkeiten der Parameter zwischen einzelnen Tauben sowie die Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Skalen untersucht. Dabei konnten vor allem Hypothesen über Hindernisse und räumliche/strukturelle Gebiete, welche das Bewegungsverhalten beeinflussen, gemacht werden.

Im letzten Experiment wurde untersucht, ob zwischen der Wegtreue und einem

der Bewegungsparameter ein Zusammenhang besteht und ob dieser auf einer bestimmten zeitlichen Skala am deutlichsten sichtbar ist. Durch die ausgeführte Multiskalen-Analyse konnte kein Zusammenhang erkannt werden.

Folgende Potentiale von zeitlichen Multiskalen-Analysen konnten beobachtet werden: Die Möglichkeit der Erkennung von Skaleneffekten und Veränderungen über verschiedene Skalen sowie die Möglichkeit der Identifikation von skalen-abhängigen Eigenschaften, Phänomenen und Verhalten. Als generelle Schwierigkeiten wurden beobachtet: Der Umgang mit grossen Informationsmengen, das Wegfallen der ersten und letzten Parameter bei grösser werdenden Skalen mit der gewählten Methode sowie der Einfluss der Datenqualität und der Art der Berechnung.

Allgemein konnte festgestellt werden, dass im Bereich der Geographie theoretische und methodische Konzepte im Zusammenhang mit zeitlichen Multiskalen-Analysen fehlen und dass diesbezüglich weitere Arbeit nötig ist.

Abstract

The possibility to win a large amount of information about the movement of various objects with GPS recording equipment is used in many research fields to determine the movement behavior of animals and people. By doing so the temporal scale is sometimes varied but the choice of scale is mostly based on assumptions about scale-specific behaviors. The impact and the possibilities of exploratory multi-scale analysis are therefore only seldom taken into account and used.

In this work an exploratory temporal multi-scale analysis method was defined and applied at two data sets in altogether five experiments to the movement parameters *speed*, *acceleration*, *turningangle* and *sinuosity* (i.e. *straightness*).

The first dataset contained the movement of pedestrians in a constrained space and the second data set contained the movement of pigeon-flights in a free space.

In the first experiment the impact of Map Matching on the movement parameters was examined on different temporal scales. It was determined, that the influence is bigger on small scales, that uncertainties in the data have also a bigger influence on small scales and that, with respect to the given data, a temporal scale of 60 seconds exists, on which the impact of the structure of the street-network is dominating. It was found, that the influence is bigger on small scales, that uncertainties in the data have also a bigger influence on small scales and that, with respect to the given data, a temporal scale of 60 seconds exists, on which the impact of the structure of the street-network is dominating.

In the second experiment the impact of the temporal scale on the movement parameters of the pigeon-data was examined. It could be observed, that speed and acceleration decreased on bigger scales. In addition the conclusion could be drawn that this effect is explained by the method of calculation and the associated underestimation of distance.

In the third experiment the temporal dependence of the movement parameters of the pigeon-data was analyzed on different temporal scales. It was recognized, that the uncertainties decisively influence the parameters up to a scale of 60 seconds in the data and therefore it is not possible to make reasonable statements about the movement behavior. Moreover, movement events could be recognized and inferences on the temporal phenomenon scale could be drawn.

In the fourth experiment the learning behavior of pigeons, similarities of the parameters between single pigeons as well as similarities between different scales were examined. Primarily hypotheses on obstacles and spatial/structural areas, which influence the movement behavior, could be made.

In the last experiment, it was examined, whether there is a correlation between the

path fidelity and one of the movement parameters and if this is the clearest on a certain temporal scale. Using the multiscale-analysis, no correlation could be found.

The following potentials of temporal multi-scale analysis were found: The possibilities to identify scale effects and changes over different scales as well as the possibility to identify scale dependent characteristics, phenomena and behaviors.

Difficulties have been considered: dealing with large amounts of information, eliminating the first and last parameters at increasing scales with the chosen method and the influence of the data quality and type calculation.

Generally it was found, that in the field of geography, there is a lack of theoretical and methodical concepts related to temporal multi-scale-analysis and that further research in this area is required.

Dank

Ich bedanke mich bei meinen beiden Betreuern **Patrick Laube** und **Ross Purves** für ihre ausserordentliche Betreuung, für ihre Anregungen und Ideen, ihre konstruktive Kritik, die interessanten Diskussionen und ihre motivierenden Worte. Weiter möchte ich mich bei **Robin Freeman** für das interessante Gespräch und seine Bereitschaft, die Tauben-Daten für diese Arbeit zur Verfügung zu stellen, bedanken. Ebenfalls bedanke ich mich bei **Stefan van der Spek** dafür, dass er die Fussgänger-Daten für diese Arbeit zur Verfügung gestellt hat.

Bei **Sara Fabrikant** und **Somayeh Dodge** bedanke ich mich dafür, dass sie sich für das Feedback Komitee bei meiner Konzept-Präsentation zur Verfügung gestellt haben und für die damit verbundenen hilfreichen Anmerkungen und Hinweise.

Bei **Christian Gschwend** bedanke ich mich für interessante, kritische sowie anregende Gespräche „zwischen Tür und Angel“.

Ich bedanke mich herzlich bei meinem Bruder **Christian Zeiler** für seine Unterstützung, seine Kritik und unsere interessanten Dienstags-Diskussionen.

Meinem Vater **Karlheinz Zeiler** danke ich von Herzen für die Kommas und fehlenden oder überflüssigen Buchstaben, für die aufmunternden Worte und seine allgemeine Unterstützung während des gesamten Studiums.

Bei **Karin Keller** und **Carmen Zeiler** bedanke ich mich für die Hilfe beim Übersetzen sowie bei **Sabrina Stefanelli** für die Durchsicht der Arbeit.

Ich bedanke mich herzlich bei **Ruth Ledergerber** für ihre Zuversicht, ihre Unterstützung und den Beistand in schwierigen Situationen.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
1.1 Kontext und Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung und Fragestellung.....	3
1.3 Gliederung.....	3
2 Hintergrund.....	5
2.1 Bewegung von Punktobjekten.....	5
2.1.1 Bewegung.....	5
2.1.2 Räume.....	8
2.1.3 Praktische Probleme	8
2.2 Skala.....	10
2.3 Forschungs- und Anwendungsbereiche von Multiskalen-Analysen.....	10
2.3.1 Biologie und Ökologie.....	11
2.3.2 GIS.....	13
2.4 Forschungslücken.....	15
3 Methodik.....	17
3.1 Wahl der Bewegungsparameter.....	17
3.2 Berechnung der Bewegungsparameter.....	18
3.3 Berechnung der Bewegungsparameter auf mehreren zeitlichen Skalen...	21
3.3.1 Multiskalen-Analyse-Methode.....	21
3.3.2 Nachteile der gewählten Multiskalen-Analyse-Methode.....	22
3.4 Darstellung.....	24
3.5 Implementierung.....	27
4 Daten.....	28
4.1 Fussgänger-Daten.....	28
4.2 Kartendaten.....	30
4.3 Tauben-Daten.....	32
5 Aufbereitung der Daten und qualitative Beurteilung der Aufbereitung.....	34
5.1 Fussgänger-Daten.....	34
5.1.1 Aufbereitung.....	34
5.1.2 Qualitative Beurteilung.....	37
5.1.2.1 Filterung.....	37
5.1.2.2 Strassennetz.....	40
5.1.2.3 Map Matching.....	40
5.2 Tauben-Daten.....	42
5.2.1 Aufbereitung.....	42
6 Experimente.....	43
6.1 Fussgänger.....	43
6.1.1 Vergleich der Parameter der gematchten und Original-Daten auf	

verschiedenen zeitlichen Skalen.....	43
6.2 Tauben.....	44
6.2.1 Einfluss der zeitlichen Skala auf die Bewegungsparameter	44
6.2.2 Zeitliche Abhängigkeit der Bewegungsparameter auf verschiedenen Skalen	44
6.2.3 Lernverhalten der Tauben, Ähnlichkeiten der Parameter zwischen ein- zelnen Tauben sowie Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Skalen.....	45
6.2.4 Zusammenhang zwischen Wegtreue und einzelnen Bewegungsparametern auf verschiedenen Skalen.....	45
7 Resultate und Interpretation.....	47
7.1 Fussgänger-Daten.....	47
7.1.1 Vergleich der Parameter der Original-GPS-Daten mit den gematchten Daten auf verschiedenen zeitlichen Skalen.....	47
7.2 Tauben-Daten.....	55
7.2.1 Einfluss der zeitlichen Skala auf die Bewegungsparameter.....	56
7.2.2 Zeitliche Abhängigkeit der Bewegungsparameter auf verschiedenen Skalen.....	59
7.2.3 Ähnlichkeiten der Parameter zwischen einzelnen Tauben, Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Skalen sowie Lern-verhalten.....	62
7.2.4 Zusammenhang zwischen Wegtreue und einzelnen Bewegungsparametern auf verschiedenen Skalen.....	68
8 Diskussion.....	71
8.1 Datenaufbereitung.....	71
8.2 Wahl der Bewegungsparameter und Methode zur Durchführung der Multiskalen-Analyse.....	74
8.2.1 Parameterwahl.....	74
8.2.2 Methoden-Wahl.....	75
8.3 Potentiale und Schwierigkeiten der zeitlichen Multiskalen-Analyse.....	76
8.4 Vergleich der Experimente.....	77
9 Schlussfolgerungen.....	82
9.1 Erreichtes.....	82
9.2 Erkenntnisse.....	84
9.3 Ausblick.....	85
Literaturverzeichnis.....	87
A. Anhang.....	92
B. Persönliche Erklärung.....	97

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematisches Beispiel für Relevanz der zeitlichen Skala.....	2
Abbildung 2: Modelle der sechs, für Punktbewegungen relevanten, Basisräume. (a) Euklidischer homogener Raum, (b) eingeschränkter euklidischer Raum, (c) Raum-Zeit Aquarium, (d) heterogener Feld-Raum, (e) irreguläres Mosaik, (f) Netzwerkraum (Laube, 2009).....	9
Abbildung 3: Identifikation der Bewegungsdomänen einer Hirschmaus (<i>Peromyscus maniculatus</i>) (Nams, 2005)	12
Abbildung 4: Die morphometrische Klasse in einem Punkt (gekennzeichnet mit einem vertikalen Pfeil) ändert sich mit der Skala, über welche gemessen wird (Fisher et al, 2004).....	13
Abbildung 5: Boxplots der Geschwindigkeit, der Richtungsänderung und der Gewundenheit für mehrere zeitliche Skalen. (Laube und Purves, 2011).....	15
Abbildung 6: Methoden zur Berechnung der Richtungsänderung und der Gewundenheit.....	18
Abbildung 7: Berechnungsfenster als Mass für die zeitliche Skala.....	21
Abbildung 8: Beispiel für den theoretischen Einfluss des gewählten Skalen- Ansatzes auf die Anzahl Aufnahmepunkte, für welche ein Parameterwert pro Skala berechnet werden kann.....	22
Abbildung 9: Einfluss des Startpunktes bei der Erstellung von Subsamples	23
Abbildung 10: Elemente eines Box Plots (nach Stahel, 2002).....	25
Abbildung 11: Sternplot.....	26
Abbildung 12: Schema der Anordnung der Small Multiples.....	26
Abbildung 13: Screenshot eines Ausschnittes der Java Dokumentation.....	27
Abbildung 14: Beispiel der Beschreibung eines Aufnahmepunktes im GPX- Format.....	29
Abbildung 15: alle Aufnahmepunkte der Fussgängerbewegungen.....	29
Abbildung 16: Beispiel der Beschreibung eines Netzknotens sowie eines Weges im OSM-Format.....	31
Abbildung 17: Flüge aller Tauben.....	32
Abbildung 18: Ungefilterte Fussgänger-Daten.....	38
Abbildung 19: Gefilterte Fussgänger-Daten.....	38
Abbildung 20: Delft Strassennetz (nur Strassen).....	38
Abbildung 21: Delft Strassennetz (flächenhaft).....	38
Abbildung 22: Resultat des Map Matchings.....	39
Abbildung 23: Map Matching bei parallelen Strassen.....	39
Abbildung 24: Ecken-Problem beim Map Matching.....	39

Abbildung 25: Aufnahmepunkte der 16 "guten" Trajektorien.....	41
Abbildung 26: Schematische Darstellung einer Rückprojektion.....	48
Abbildung 27: Differenzen der Mittelwerte der Geschwindigkeit.....	50
Abbildung 28: Differenzen der Mediane der Geschwindigkeit.....	50
Abbildung 29: Differenz der Mittelwerte der Beschleunigung.....	50
Abbildung 30: Differenz der Mediane der Beschleunigung.....	50
Abbildung 31: Differenz der Mittelwerte der Richtungsänderung.....	50
Abbildung 32: Differenz der Mediane der Richtungsänderung.....	50
Abbildung 33: Differenzen der Mittelwerte der Gewundenheit.....	50
Abbildung 34: Differenzen der Mediane der Gewundenheit.....	50
Abbildung 35: Bewegungsparameter der original GPS-Daten.....	51
Abbildung 36: Bewegungsparameter der ans Netzwerk angepassten Daten.....	52
Abbildung 37: Verteilung der Richtungsänderungen in den Original-Daten.....	54
Abbildung 38: Original Aufnahmepunkte.....	54
Abbildung 39: Verteilung der Richtungsänderungen in den gematchten Daten...	54
Abbildung 40: Gematchte Aufnahmepunkte.....	54
Abbildung 41: Verhältnis zwischen zurückgelegten Strecke durch alle vorhanden Aufnahmepunkte und bei einem grösseren Berechnungsfenster.....	55
Abbildung 42: Boxplots der vier Bewegungsparameter der fünf Flüge der Taube rwt auf acht zeitlichen Skalen.....	57
Abbildung 43: Verteilung der Richtungsänderungen im 5. Flug der Taube rwt...	58
Abbildung 44: Flüge der Taube rwt.....	58
Abbildung 45: Einfluss des Fehlers in der Position auf die Bestimmung der Distanz zwischen zwei Punkten.....	59
Abbildung 46: Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeit auf fünf zeitlichen Skalen.....	61
Abbildung 47: Beschleunigung in Abhängigkeit der Zeit auf fünf zeitlichen Skalen.....	61
Abbildung 48: Richtungsänderung in Abhängigkeit der Zeit auf fünf zeitlichen Skalen.....	61
Abbildung 49: Gewundenheit in Abhängigkeit der Zeit auf fünf zeitlichen Skalen	61
Abbildung 50: Small Multiples der Geschwindigkeit für fie Flüge von vier Tauben	64
Abbildung 51: Small Multiples der Beschleunigung für die Flüge von vier Tauben	65
Abbildung 52: Small Multiples der Richtungsänderung für die Flüge von vier Tauben.....	66
Abbildung 53: Small Multiples der Gewundenheit für die Flüge von vier Tauben	

.....	67
Abbildung 54: Mittelpfad der Taube a29.....	69
Abbildung 55: Mittelpfad der Taube a99.....	69
Abbildung 56: Mittelpfad der Taube b17.....	69
Abbildung 57: Mittelpfad der Taube liv.....	69
Abbildung 58: Wegtreue-Werte der einzelnen Tauben.....	70
Abbildung 59: Boxplots der Bewegungsparameter aus allen fünf Flügen der Tauben a29, a99, b17 und liv.....	70
Abbildung 60: schematische Darstellung des Map Matching Problems bei fehlenden Strassen.....	72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bewegungsparameter gruppiert nach momentgebundenen und globalen Charakteristiken (nach Andrienko et al., 2008b, ergänzt nach Laube et al., 2007).	6
Tabelle 2: Berechnung der relevanten Bewegungsparameter.....	20
Tabelle 3: Einfluss des Startpunkts auf den Mittelwert der Parameter.....	23
Tabelle 4: Einfluss des Ecken-Problems auf die Richtungsänderung sowie die Geschwindigkeit.....	39
Tabelle 5: Eigenschaften der Pigeon- und Flight-Klassen.....	42

1. Einleitung

1.1 Kontext und Motivation

Die Verfügbarkeit von Bewegungsdaten hat durch die Entwicklung kleinerer, günstigerer und einer breiten Masse zugänglicher GPS-Aufnahmegaräte in den letzten Jahren massiv zugenommen. In Bezug auf die Forschung ermöglicht dies - sowohl technisch als auch ökonomisch - das Bewegungsverhalten von realen Objekten, welche sich im geographischen Raum bewegen, besser zu untersuchen. Im Bereich der Biologie kann das Bewegungsverhalten von Tieren über einen grossen Zeitraum hinweg und mit relativ geringem Aufwand erfasst und untersucht werden (z.B. Webb et al., 2009). Die Möglichkeit das Bewegungsverhalten von Personen in einem grösseren Kontext zu untersuchen, ermöglicht ein besseres Verständnis Handlungen im Raum und die Wahrnehmung des Raumes. So beschäftigen sich Dias et al. (2007) beispielsweise mit der Frage, wie Bewegungstrajektorien mehrerer Besucher eines National Parks dazu genutzt werden können, um das Verhalten der Besucher zu untersuchen.

Die Forschung im Bereich von Skalen hat im Bereich der Geographie eine lange und bedeutende Tradition. Watson (1978) schreibt: „[...] scale is a „geographic“ variable almost as sacred as distance“. In Bezug auf die räumliche Skala ist in der Studie von Fisher et al. (2004) beeindruckend dargestellt, dass durch die Änderung der Analyse-Skala völlig verschiedene und teilweise sogar gegensätzliche Landschafts-Phänomene wie Erhebungen und Täler beobachtet werden können. Dabei kann keines der identifizierten Phänomene generell als falsch oder richtig klassifiziert werden. Die Skala ist entscheidend! Nun ist das ein Beispiel für die Wichtigkeit der räumlichen Analyse-Skala. In dieser Arbeit steht aber die zeitliche Skala im Fokus. Deshalb ein reales Beispiel aus meinem Leben über den Weg von meinem Zuhause bis in die Universität: Die ersten 5 Minuten gehe ich zu Fuss bis zur Haltestelle der SZU. Die Fahrt bis zum Hauptbahnhof dauert 9 Minuten. Anschliessend muss ich von den Gleisen zu Fuss zu den Tramhaltestellen, was ca. 3 Minuten benötigt und dort ca. 5 Minuten warten bis das nächste Tram kommt. Die Fahrt zur Universität dauert ca. 12 Minuten, der anschliessende Weg zur Uni zu Fuss noch ca. 10 Minuten (Abbildung 1). Der gesamte Weg dauert somit ca. 44 Minuten und es werden drei unterschiedliche Fortbewegungsmittel mit drei verschiedenen Geschwindigkeiten verwendet. Betrachtet man nun die Bewegung auf der grösstmöglichen Skala, komme ich in 44 Minuten von zuhause in die Uni. Ob ich dabei verschiedene Fortbewegungsmittel verwendet habe, ich zwischendurch angehalten habe oder wie die Geometrie des Weges aussieht, kann auf dieser Skala nicht bestimmt wer-

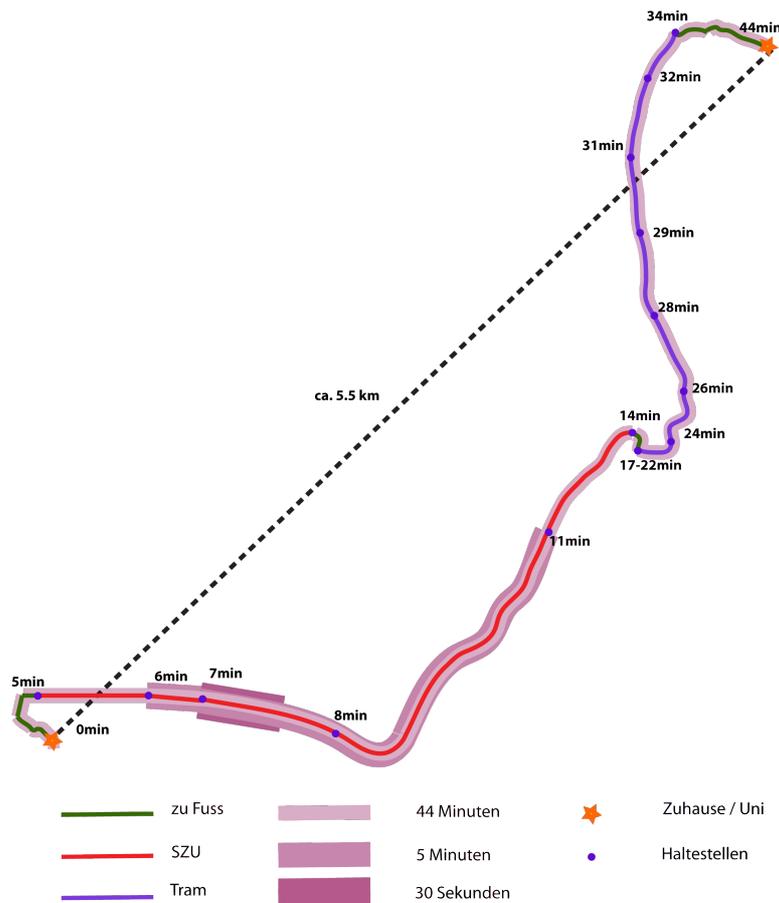


Abbildung 1: Schematisches Beispiel für Relevanz der zeitlichen Skala

den Auf einer Skala von 5 Minuten wird erkennbar, dass ich verschiedene Fortbewegungsmittel mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten benutze und sich die Richtungen der Bewegung ändern. Auf einer Skala von 30 Sekunden wären die Richtungsänderungen im Mittel eher klein, da ich mich innerhalb von 30 Sekunden mehrheitlich geradeaus bewege. Die Geschwindigkeit würde stärker variieren und auch Stopps an Haltestellen wären zu erkennen, dafür wäre es schwieriger, den Wechsel zwischen den Verkehrsmitteln zu erkennen.

Dieses Beispiel soll zeigen, dass auf verschiedenen zeitlichen Analyse-Skalen unterschiedliche Aussagen über das Bewegungsverhalten gemacht werden können. Deshalb kann an dieser Stelle noch einmal festgehalten werden: die Skala ist entscheidend!

Im Bereich der Geographischen Informationswissenschaft wurde in den letzten Jahren viel Forschung an Bewegungsdaten betrieben. Diese konzentrierte sich jedoch stark auf den Umgang mit grossen Datenmengen und deren Komplexität (z.B. Spaccapietra et al. 2007), deskriptive Trajektorienanalysen (z.B. Laube et al. 2007), Aggregationsmethoden (z.B. Andrienko und Andrienko 2008), die

Erkennung von Bewegungsmuster (z.B. Laube 2009) sowie auf visuelle Analysemethoden (z.B. Andrienko et al. 2008a).

Vor allem im Bereich der Biologie werden in vielen Studien zwar verschiedene Bewegungsparameter über mehrere zeitliche Skalen analysiert (z.B. Fryxell et al. 2008), die Wahl der Skalen ist jedoch in den meisten Fällen „nur“ ein Resultat aus Vorwissen oder Annahmen über bekanntes, skalenspezifisches Bewegungsverhalten. Die Effekte, welche unterschiedliche Zeitskalen mit sich bringen, wie beispielsweise die Unterschätzung der Distanz auf grösseren Skalen wird selten berücksichtigt. Die Potentiale explorativer zeitlicher Multiskalen-Analysen, wie beispielsweise das Erkennen eines unerwarteten skalenspezifischen Verhaltens, wurden ebenfalls kaum untersucht beziehungsweise genutzt.

1.2 Zielsetzung und Fragestellung

Das Ziel dieser Arbeit ist, für eine Auswahl von Bewegungsparametern anhand von Experimenten die Potentiale und Schwierigkeiten bei zeitlichen Multiskalen-Analysen zu identifizieren sowie zu untersuchen, welche neuen Erkenntnisse mit Hilfe der zeitlichen Multiskalen-Analyse aus den Daten gewonnen werden können. Zu diesem Zweck sollen die folgenden drei Fragestellungen beantwortet und diskutiert werden:

- 1. Wie kann man für eine Auswahl von Bewegungsparametern eine zeitliche Multi-Skalen Analyse durchführen?*
- 2. Worin liegen die Potentiale, respektive die Schwierigkeiten bei zeitlichen Multiskalen-Analysen?*
- 3. Wie kann der Einfluss der gewählten zeitlichen Skala auf die Bewegungsparameter mit Hilfe einer Multiskalen-Analyse genutzt werden, um neue Erkenntnisse über die Daten zu gewinnen?*

1.3 Gliederung

Der Rest der Arbeit ist wie folgt gegliedert. In Kapitel 2 werden der Hintergrund in Bezug auf Bewegungsanalysen, den Skalenbegriff, Räume sowie relevante Studien dargelegt. Im dritten Kapitel wird die in der Arbeit verwendete Methodik beschrieben. Das Kapitel 4 beinhaltet Informationen über die verwendeten Daten und das Kapitel 5 beschäftigt sich mit der Aufbereitung dieser Daten. Im Kapitel 6 werden die durchgeführten Experimente beschrieben und im darauffolgenden

1.3 Gliederung

Kapitel 7 die daraus erhaltenen Resultate dargestellt und interpretiert. Im Kapitel 8 werden die Resultate der Datenaufbereitung sowie der Experimente diskutiert. Schliesslich werden im Kapitel 9 die Schlussfolgerungen, welche aus dieser Arbeit gezogen werden können, dargestellt.

2 Hintergrund

Für die Betrachtung und Analyse von Bewegungsdaten auf einer zeitlich multiskalaren Ebene sind Erkenntnisse und Forschungsarbeiten aus verschiedenen Gebieten von Relevanz. Die generelle Forschung an Bewegungsdaten im Bereich der Geographischen Informationswissenschaft ist eine wesentliche Grundlage um mit Bewegungsdaten arbeiten zu können. Für das Verständnis von Multiskalen-Analysen ist die Auseinandersetzung mit dem Skalenbegriff notwendig. Schliesslich sind räumliche sowie raum-zeitliche Multiskalen-Forschungen und -Studien aus den Bereichen Biologie und Ökologie sowie aus dem Bereich GIS von Bedeutung.

Ziel dieses Kapitels ist es, einen Überblick über relevante Aspekte der Bewegungsforschung an sich zu vermitteln, eine kurze Auseinandersetzung mit dem Skalenbegriff sowie anhand einiger Studien, welche multiskalare Analysen beinhalten, aufzuzeigen, in welchem Zusammenhang und mit welchem Ziel Multiskalen-Analysen bisher durchgeführt wurden. Schliesslich soll es möglich sein, die vorhandenen Forschungslücken zu identifizieren.

2.1 Bewegung von Punktobjekten

Im Folgenden wird auf Bewegungen im Allgemeinen, auf Räume, in welchen sich Objekte bewegen können sowie auf damit verbundene praktische Probleme eingegangen.

2.1.1 Bewegung

Bewegungsdaten haben gemeinsam, dass es sich dabei um aneinandergereihte Aufnahmewerte der räumlichen und zeitlichen Dimension handelt, welche die Bewegung in Form einer Trajektorie beinhalten (Weibel, 2008). Typischerweise beinhalten Bewegungen somit räumliche sowie zeitliche Elemente (Hornsby und Egenhofer, 2002).

Sofern nur die Position und nicht die flächenhafte Ausdehnung eines Objektes relevant ist, kann das Objekt für die Analyse der Bewegung als Punktobjekt betrachtet werden (Pfoister et al., 2000). Wenn in dieser Arbeit von der Bewegung eines Objektes gesprochen wird, bezieht sich diese auf die Änderung der physikalischen Position im zweidimensionalen geographischen Raum (Andrienko et al., 2008b). Das heisst, sich bewegende Objekte werden als Einheiten gesehen, welche ihre Position über die Zeit ändern (Dodge et al., 2009). Die Position eines sich bewegenden Objektes ist zu jeder Zeit gegeben durch ein Tupel (x, y, t) , wobei

2.1.1 Bewegung

	Charakteristik		Beschreibung
moment-gebunden	Zeit		Position des Moments auf der Zeitachse
	Position		Position des Objektes im Raum
	Richtung		Richtung der Bewegung des Objektes
	Geschwindigkeit		Geschwindigkeit der Bewegung (entspricht null, wenn sich das Objekt nicht bewegt)
	Richtungsänderung		Drehung
	Änderung der Geschwindigkeit		Beschleunigung
	Kumulierte "Reise-"Zeit		Benötigte Zeit
	Kumulierte Distanz		Zurückgelegte Distanz
global	geometrische Form		Form der Trajektorie im Raum
	zurückgelegte Distanz		Länge der Trajektorie im Raum
	Dauer		zeitliche Dauer der Trajektorie
	Bewegungsvektor		Vektor zwischen Anfangs- und Endposition (Haupttrichtung)
	Mittel, Median und Maximum der Geschwindigkeit		
	Gewundenheit (Laube et al., 2007)		Gewundenheit der Trajektorie
	Dynamisches Verhalten der Geschwindigkeit	Perioden	Perioden mit konstanter Geschwindigkeit, Beschleunigung, Verlangsamung, Stillstand
		Charakteristiken der Perioden	Start- und Ende der Zeit, Position, Geschwindigkeit, Dauer, etc.
		Anordnung	Anordnung der Perioden in der Zeit
	Dynamischen Verhalten der Richtung	Perioden	Perioden mit gerader, gekrümmter, zirkulärer Bewegung
		Charakteristiken der Perioden	Start- und Endzeit/-Position/-Richtung, Haupttrichtung, Winkel und Radien der Kurven, etc.
		Hauptdrehungen	Drehpunkte mit Zeit, Position, Winkel, Anfangs- und Endrichtung, Geschwindigkeit im Moment der Drehung
		Anordnung	Anordnung der Perioden und Drehpunkte in der Zeit

Tabelle 1: Bewegungsparameter gruppiert nach momentgebundenen und globalen Charakteristiken (nach Andrienko et al., 2008b, ergänzt nach Laube et al., 2007)

sich x und y auf die räumlichen Koordinaten und t auf die entsprechende Zeit beziehen (Laube, 2009). Eine Trajektorie kann dann als eine Menge aus aufeinanderfolgenden Positionen im geographischen Raum betrachtet werden, welche ein Objekt innerhalb einer Zeitperiode belegt. Die Daten einer Trajektorie bestehen dabei aus diskreten raum-zeitlichen Beobachtungen, welche die Position des Objektes im geographischen Raum in regelmässigen oder unregelmässigen Zeitintervallen beschreiben (Mark und Egenhofer, 1998). Trajektorien können somit als Zeitserien von räumlichen Daten gesehen werden (Dodge et al., 2009). Durch die Verbindung der einzelnen Positionen kann die Geometrie der Bewegung repräsentiert werden (Pfoister et al., 2000). Um das Bewegungsverhalten eines Objektes analysieren und beschreiben zu können, ist es notwendig, abgeleitete Bewegungscharakteristiken aus der Trajektorie zu extrahieren (Dodge et al., 2009). Andrienko et al. (2008b) gruppieren die wichtigsten dieser Parameter in momentgebundene Charakteristiken, welche die Bewegung zu einem bestimmten Zeitpunkt beschreiben sowie in globale Charakteristiken, welche die Bewegung über ein Zeitintervall hinweg beschreiben. Tabelle 1 gibt eine Übersicht der wichtigsten Bewegungsparameter sowie darüber, wie diese gruppiert werden können.

Laube et al. (2007) unterscheiden bei der Beschreibung einer Trajektorie durch Bewegungsparameter etwas detaillierter zwischen *lokalen*, *fokalen*, *Intervall-*, *zonalen* sowie *globalen* Kontextoperatoren. Dabei wird der betreffende Bewegungsparameter bei *lokalen* Operatoren zu einem infinitesimalen zeitlichen Moment abgeleitet und bei *fokalen* Operatoren wird ein bewegliches Berechnungsfenster verwendet um ein fixes Segment der Trajektorie zu untersuchen. Bei *zonalen* Operatoren wird die Trajektorie in Abschnitte unterteilt und jedem Abschnitt ein Parameterwert zugeordnet. Bei *globalen* Operatoren wird der gesamten Trajektorie ein Parameterwert zugewiesen. Ein Problem, welches im Zusammenhang mit der Beschreibung und Analyse von Bewegungstrajektorien mit Hilfe von Bewegungsparametern auftritt, ist, dass für viele der Parameter mehrere Berechnungsmöglichkeiten, einschliesslich variierender Parameter wie Intervalllängen oder Gewichtungsfaktoren existieren (Laube et al., 2007).

Vor allem im Zusammenhang mit der Bestimmung der Gewundenheit einer Trajektorie wurden verschiedene Masse entwickelt. Dazu gehören der *sinuosity Index*, die *fraktale Dimension* und der *straightness Index* (Benhamou, 2004). Der *sinuosity Index* kombiniert den mittleren Kosinus der Richtungsänderung mit der mittleren Schrittlänge (Benhamou, 2004). Die *fraktale Dimension* ist eine positive reelle Masszahl, welche die Rauigkeit, Kompliziertheit, Irregularität oder den

Raumbedarf eines Fraktales beschreibt (Kircher und Schneider, 2002). Der *straightness Index* vergleicht die Länge der Luftlinie mit der Länge des effektiv zurückgelegten Weges.

2.1.2 Räume

Da Bewegung, so wie sie in dieser Arbeit verstanden wird, immer in einem physikalischen Raum stattfindet, sind die Eigenschaften dieses Raumes ein wichtiger, die Bewegung beeinflussender Faktor. Um ein besseres Verständnis über den Einfluss des Raumes auf die Bewegung zu erhalten, muss zuerst zwischen verschiedenen Räumen unterschieden werden. Laube (2009) hat in seiner Arbeit sechs Räume unterschieden, welche für Bewegungsmuster relevant sind: der *homogene euklidische Raum*, der *eingeschränkte Raum*, der *Raum-Zeit Kubus*, der *heterogene Feld-Raum*, das *irreguläre Mosaik* und der *Netzwerkraum* (Abbildung 2).

In Bezug auf diese Arbeit sind jedoch nur der homogene euklidische Raum, der eingeschränkte Raum sowie der Netzwerkraum von Bedeutung.

Der homogene euklidische Raum beschreibt einen merkmalslosen Raum. Das Objekt, welches sich in diesem Raum bewegt, wird somit durch keine Hindernisse oder Einflüsse beeinträchtigt und eine Trajektorie kann als einfache Serie aus linearen Schritten dargestellt werden, welche zwei Aufnahmepunkte miteinander verbinden. Der eingeschränkte Raum enthält im Gegensatz zu letzterem Einschränkungen dazu, wo sich Objekte bewegen können und wo nicht. Netzwerkräume bestehen aus einer Menge von Kanten und Knoten, auf welchen sich die Objekte bewegen können.

2.1.3 Praktische Probleme

Die Positionen eines Objektes, welche durch ein GPS bestimmt werden, sind oft fehlerbehaftet (Ochieng et al., 2009). Bewegungsparameter, welche anhand fehlerhafter Positionen berechnet werden, können verfälscht werden und so zu einem falschen, scheinbaren Verständnis über das Bewegungsverhalten führen. In einem homogenen euklidischen Raum, in welchem keine zusätzlichen Informationen oder Einschränkungen für die Bewegung vorliegen, können solche Fehler nur schwer durch einfache Methoden identifiziert und korrigiert werden. Im Fall des eingeschränkten Raumes oder des Netzwerkraumes können Aufnahmepunkte, welche nicht im für die Bewegung als möglich klassifizierten Bereich oder auf den Knoten oder Kanten des Netzwerks liegen, identifiziert und anschliessend in den erlaubten Bereich beziehungsweise auf eine Kante oder einen Knoten „ver-

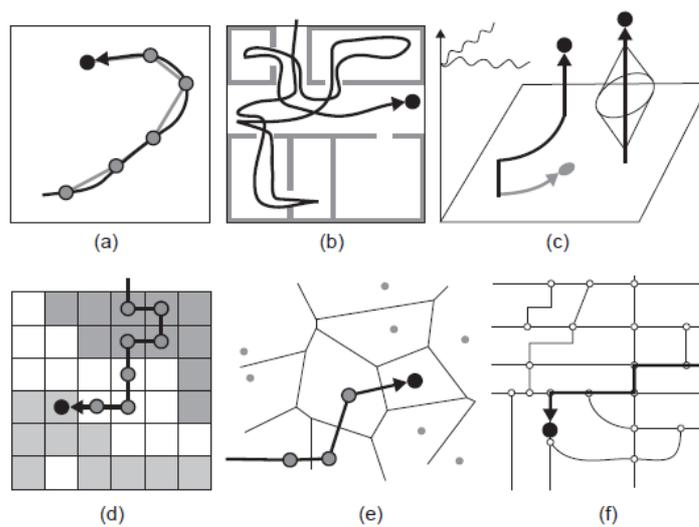


Abbildung 2: Modelle der sechs, für Punktbewegungen relevanten, Basisräume. (a) Euklidischer homogener Raum, (b) eingeschränkter euklidischer Raum, (c) Raum-Zeit Aquarium, (d) heterogener Feld-Raum, (e) irreguläres Mosaik, (f) Netzwerkraum (Laube, 2009)

schoben“ werden.

Für Netzwerke existieren für diesen Vorgang verschiedene, sogenannte Map Matching Methoden. Sehr einfache Methoden berücksichtigen nur geometrische Informationen, also die Distanz zwischen dem Aufnahmepunkt und einem Netzwerkelement (White et al., 2000; Krumm et al., 2007; Greenfeld, 2002). Solche Algorithmen sind zwar schnell und einfach zu implementieren, ziehen aber keinen Nutzen aus vorhergehenden Positionsinformationen und sind instabil in Situationen, in welchen der Aufnahmepunkt zu zwei Netzwerkelementen die gleiche Distanz aufweist (White et al., 2000). Erweiterte Varianten dieser einfachen Ansätze nutzen zusätzlich Informationen der Richtung der vorhergegangenen Bewegung und können so die Anzahl der möglichen Kanten, auf welche der Aufnahmepunkt projiziert werden kann, einschränken (White et al., 2000). Eine weitere Gruppe von Map Matching Ansätzen nutzt neben den geometrischen Informationen auch topologische Informationen des Netzwerks. Somit werden sowohl Informationen über die Geometrie der Kanten als auch über deren Konnektivität, ihre Nähe sowie ihre unmittelbare Nachbarschaft genutzt. Dadurch geschieht das Matching im Kontext und in Beziehung zu den vorhergegangenen Matches, was wiederum die Richtigkeit des Resultates wahrscheinlicher macht (Greenfeld, 2002). Eine Voraussetzung für die Anwendung einer solchen Map Matching Methode ist jedoch, dass das der Bewegung zugrundeliegende Netzwerk detaillierte und vollständige topologische Informationen beinhaltet.

2.2 Skala

Der Detaillierungsgrad respektive die Skala einer geographischen Beschreibung ist eine ihrer wichtigsten Eigenschaften. Er erlaubt dem Betrachter darüber zu urteilen, wie viel fehlt und wie stark das tatsächlich Existierende vom Beschriebenen abweicht (Goodchild, 2001).

Gemäss Montello (2001) existieren in der Geographie drei Bedeutungen für den Begriff Skala: 1. die *kartographische Skala*, 2. die *Analyse-Skala* und 3. die *Phänomen-Skala*.

Die kartographische Skala beschreibt das Verhältnis zwischen der Grösse/Länge eines Objektes auf der Karte und seiner Grösse/Länge in der Realität. Die Analyse-Skala beinhaltet die Grösse der Einheiten, mit welchen Phänomene gemessen sowie für die Datenanalyse und Darstellung aggregiert werden (Montello, 2001). Häufig wird die Analyse-Skala aufgeteilt in einen Wertebereich („*extent*“) und die Auflösung („*resolution*“ oder „*grain*“). Der Wertebereich gibt die Grösse der räumlichen, zeitlichen, qualitativen oder analytischen Dimension an. Die Auflösung ist ein Mass für die Präzision der Messung (Gibson et al., 2000). Die Phänomen-Skala bezieht sich auf die Grösse, auf welcher Strukturen existieren und auf welcher geographische Prozesse stattfinden (Montello, 2001).

Gemäss Goodchild (2001) können durch Modelle, welche es erlauben Skaleneffekte auf die Dateneigenschaften vorherzusagen:

- Unsicherheiten bei der Verwendung von Daten, welche zu grob skalig sind, abgeschätzt werden.
- das Verhältnis zwischen Kosten und Mehrwert der Erhebung von Daten auf mehreren Skalen abgeschätzt werden.
- Daten von einer Skala auf eine andere übertragen werden.

2.3 Forschungs- und Anwendungsbereiche von Multiskalen-Analysen

Als Multiskalen-Analysen werden Analysen bezeichnet, welche das gleiche Phänomen auf verschiedenen Analyse-Skalen untersuchen.

Im Bereich der Geographischen Informationswissenschaft wurde in den letzten Jahren viel Forschung an Bewegungsdaten betrieben. Diese konzentrierte sich jedoch stark auf den Umgang mit grossen Datenmengen und deren Komplexität (z.B. Spaccapietra, 2008), deskriptive Trajektorienanalysen (z.B. Laube et al., 2007), Aggregationsmethoden (z.B. Andrienko und Andrienko 2008), die Erkennung von Bewegungsmustern (z.B. Laube 2009) sowie auf die visuellen Analyse-

methoden (z.B. Andrienko et al. 2008a). Einerseits wurden in Bezug auf Multiskalen-Analysen in den Bereichen GIS, aber auch Biologie und Ökologie in vielen Studien Analysen von Bewegungsdaten bereits auf mehreren räumlichen und raum-zeitlichen Skalen durchgeführt. Andererseits wurden für die räumliche Dimension schon verschiedenste Methoden zur Multiskalen-Analyse erarbeitet. Insgesamt wurde aber nur sehr wenig Forschung in explizite, explorative, zeitliche Multiskalen-Bewegungsanalysen investiert.

2.3.1 Biologie und Ökologie

Im Bereich der Biologie und Ökologie wurden in der Vergangenheit räumliche und raum-zeitliche Multiskalen-Analysen vor allem an Bewegungen von Tieren sowie Landschaftseigenschaften durchgeführt. Durch die Untersuchung einzelner Parameter auf verschiedenen Skalen konnten so in biologischen Studien Skaleneffekte identifiziert (Reynolds und Laundre, 1990), skalenabhängiges Verhalten erkannt (Nams, 2005; Fritz et al., 2003; Hornsby und King, 2008; Webb, 2009) und grössere Zusammenhänge festgestellt werden (Fryxell et al., 2008).

Um skalenspezifisches Verhalten zu erkennen, untersuchte Nams (2005) das Bewegungsverhalten von Hirsch- und Rötelmäusen in Abhängigkeit der Umgebungsstruktur. Mit Hilfe einer explorativen Multiskalen-Analyse untersuchte er dabei die Hausdorff Dimension als Mass für die Gewundenheit der Bewegungstrajektorien in Abhängigkeit der räumlichen Skala, die Variation der Gewundenheit in kleinen Pfadsegmenten sowie die Korrelation zwischen der Gewundenheit benachbarter Pfadsegmente. Durch die angewendete Methode konnte er räumliche Skalen, bei welchen eine Veränderung des Bewegungsverhaltens auftreten, identifizieren (Abbildung 3). Dies ermöglichte es, ein besseres Verständnis darüber zu erhalten, wie die Tiere Landschaftsstrukturen auf verschiedenen räumlichen Skalen wahrnehmen und darin agieren sowie darüber, wie die Habitatsstrukturen das Bewegungsmuster der Tiere beeinflussen. Um grössere Zusammenhänge zu erkennen, untersuchten Fryxell et al. (2008) das Bewegungsmuster von frei laufenden Elchen auf einer groben, mittleren und feinen raum-zeitlichen Skala. Dadurch konnten Rückschlüsse gezogen werden, sowohl über Zusammenhänge zwischen dem Bewegungsverhalten und den zugrundeliegenden ökologischen Variablen als auch über soziale Interaktionen. Aufgrund dieser Erkenntnisse kann ein besseres Gesamtbild des Bewegungsverhalten erreicht werden. Die Wahl der Skalen wurde jedoch einerseits durch die Aufnahmeverfahren und andererseits durch Vorwissen über das raum-zeitliche Bewegungsverhalten der Tiere bestimmt.

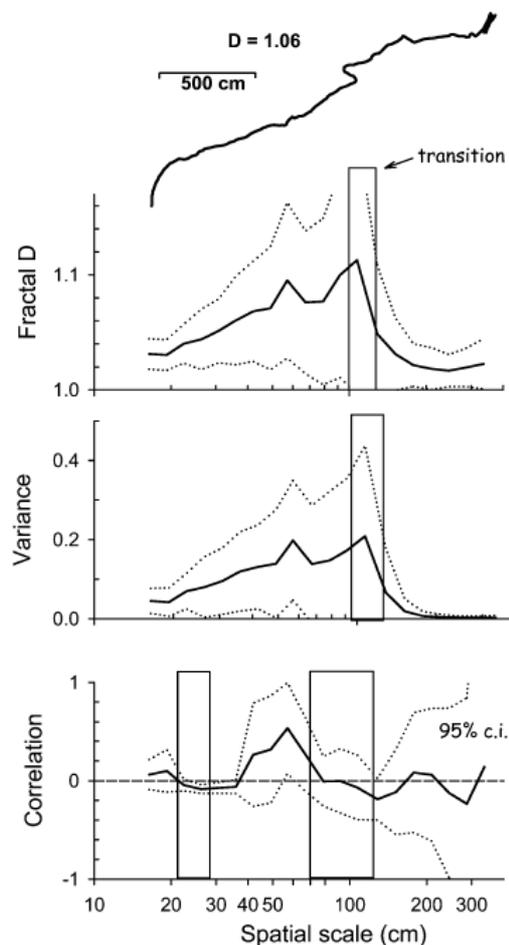


Abbildung 3: Identifikation der Bewegungsdomänen einer Hirschmaus (*Peromyscus maniculatus*) (Nams, 2005)

Dadurch konnte nur ein sehr beschränkter raum-zeitlicher Bereich untersucht werden. Weiter wurden in den drei Skalen jeweils verschiedene Messverfahren (VHF, GPS, Kartierung von Fussabdrücken) mit unterschiedlicher Genauigkeit bzw. räumlicher Skala (1km, ca. 10-100m und <1m), sowie unregelmässige Aufnahmezeiten innerhalb der Skalen gewählt. Dadurch könnten die untersuchten Parameter beeinflusst und die Resultate verfälscht worden sein. Zur Identifikation von Skaleneffekten untersuchten Reynolds und Laudre (1990) den Aktionsraum und die tägliche Bewegung von Niederkalifornischen Gabelböcken und Kojoten. Sie analysierten dafür die zurückgelegte Distanz und die Grösse des Aktionsraums in Abhängigkeit verschiedener Samplingintervalle. Dadurch konnten sie Aussagen darüber machen, wie die gewählten Zeitintervalle die Schätzung des Aktionsraum-

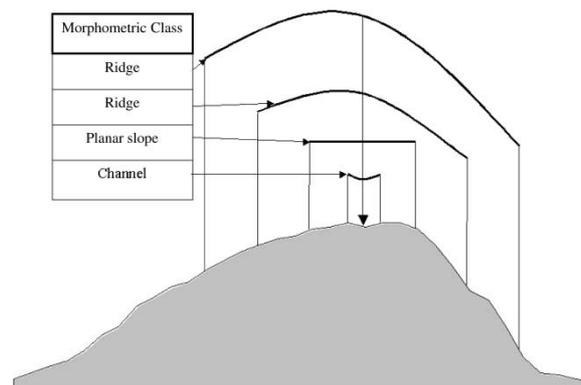


Abbildung 4: Die morphometrische Klasse in einem Punkt (gekennzeichnet mit einem vertikalen Pfeil) ändert sich mit der Skala, über welche gemessen wird (Fisher et al, 2004)

es und der täglich zurückgelegten Distanz beeinflussen.

Durch ökologische Studien auf multiskalärer Ebene konnte der Einfluss der räumlichen Skala auf Landschaftseigenschaften bestimmt werden (Turner, 1989; Wu, 2004). Wu (2004) hat in diesem Zusammenhang den Einfluss der räumlichen Auflösung sowie Ausdehnung von Landnutzungs- und Landbedeckungskarten auf die Messung von Landschaftscharakteristiken untersucht. Dafür hat er 17 messbare Landschaftscharakteristiken, welche Aufschluss über die Heterogenität und die Dominanz der einzelnen Landnutzungen/-bedeckungen zulassen, durch systematische Variation der Auflösung und Ausdehnung analysiert. Durch die Multiskalen-Analyse konnte der Einfluss der Skala auf die Landschaftseigenschaften bestimmt sowie die Extrapolation von generellen Skalenrelationen und von skalen-spezifischen Eigenschaften ermöglicht werden.

2.3.2 GIS

Im Bereich der Geographischen Informationswissenschaft wurde in der Vergangenheit viel Forschungsarbeit investiert, um den Einfluss der räumlichen Skalen in Geländemodellen zu untersuchen sowie um Multiskalen-Methoden zu entwickeln. Aber auch in Arbeiten über Bewegungen wurden bereits Analysen über mehrere räumliche und zeitliche Skalen angewendet.

Im Gebiet der Geländemodellierung konnten durch die Anwendung von Multiskalen-Analysen unter anderem dominante Landschaftsskalen (Schmidt und Andrew, 2005) sowie unklare/undeutliche Landschaftseigenschaften (Fisher et al., 2004) identifiziert werden.

Fisher et al. (2004) untersuchten dazu multiskalare Landschaftseigenschaften anhand geomorphologischer Klassen mit Hilfe des *Fuzziness*-Ansatzes. Die räumliche Skala wurde dabei mittels der verwendeten Filtergrösse systematisch von 3x3 bis 75x75 Pixel variiert. Dadurch konnten Charakteristiken mit planimetrischer Grösse von 100m (lokal) bis 3700m (regional) erfasst werden. Dies ermöglichte es schliesslich, Landschaftsphänomene mit undeutlicher/unklarer räumlicher Ausdehnung anhand des auf verschiedenen Skalen gerechneten *fuzzy memberships* zu bestimmen (Abbildung 4).

Durch die Untersuchung von Bewegungen auf mehreren räumlichen und zeitlichen Skalen konnten Aussagen über unterschiedliches Bewegungsverhalten (Dias et al., 2007; Wartmann et al., 2010), Veränderungen und grössere Zusammenhänge (Wartmann et al., 2010) gemacht werden. Wartmann et al. (2010) untersuchten das Ausbreitungsverhalten von Orang-Utan Weibchen in Indonesien. Dabei wurden die Position, das Verhalten der Tiere, der Aktionsraum, die täglich zurückgelegte Strecke sowie der Zusammenhang zwischen dem Aktionsraum sowie der täglich zurückgelegten Strecke und dem Reproduktionsstatus sowie der Saison untersucht. Als Ergebnis der Analyse über verschiedene zeitliche Skalen konnten nicht nur Aussagen über die Ausdehnung des genutzten Raumes, sondern auch über die veränderte Nutzung, die Interaktion zwischen mehreren Individuen sowie über die Art der Nutzung gemacht werden. Dias et al. (2007) haben das individuelle Verhalten von Besuchern sowie das Verhalten von, mit verschiedenen Informationsressourcen ausgestatteten, Besuchergruppen auf einem vorgegebenen Pfad im „Dunes of Texel“ Nationalpark in den Niederlanden untersucht. Es wurden dabei die Position des Besuchers, die Bewegungsart sowie der Zusammenhang zwischen der gegebenen Informationsressource und der Bewegungsart analysiert. Die gesamte Bewegung wurde anhand von vier zeitabhängigen Klassen in Bewegungsarten unterteilt und analysiert. Dabei stand eine Klasse für „Bewegung“ und die restlichen für Stopps auf verschiedenen zeitlichen Skalen. Diese verschiedenen Stopp-Skalen ermöglichten die Identifikation von verschiedenen Aufenthaltsverhalten in bestimmten Streckensegmenten und erlaubten Rückschlüsse auf die Nutzungsintensität dieser Segmente. In dieser Arbeit wird vermerkt, dass der mögliche Einfluss der gewählten (räumlichen und zeitlichen) Skalen berücksichtigt werden sollte und dass weitere Forschungsarbeit in diesem Bereich nötig ist.

Soweit bekannt, ist die Arbeit von Laube und Purves (2011) die einzige, welche explizit zeitliche Skaleneffekte auf Bewegungsparameter untersucht. In ihrer Arbeit haben sie den Einfluss der zeitlichen Skala auf die Geschwindigkeit, die Rich-

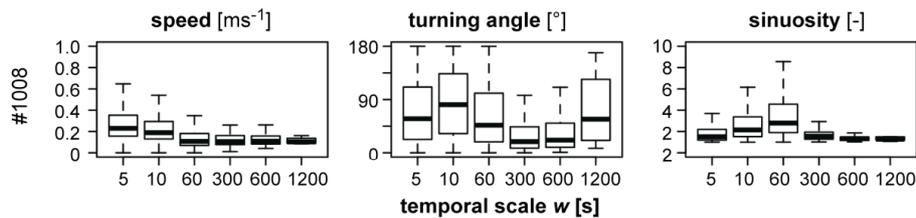


Abbildung 5: Boxplots der Geschwindigkeit, der Richtungsänderung und der Gewundenheit für mehrere zeitliche Skalen. (Laube und Purves, 2011)

tungsänderung und die Gewundenheit der Bewegung von Kühen analysiert. Dabei haben sie für den gleichen Datensatz die Bewegungsparameter für eine Anzahl Skalen mit variierender Grösse des Berechnungsfensters bestimmt. Dadurch konnten sie ein komplexes Zusammenspiel zwischen der zeitlichen Skala, Filterung, Segmentierung und dem Einfluss von GPS- Unsicherheiten identifizieren. Zudem konnte durch ihre Untersuchung die intuitive „je feiner die Skala, desto besser“-Annahme widerlegt werden.

2.4 Forschungslücken

Aus den Ergebnissen der erwähnten Studien kann zusammenfassend festgehalten werden, dass Multiskalen-Analysen die Identifikation skalenabhängiger Eigenschaften, Phänomene und Verhalten ermöglichen. Weiter ist es durch Multiskalen-Analysen möglich, Skaleneffekte, Veränderungen und grössere Zusammenhänge zu erkennen. Im Vergleich der Studien konnte jedoch festgestellt werden, dass es nicht immer klar ist, wie die Skala im Zusammenhang mit der Analyse definiert wurde. Die Vergleichbarkeit der Analysen ist abhängig von der Datenqualität und der Vorverarbeitung der Daten. In Bezug auf Bewegungen beruht die Wahl der zeitlichen Skala meist auf bereits gemachten Annahmen und Erwartungen über das Bewegungsverhalten. Auch ist in vielen Studien nicht klar, wie die verwendeten Parameter berechnet wurden und ein Vergleich ist somit nicht ohne weiteres möglich.

Aus der Literatur wird ersichtlich, dass bislang fast keine explorativen zeitlichen Multiskalen-Analyse-Methoden angewandt wurden. Weiter wird, ausser in der Arbeit von Laube und Purves (2011), der Einfluss der gewählten zeitlichen Skala auf die Bewegungsparameter weder untersucht noch berücksichtigt. Schliesslich wurde festgestellt, dass theoretische und methodische Konzepte im Zusammenhang mit zeitlichen Multiskalen-Analysen von Bewegungsdaten fehlen. Das Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, 1. eine geeignete Methode zu finden, mit welcher

explorative zeitliche Multiskalen-Analysen durchgeführt werden können. Weiter sollen 2. die Potentiale und Schwierigkeiten bei der Verwendung von zeitlichen Multiskalen-Analysen identifiziert werden. Schliesslich soll 3. anhand von Experimenten gezeigt werden, wie der Einfluss der gewählten Skala auf die Bewegungsparameter mit Hilfe einer Multiskalen-Analyse genutzt werden kann, um neue Erkenntnisse über die Daten zu gewinnen.

3 Methodik

Um Bewegungen auf einer zeitlich multiskalaren Ebene untersuchen zu können, muss in einem ersten Schritt definiert werden, welche Bewegungsparameter analysiert und wie diese berechnet werden. In einem zweiten Schritt muss festgelegt werden, wie die Multiskalen-Analyse konkret durchgeführt werden soll. Schliesslich muss in einem dritten Schritt bestimmt werden, wie die berechneten Werte nützlich dargestellt werden können.

Das Ziel dieses Kapitels ist es deshalb, festzulegen, welche Bewegungsparameter relevant sind und wie diese berechnet werden. Weiter soll die Methode zur Multiskalen-Analyse beschrieben und schliesslich bestimmt werden, wie die Resultate dargestellt werden.

3.1 Wahl der Bewegungsparameter

Da in dieser Arbeit Bewegungen auf einer zeitlich multiskalaren Ebene analysiert werden sollen, scheint es sinnvoll zu sein, nur diejenigen Bewegungsparameter zu betrachten, welche Aussagen über das Bewegungsverhalten zulassen und deren Berechnung von der Zeit abhängig ist.

Um die Bewegung von Punktobjekten zu untersuchen, wurden in verschiedenen Studien die Parameter *Gewundenheit* (z.B. Webb et al., 2009; Nams, 2005, Laube und Purves, 2011), *Geschwindigkeit* (z.B. Brilliger et al. 2004; Laube und Purves, 2011) und die *Richtungsänderung* (z.B. Fryxell et al., 2008, Laube und Purves, 2011) untersucht.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen die erwähnten Parameter und zusätzlich die *Beschleunigung* untersucht werden.

Die Relevanz der Geschwindigkeit und der Richtungsänderung ist an einem exemplarischen Beispiel von Patterson et al. (2008) zu sehen. *Im Gegensatz zur Situation, in der sich ein Vogel schnell und direkt zwischen Nahrungsgebieten bewegt, macht er bei der Futtersuche in der gleichen Zeit kürzere Bewegungen mit mehr scharfen Richtungsänderungen.* Um das Beispiel zu erweitern, könnte man vermuten, dass die Gewundenheit der Bewegung aufgrund der häufigen Richtungsänderungen bei der Nahrungssuche grösser ist und die Beschleunigung stärker variiert, da der Vogel zur Nahrungsaufnahme immer wieder anhält und danach wieder beschleunigt, um zur nächsten Futterquelle zu gelangen.

Anhand der Geschwindigkeit kann demnach festgestellt werden, welche Distanz ein Objekt während einer Zeitperiode zurückgelegt hat und die Beschleunigung

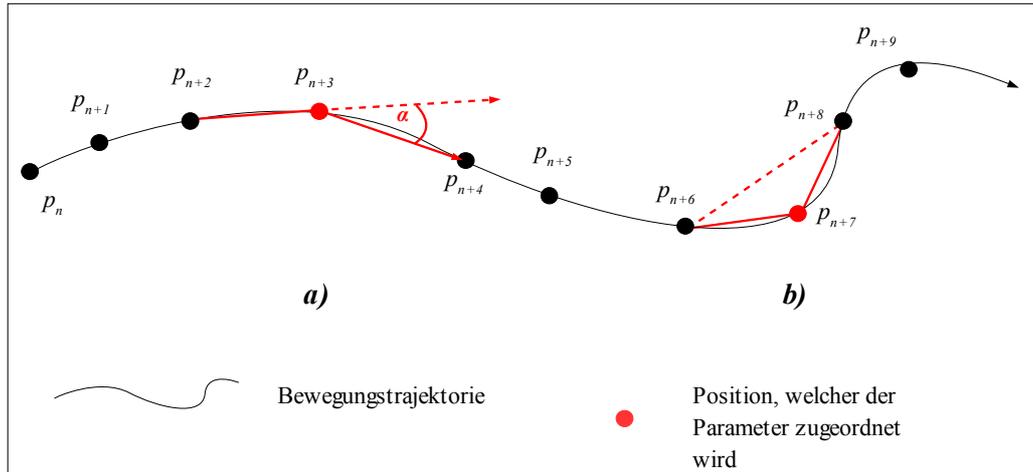


Abbildung 6: Methoden zur Berechnung der Richtungsänderung und der Gewundenheit

a) Berechnung der Richtungsänderung als Abweichung der Richtung zwischen dem Punkt p_{n+3} und p_{n+4} von der Richtung zwischen p_{n+2} und p_{n+3} . **b)** Berechnung der Gewundenheit als das Verhältnis aus der kumulierten Distanz zwischen p_{n+6}, p_{n+7} und p_{n+8} und der Distanz der direkten Verbindungsstrecke zwischen p_{n+6} und p_{n+8} .

liefert Informationen darüber, wie sich die Geschwindigkeit geändert hat. Die Richtungsänderung beschreibt die Geometrie des Weges, welchen das Objekt zurückgelegt hat und die Gewundenheit liefert ein Maß dafür, wie direkt sich das Objekt von einer Position zu einer anderen bewegt hat. Durch die Bestimmung dieser vier Bewegungsparameter können somit Aussagen über das Bewegungsverhalten eines Objektes gemacht werden.

3.2 Berechnung der Bewegungsparameter

Da es für viele Bewegungsparameter mehrere Methoden gibt, um diese zu berechnen (Laube et al., 2007), muss genau festgelegt werden, wie die verwendeten Parameter berechnet werden.

Aufgrund dessen, dass es für keinen der Parameter möglich ist, diesen anhand nur einer Positionsinformation zu berechnen, müssen Informationen über benachbarte Aufnahmepunkte in die Berechnung miteinbezogen werden und es sind somit fokale Kontextoperatoren nötig. Um die einzelnen Parameter miteinander vergleichen zu können, muss sichergestellt werden, dass bei jedem der Bewegungsparameter der gleiche Trajektorienabschnitt beziehungsweise die gleichen Nachbarpunkte bei der Berechnung mitberücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurden die Geschwindigkeit, die Beschleunigung, die Gewundenheit und die Richtungsänderung in einem bestimmten Aufnahmepunkt in dieser Arbeit so

definiert, dass sie jeweils von der Position und der Zeit des Punktes selbst, sowie von einem vorhergehenden und einem nachfolgenden Punkt abhängen. Für die einzelnen Bewegungsparameter heisst das, dass sie wie folgt berechnet werden:

Geschwindigkeit:

Die Geschwindigkeit im Punkt p_n wird durch den Mittelwert der Geschwindigkeit zwischen den Punkten p_{n-m} und p_n und der Geschwindigkeit zwischen p_n und p_{n+m} berechnet. Dabei entscheidet die Wahl der Grösse von m darüber, wie viele Aufnahmepunkte im Berechnungsfenster liegen und in Kombination mit der Intervalllänge i somit auch darüber, welche zeitliche Ausdehnung der betrachtete Trajektorienabschnitt aufweist.

Beschleunigung:

Für die Bestimmung der Beschleunigung im Punkt p_n wird die Differenz der Geschwindigkeit zwischen p_n und p_{n+m} und der Geschwindigkeit zwischen p_{n-m} und p_n berechnet. Die durch die Differenz erhaltene Änderung der Geschwindigkeit wird durch die Zeit zwischen p_{n-m} und p_{n+m} dividiert.

Richtungsänderung:

Die Richtungsänderung wird definiert als die Abweichung der Richtung zwischen p_n und p_{n+m} gegenüber der Richtung zwischen p_{n-m} und p_n (Abbildung 6).

Gewundenheit:

Wie bereits erwähnt, existieren verschiedene Masse (*sinuosity Index*, *fraktale Dimension*, *straightness Index*), um die Gewundenheit einer Bewegungsrajektorie zu beschreiben.

Aufgrund dessen, dass der *sinuosity Index* sowie die *fraktale Dimension* im Gegensatz zum *straightness Index* aufwendig zu implementieren sind, wird in dieser Arbeit als Mass für die Gewundenheit der *straightness Index* verwendet. Die Gewundenheit wird somit aus dem Verhältnis der kumulierten Distanz zwischen den Positionen p_{n-m} , p_n und p_{n+m} und der Distanz der direkten Verbindungslinie zwischen p_{n-m} und p_{n+m} berechnet (Abbildung 6).

Die genauen Berechnungsweisen der einzelnen Bewegungsparameter sind in Tabelle 2 aufgeführt.

3.2 Berechnung der Bewegungsparameter

Parameter	Berechnung	Erläuterungen
Ortsvektor p_n (UTM-Koordinaten) $\begin{bmatrix} m \\ m \end{bmatrix}$	$\begin{pmatrix} p_{n,x} \\ p_{n,y} \end{pmatrix}$	Vektorielle Darstellung der Position eines Objektes im n -ten Punkt p_n im 2D-Raum, gegeben durch eine x - und ein y -Koordinate
Distanz $\text{dist}(p_n, p_{n+m})$	$\sqrt{(p_{n,x} - p_{n+m,x})^2 + (p_{n,y} - p_{n+m,y})^2}$	Euklidische Distanz zwischen dem Punkt p_n und dem Punkt p_{n+m}
Zeit $t(p_n)$ [sek]	$t(p_n)$	Zeit zwischen dem Anfangspunkt und dem n -ten Punkt p_n
Geschwindigkeit $v(p_n)$ [m/s]	$\frac{\text{dist}(p_n, p_{n-m}) + \text{dist}(p_n, p_{n+m})}{t(p_n) - t(p_{n-m}) + t(p_{n+m}) - t(p_n)}$	Geschwindigkeit eines Objektes im n -ten Punkt p_n . Berechnet aus dem Mittelwert der Geschwindigkeit zwischen dem $(n-m)$ -ten Punkt und dem n -ten Punkt und der Geschwindigkeit zwischen dem n -ten und dem $(n+m)$ -ten Punkt.
Beschleunigung $a(p_n)$ [m/s ²]	$\frac{\frac{\text{dist}(p_n, p_{n+m})}{t(p_{n+m}) - t(p_n)} - \frac{\text{dist}(p_n, p_{n-m})}{t(p_n) - t(p_{n-m})}}{t(p_{n+m}) - t(p_{n-m})}$	Beschleunigung im n -ten Punkt p_n einer Trajektorie berechnet durch die Division der Differenz der Geschwindigkeit zwischen p_{n-m}, p_n und p_{n+m} und der Zeit zwischen p_{n-m} und p_{n+m} .
Richtungsänderung $\text{turn}(p_n)$ [°] (Abbildung 6)	$\arccos\left(\frac{(p_n - p_{n-m}) \cdot (p_{n+m} - p_n)}{\text{dist}(p_n, p_{n-m}) \cdot \text{dist}(p_{n+m}, p_n)}\right)$	Änderung der Richtung im n -ten Punkt p_n . Berechnet durch den Winkel zwischen dem $(n-m)$ -ten, dem n -ten und dem $(n+m)$ -ten Aufnahmepunkt.
Gewundenheit $\text{sinu}(p_n)$ [] (Abbildung 6)	$\frac{\text{dist}(p_{n-m}, p_n) + \text{dist}(p_n, p_{n+m})}{\text{dist}(p_{n-m}, p_{n+m})}$	Gewundenheit der Trajektorie im n -ten Punkt. Berechnet durch die Division der kumulierten Distanz zwischen dem $(n-m)$ -ten, dem n -ten und dem $(n+m)$ -ten Punkt, durch die Distanz der direkten Verbindung zwischen dem $(n-m)$ -ten und dem $(n+m)$ -ten Punkt.

Tabelle 2: Berechnung der relevanten Bewegungsparameter

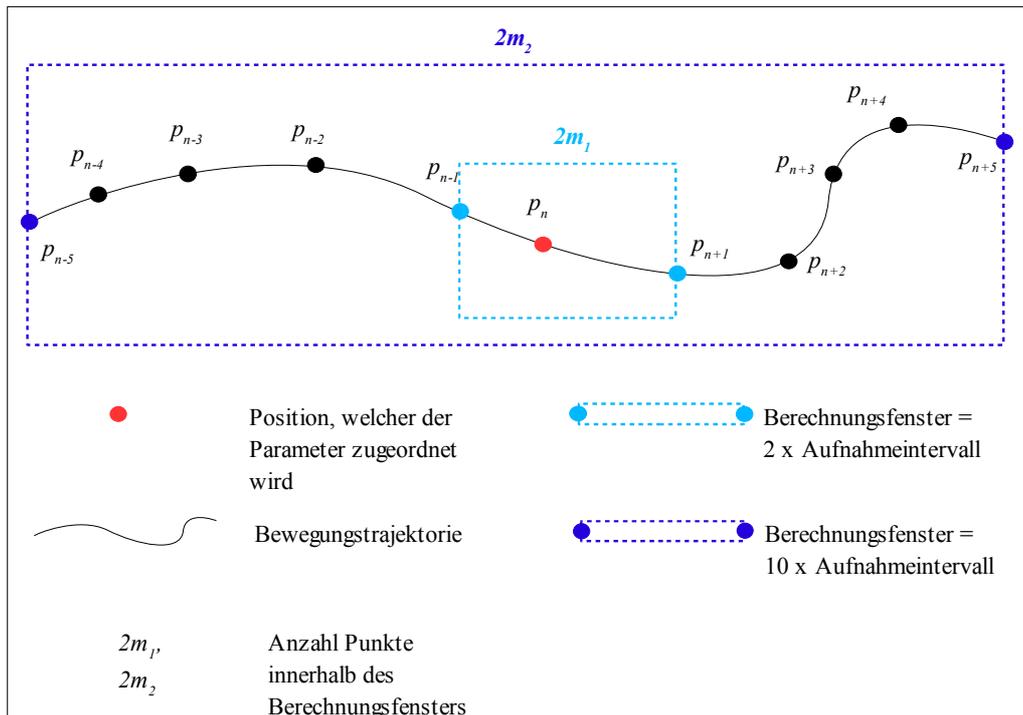


Abbildung 7: Berechnungsfenster als Maß für die zeitliche Skala

3.3 Berechnung der Bewegungsparameter auf mehreren zeitlichen Skalen

3.3.1 Multiskalen-Analyse-Methode

Als zeitliche Skala wird in dieser Arbeit die Größe des Zeitfensters gesehen, durch welches festgelegt wird, welche Aufnahmepunkte für die Berechnung eines Bewegungsparameters verwendet werden (Abbildung 7). Der Punkt, welchem der Parameter zugeordnet werden soll, liegt dabei in der Mitte des Fensters. Der für die Berechnung benötigte vorhergehende Punkt liegt am Anfang und der nachfolgende am Ende des Fensters. Die übrigen Aufnahmepunkte innerhalb des Zeitfensters sind für die Berechnung nicht relevant. Die benötigten Punkte liegen auf der Zeitachse jeweils $m \cdot i$ voneinander entfernt. Liegt am Anfang oder am Ende des Fensters kein Aufnahmepunkt, dann kann kein Parameter berechnet werden. Die Bewegungsparameter können somit nur für diejenigen Aufnahmepunkte bestimmt werden, vor und nach welchen noch mindestens m weitere Punkte liegen. Für die ersten m sowie die letzten m Aufnahmepunkte einer Trajektorie können folglich keine Bewegungsparameter berechnet werden. Jedem anderen Aufnahmepunkt kann hingegen ein Parameterwert zugeteilt werden. Um die zeitliche Skala zu än-

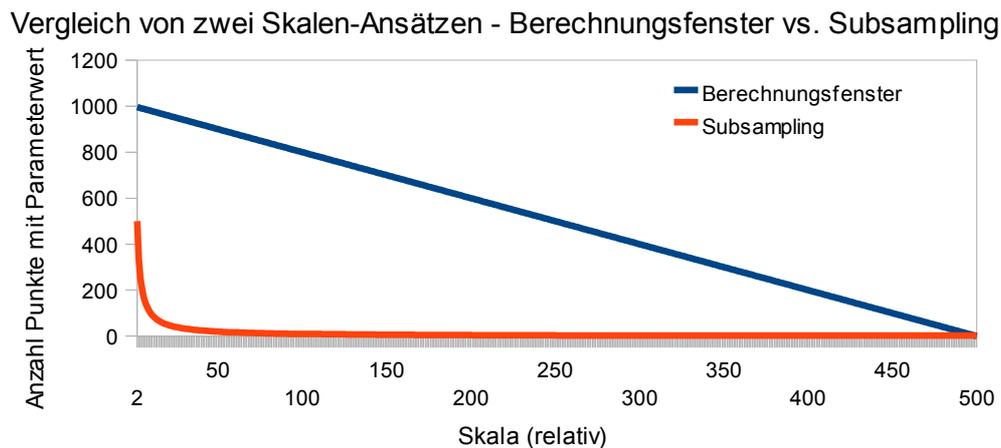


Abbildung 8: Beispiel für den theoretischen Einfluss des gewählten Skalen-Ansatzes auf die Anzahl Aufnahmepunkte, für welche ein Parameterwert pro Skala berechnet werden kann.

dem, wird die Grösse des beweglichen Zeit- bzw. Berechnungsfensters angepasst. Dadurch ändert sich allerdings auch die Anzahl der Aufnahmepunkte, welchen ein Bewegungsparameter zugewiesen werden kann.

Die eigentliche Multiskalen-Analyse-Methode besteht darin, durch systematisches Ändern der Grösse des Berechnungsfensters die Bewegungsparameter auf verschiedenen Skalen zu berechnen und einander gegenüber zu stellen.

3.3.2 Nachteile der gewählten Multiskalen-Analyse-Methode

Der Nachteil dieses Ansatzes ist, dass, wie bereits erwähnt, bei jeder Vergrößerung des Berechnungsfensters um k Punkte, am Beginn sowie am Ende der Trajektorie für $k/2$ weniger Punkte ein Parameterwert bestimmt werden kann. Je mehr Skalen somit in einer Analyse betrachtet werden, desto weniger Aufnahmepunkten kann auf allen Skalen ein Wert zugeordnet werden. Ein anderer Ansatz die zeitliche Skala zu ändern, ist, durch systematisches Herauslösen von Aufnahmepunkten ein Subsample zu erstellen und die Parameter für alle Punkte des Subsamples mit $m=1$ zu berechnen. Mit diesem Ansatz kann allen Punkten des Subsamples, ausser dem ersten und dem letzten, ein Parameterwert zugeordnet werden. Bei a_{ges} Ausgangspunkten entspricht die Anzahl Punkte a_{sub} eines Subsamples, welches jeden q -ten Punkt des Ausgangssamples beinhaltet, noch dem abgerundeten Betrag von

$$a_{sub} = \frac{a_{ges} + 1}{q}$$

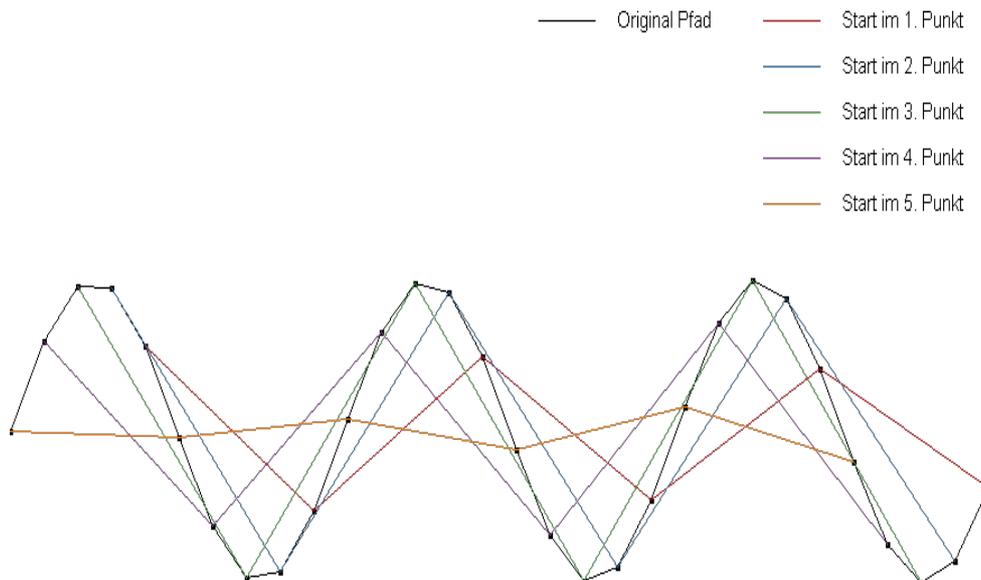


Abbildung 9: Einfluss des Startpunktes bei der Erstellung von Subsamples

	Startpunkt				
	1	2	3	4	5
Richtungsänderung [°]	15.13	49.08	67.67	74.29	72.89
Gewundenheit []	1.01	1.17	1.33	1.38	1.35
Geschwindigkeit [m/s]	30.33	35.21	39.87	41.32	40.39
Beschleunigung [m/s²]	0.02	0.05	0.04	0.02	0.01

Tabelle 3: Einfluss des Startpunkts auf den Mittelwert der Parameter

Die Werte basieren auf dem synthetischen Beispiel aus Abbildung 6, einem Aufnahmeintervall von 1 Sekunde und einer Gesamtlänge der Trajektorie von 1482.95 Metern

In Abbildung 8 wird dieses Verhalten für die beiden Ansätze dargestellt. Es ist ersichtlich, dass beim Subsample-Ansatz für wesentlich weniger Punkte ein Parameter berechnet werden kann. Zudem werden die Werte bei jeder Skala für unterschiedliche Punkte berechnet und ein Vergleich macht deshalb wenig Sinn. Im Fall des Berechnungsfenster-Ansatzes kann nur der erste und letzte Teil der Trajektorie nicht auf allen Skalen verglichen werden. Ein weiteres Problem des Subsample-Ansatzes liegt in der Wahl des ersten Subsample-Punktes. Je nachdem, ob beim ersten Aufnahmepunkt gestartet wird und danach jeder q -te Punkt ins Subsample aufgenommen wird, oder ob beim zweiten, dritten, etc. Punkt

begonnen wird, kann der berechnete Parameterwert stark variieren (Abbildung 9). In Tabelle 3 wurden die Mittelwerte der Bewegungsparameter aus dem Beispiel in Abbildung 9 für die fünf verschiedenen Startpunkte mit einem Aufnahmeintervall von einer Sekunde und einer Trajektorienlänge von 1482.95 Metern berechnet. Die erhaltenen Werte zeigen deutlich, dass die Wahl des Startpunkts die Parameter extrem beeinflussen kann.

Dieses Problem tritt beim Ansatz mit dem Berechnungsfenster nicht auf. Trotz der Schwächen, welche der für die Arbeit gewählte Ansatz in den Anfangs- und Endbereichen der Trajektorien aufweist, besitzt er gegenüber dem Alternativansatz wesentliche Vorteile und wird deshalb als geeignet betrachtet, um zeitliche Multiskalen-Analysen von Bewegungsdaten durchzuführen.

3.4 Darstellung

Um die Werte der Bewegungsparameter auf den einzelnen Skalen möglichst gut miteinander vergleichen und um Zusammenhänge erkennen zu können, müssen die Werte gemeinsam dargestellt werden. Eine geeignete Methode um dies zu tun, sind Boxplots (Abbildung 10). Diese verwenden Quantile zur Darstellung der Lage sowie der Streuung der Werte und es können Extremwerte dargestellt werden (Stahel, 2002). Ein Boxplot besteht aus einer sogenannten Box, welche die Werte zwischen dem unteren und dem oberen Quantil beinhaltet und an der Stelle des Medians unterteilt ist. Ein weiteres Element eines Boxplots bilden die Stäbe („Whisker“). Sie gehen von dem unteren respektive oberen Ende der Box aus. Die maximale Grenze des oberen Stabes ist dort, wo die grösste Beobachtung liegt, welche kleiner ist als der Wert der oberen Quantile plus eineinhalb mal den Wertebereich der Box. Die maximale Grenze des unteren Stabes ist entsprechend dort, wo die kleinste Beobachtung liegt, welche grösser ist als der Wert der unteren Quantile minus eineinhalb mal den Wertebereich der Box. Bei der gleichzeitigen Darstellung von mehreren Boxplots mit einer unterschiedlichen Anzahl von Beobachtungen kann die Breite der Box relativ zur Anzahl der darin liegenden Beobachtungen gewählt werden (Stahel, 2002). Bewegungsdatensätze und somit auch die Anzahl der berechneten Bewegungsparameter sind im Normalfall sehr gross und wie bereits gezeigt, gehen bei der gewählten Multiskalen-Analyse-Methode, relativ zur Anzahl Punkte einer um eins kleineren Skala, nur sehr wenige Punkte „verloren“. Bei einer Ausgangsbreite von 20 Pixel

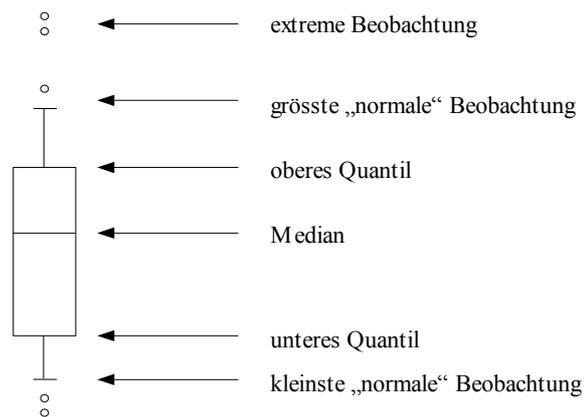


Abbildung 10: Elemente eines Box Plots (nach Stahel, 2002)

und 10'000 Beobachtungen müsste bei 9'999 Beobachtungen eine Breite von 19 Pixel gewählt werden. Da die Anzahl der Pixel ganzzahlig sein muss, würde sich die Breite nicht ändern bis nur noch 8'999 Beobachtungen vorlägen. Würde man also die Breite ändern und dies explizit festhalten, könnte das zu Fehlinterpretationen führen. Würde man die Ausgangsbreite extrem gross wählen, könnte man zwar die Änderung proportional zur Anzahl Beobachtungen wählen, die gesamte Abbildung wäre aber nicht mehr übersichtlich. Aus den genannten Gründen wurde entschieden, dass die Breite der Boxplots in dieser Arbeit konstant gewählt wird.

Die Richtungsänderung wird als Spezialfall betrachtet. Der Wertebereich dieses Parameters ist festgelegt zwischen 0° und 180° , beziehungsweise bei der Mitberücksichtigung von links und rechts zwischen 0° und 360° . Für diesen Bewegungsparameter ist vor allem die Verteilung der Werte in dem vorgegebenen Bereich von Interesse. Eine geeignete Methode, um diese Verteilung darzustellen, ist das Histogramm. Im Histogramm wird die Verteilung der Häufigkeit der in Klassen gruppierten Werte aufgezeigt. Die Häufigkeit einer Klasse wird als Rechteck über der Klasse dargestellt. Die Höhe entspricht dabei der Häufigkeit und die Breite der Klassenbreite (Lloyd, 2010). Um ein intuitiveres Verständnis über die Verteilung der Richtungsänderung zu erhalten, kann das Histogramm in Form eines Sterns dargestellt werden (Abbildung 11). Die Werte der x-Achse liegen in diesem Fall auf dem Umkreis des Sterns. Die y-Achse entspricht dem Radius. Die Häufigkeit einer Klasse wird dann dargestellt als ein zweidimensionaler Keil, dessen Spitze vom Kreismittelpunkt ausgeht und dessen Seitenlänge der relativen Häufigkeit entspricht. Die Länge der Keilseite der grössten Klasse, also der Modalklasse, entspricht dem Kreisradius.

Wollen die Bewegungsparameter mehrerer Objekte über mehrere Skalen betrachtet und verglichen werden, ist die Darstellung der Werte mit Hilfe von Small

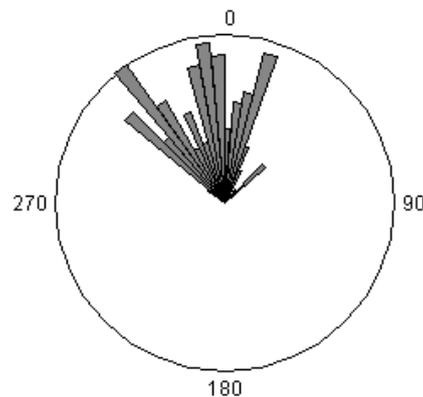


Abbildung 11: Sternplot

	Skala 1/ Paramter1	Skala 2/ Paramter 2	Skala 3/ Paramter 3
Objekt 1	$Plot_{o1,s1/p1}$	$Plot_{o1,s2/p2}$	$Plot_{o1,s3/p3}$
Objekt 2	$Plot_{o2,s1/p1}$	$Plot_{o2,s2/p2}$	$Plot_{o2,s3/p3}$
Objekt 3	$Plot_{o3,s1/p1}$	$Plot_{o3,s2/p2}$	$Plot_{o3,s3/p3}$

Abbildung 12: Schema der Anordnung der Small Multiples

Multiples geeignet. Small Multiples beinhalten eine Anzahl Bilder, welche alle die gleiche Struktur aufweisen. Sie zeigen gleichzeitig die Bandbreite der Alternativen und eine Auswahl an Optionen. Die Verwendung von Small Multiples eignet sich somit vor allem für die Darstellung multivariater Veränderungen von Unterschieden zwischen Objekten in Bezug auf die Bandbreite sowie die Alternativen (Tufté, 1991).

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Small Multiples Design verwendet, das Einzelplots in einer Matrix so anordnet, sodass eine Reihe jeweils alle Plots eines Objektes und eine Spalte jeweils alle Plots einer Skala oder die Bewegungsparameter beinhaltet (Abbildung 12).

Probleme von Small Multiples bestehen darin, dass sie bei vielen Skalen/ Parametern und/oder Objekten schnell sehr gross werden und ihre Präsentation nicht mehr übersichtlich möglich ist. Ein weiteres Problem kann entstehen, wenn die Datenmenge der einzelnen Objekte und/oder die Datenqualität stark variieren. Ein Vergleich der einzelnen Objekte könnte in einem solchen Fall zu falschen Schlussfolgerungen über das Bewegungsverhalten führen.

The screenshot shows a Java documentation page. On the left, there is a list of 'All Classes' including: Area, Box, BoxPlot, Coordinate, Date, DivisionException, Edge, EdgeGroup, Flight, HistoClass, HistoData, HistoValue, Identifiable, InitialMapSearch, LinRegression, Location, NegativeTimeException, Network, Node, NodeGroup, Parameter, Pigeon, PositionVector, ReadInput, Record, SinusoidyException, Site, StarPlot, and Statistics. The main content area is titled 'Package visTool' and contains an 'Interface Summary' for 'Identifiable' and a 'Class Summary' for various classes. The 'Identifiable' interface is described as 'Interface welches vorgibt, dass jede Klasse, welche es implementiert eine ID besitzen muss, welche ange...'. The 'Class Summary' lists classes like Area, Box, BoxPlot, Coordinate, Date, Edge, EdgeGroup, Flight, and HistoClass with brief descriptions of their functions.

Abbildung 13: Screenshot eines Ausschnittes der Java Dokumentation

Wenn die Bewegungsparameter auf den einzelnen Skalen in Abhängigkeit der Zeit analysiert werden sollen, können die Werte mit Hilfe eines einfachen Streudiagramms, mit der Zeit in der x -Achse und dem Parameterwert in der y -Achse, dargestellt werden.

3.5 Implementierung

Für die Berechnung der Bewegungsparameter sowie für die Darstellung der Ergebnisse wurde eine Java-Anwendung entwickelt. Eine grobe [Dokumentation](#) der wichtigsten Klassen, Exceptions, Interfaces und Methoden (nur *public*) (inklusive derer der Datenaufbereitung des Kapitels 5) ist online zugänglich¹. Abbildung 13 zeigt den Screenshot eines Ausschnittes der Dokumentation.

1 <http://www.geo.uzh.ch/~azeiler/indexDoc.html>

4 Daten

Menschen, Tiere und Fahrzeuge bewegen sich in den häufigsten Fällen entweder in einem freien oder einem eingeschränkten Raum. Bei Bewegungen in einem eingeschränkten Raum wird vor allem die Möglichkeit, Richtungsänderungen vorzunehmen, eingeschränkt. Dadurch wird auch die Gewundenheit der Trajektorie eingeschränkt. Bewegungen in einem freien Raum werden hingegen nicht beeinflusst. Um eine möglichst ganzheitliche Analyse von Bewegungen durchzuführen, müssen sowohl eingeschränkte als auch uneingeschränkte Bewegungen betrachtet werden. In dieser Arbeit werden deshalb zwei Datensätze untersucht, wobei einer eingeschränkte Bewegungen von Fußgängern und der andere uneingeschränkte Bewegungen von Tauben beinhaltet. In diesem Kapitel werden die beiden für die Experimente verwendeten Daten sowie die Kartendaten für die Fußgänger beschrieben.

4.1 Fußgänger-Daten

Die Fußgänger-Daten stammen aus dem GPS-tracking Datensatz der TU Delft (Niederlande) und wurden von S. C. Van der Spek für die Verwendung in dieser Arbeit zur Verfügung gestellt. Die Daten wurden im Zusammenhang mit dem europäischen Projekt *Spatial Metro* im Rahmen eines Masterkurses aufgenommen. Sie wurden ursprünglich verwendet, um das Verhalten von Besuchern in historischen Stadtzentren zu untersuchen (van Schaik und van der Spek, 2008). Der Fokus lag dabei auf dem Einkaufs- und Freizeitverhalten. Für die Aufnahme der Positionen wurden Qstarz BT-Q1000x (AGPS) GPS-Empfänger verwendet. Der Aufnahmezeitraum lag zwischen dem 18. und 21. November 2009. Die Aufnahmefrequenz wird als *alle 5 Sekunden* angegeben. In den Daten selbst ist jedoch ersichtlich, dass Positionsinformationen in einem Intervall von 2 Sekunden aufgenommen wurden. Der Startpunkt der Bewegungen liegt am Zuidpoort in Delft, von wo aus 202 Tracks registriert wurden. Nicht komplette Tracks oder solche mit „zu viel“ (keine genauen Angaben vorhanden) fehlenden Daten wurden als ungültig deklariert. Als gültig wurden 178 Tracks bewertet (Abbildung 15). Das erhaltene Datenpaket enthält 1. einen Ordner mit allen aufgenommenen Tracks im GPX-Format, 2. einen Ordner mit allen als gültig klassifizierten Tracks in GPX-Format, 3. einen Ordner mit allen als gültig klassifizierten Tracks im SHP-Format und 4. eine MDB-Datenbank mit einem Fragenkatalog mit Hintergrundinformationen zu jedem Fußgänger. In dieser Arbeit werden nur die Daten der

4.1 Fussgänger-Daten

```
<trkpt lat="52.008733" lon="4.364089">  
  <ele>82.204239</ele>  
  <time>2009-11-18T09:48:03Z</time>  
  <desc>lat.=52.008733, lon.=4.364089, Alt.=82.204239m.  
Speed=0.922479m/h.</desc>  
  <speed>0.256244</speed>  
</trkpt>
```

Abbildung 14: Beispiel der Beschreibung eines Aufnahmepunktes im GPX-Format



Abbildung 15: alle Aufnahmepunkte der Fussgängerbewegungen

gültigen GPX-Tracks verwendet (Abbildung 14). Zu jedem Aufnahmepunkt sind der Name des Tracks, die geographische Länge und Breite als WGS84-Koordinaten, die Höhe des Punktes in Meter, die Zeit im *Universal Coordinated Time (UTC)* Format, eine Beschreibung des Punktes sowie die momentane Geschwindigkeit in Metern pro Sekunde angegeben. Die Genauigkeit der Positionsmessung wird vom Hersteller des GPS-Empfängers als 3m RMS (ohne

Hilfe) und die der Geschwindigkeit als 0.1 m/s (ohne Hilfe) angegeben. Durch die Tatsache, dass sich die Fussgänger während der Aufnahme ihrer Position in einer Stadt befinden, sind ihre Bewegungen durch die vorhandene Infrastruktur eingeschränkt. Die Personen können sich nur auf dafür vorgesehenen Flächen bewegen. Zwar können sich die Fussgänger in Gebäuden aufhalten und diese unter Umständen durchqueren, da die Bestimmung der Position in einem Gebäude durch das Fehlen von ausreichend Satellitenverbindungen aber sehr ungenau ist, sollten diese Bewegungen aus den vorhandenen Daten herausgefiltert werden. Diejenigen Positionen, welche die Bewegung im Freien beschreiben, jedoch nicht in einem für Fussgänger möglichen Bereich liegen, können mit Hilfe einer Map Matching Methode in einen erlaubten Bereich verschoben werden. Um dies tun zu können, müssen allerdings diejenigen Flächen bekannt sein, auf welchen sich ein Fussgänger bewegen kann.

4.2 Kartendaten

Um Bereiche zu erhalten, in welchen sich Fussgänger aufhalten können, werden Informationen zum Strassennetz in Delft von OpenStreetMap verwendet. Für zusätzliches Wissen über Plätze und weitere offene Flächen wurde eine Google Maps Karte verwendet.

OpenStreetMap ist ein Projekt, welches das Ziel verfolgt, ein Set aus von freiwilligen Nutzern generierten Kartendaten zu erzeugen. Die Daten sollen frei zugänglich, editierbar und unter neuen Copyright Modellen lizenziert sein (Haklay und Weber, 2008). Der Vorteil der Daten ist somit, dass sie kostenlos zugänglich sind. Der Nachteil ist, dass ihre Vollständigkeit sowie Richtigkeit nicht garantiert ist. Ein weiteres Problem besteht darin, dass die Verfügbarkeit und Qualität der Daten räumlich nicht homogen ist (Mondzech und Sester, 2011; Haklay, 2010). Durch eine visuelle Abschätzung der Qualität der OpenStreetMap Karte von Delft wurde entschieden, dass diese für die Verwendung in dieser Arbeit als ausreichend betrachtet werden kann. Die Kartendaten wurden auf der OpenStreetMap Homepage² für den Bereich zwischen einer geographischen Länge von 4.352091° und 4.368894° und einer geographischen Breite von 52.005965° und 52.018115° am 24.07.2011 als OpenStreetMap-XML-Daten exportiert.

Die Datei enthält Informationen über Netzknoten (*nodes*), Wege (*ways*) und Verbindungen (*relations*). Ein Netzknoten enthält mindestens Informationen zur geo-

² <http://www.openstreetmap.org/>

```
<node id="44841571" lat="52.0095297" lon="4.3591412" user="AND_fixbot"
uid="211771" visible="true" version="4" changeset="3451199"
timestamp="2009-12-25T22:35:42Z"/>

<way id="7538587" user="fcordemans" uid="452960" visible="true"
version="3" changeset="8126664" timestamp="2011-05-12T21:23:22Z">
  <nd ref="44841571"/>
  <nd ref="44842752"/>
  <tag k="AND_nosr_r" v="15079505"/>
  <tag k="bicycle" v="yes"/>
  <tag k="foot" v="yes"/>
  <tag k="highway" v="pedestrian"/>
  <tag k="name" v="Molstraat"/>
</way>
```

Abbildung 16: Beispiel der Beschreibung eines Netzknotens sowie eines Weges im OSM-Format

graphischen Länge und Breite und optional zur Höhe. Ein Netzknoten kann für ein eigenständiges Punkt-Feature stehen oder Teil eines Weges sein. Jeder Knoten besitzt eine eindeutige ID, Angaben zum Nutzer, welcher die Daten veröffentlicht hat, Informationen über die Sichtbarkeit und zur Gruppe der Änderungen, welcher er angehört. Weiter enthält jeder Netzknoten Angaben zum Zeitpunkt der Veröffentlichung. Zusätzlich kann ein Knoten eine beliebige Anzahl *tags* enthalten, welche weitere Beschreibungen des Knotens beinhalten. *Tags* bestehen aus einem Schlüssel (*key*) und einem darauf bezogenen Wert (*value*). Ein Weg ist eine geordnete Liste aus 2 bis 2000 Netzknoten und besitzt mindestens einen *tag* oder ist Teil einer Verbindung. Er beschreibt entweder ein lineares Feature oder eine Fläche. Wie ein Netzknoten besitzt jeder Weg eine eindeutige ID und Informationen über den Nutzer, die Sichtbarkeit, Version etc. . Weiter beinhaltet er mindestens zwei Knotenreferenzen, welche sich auf die ID eines Netzknotens beziehen sowie eine beliebige Anzahl *tags*. Verbindungen sind Gruppen aus Wegen oder Netzknoten, welche geographisch miteinander in Beziehung stehen (OpenStreetMap, 2011).

Zusätzlich wurden 36 Flächen, auf welchen sich Fußgänger bewegen können, mit Hilfe von Google Maps manuell erfasst. Eine Fläche besitzt eine eindeutige ID sowie eine Anzahl geographischer Koordinaten. Da die Koordinaten manuell erfasst wurden, wird von einer Genauigkeit von zirka einem Meter ausgegangen.

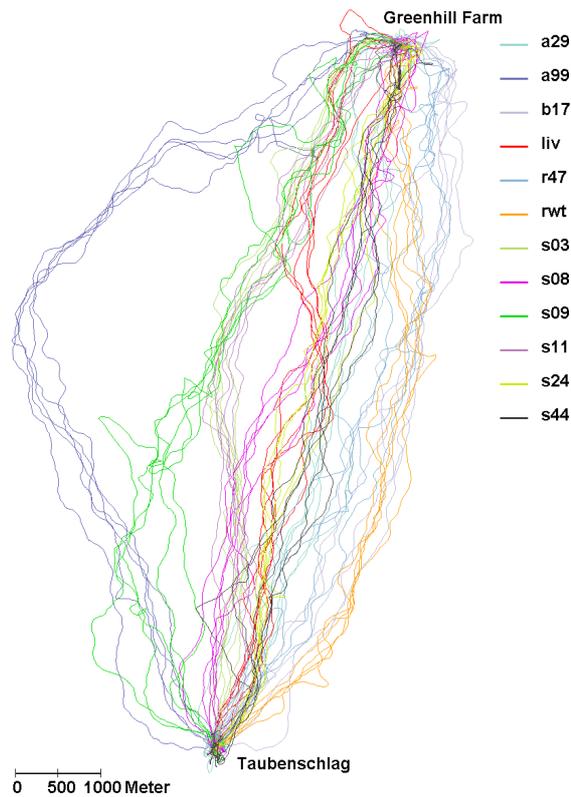


Abbildung 17: Flüge aller Tauben

4.3 Tauben-Daten

Die Tauben-Daten wurden von R. Freeman für die Verwendung in dieser Arbeit zur Verfügung gestellt. Das Datenpaket beinhaltet jeweils fünf Einzelflüge von 12 erfahrenen Tauben. Die Position der Tiere wurde anhand eines Präzisions-GPS Loggers in einem Intervall von einer Sekunde erfasst. Die einzelnen Flüge beschreiben jeweils die Route, welche die Tauben zwischen dem Ort der Freilassung und dem Taubenschlag zurückgelegt haben. Dabei war der Ort der Freilassung immer bei der Greenhill Farm in der Gegend von Oxford, England. Die Entfernung zwischen dem Start- und Zielort beträgt 8.6 km. Bei den fünf Einzelflügen, welche für jede Taube vorhanden sind, handelt es sich um chronologisch aufeinanderfolgende Flüge der jeweiligen Taube. Die Informationen über die einzelnen Flüge liegen in Form von Text-Dateien vor. Darin enthalten sind alle Aufnahmepunkte mit Angaben zur geographischen Länge und Breite als WGS84-Koordinaten, die Höhe, sowie die Zeit (HHMMSS). Da es sich um Flugdaten handelt, kann davon ausgegangen werden, dass der Bewegung ein homogener euklidischer Raum zugrunde liegt.

4.3 Tauben-Daten

Die Daten wurden bisher verwendet, um das Führungs- respektive Kompromissverhalten (Biro et al. 2006, Freeman et al., 2010), die Wahl von gewohnheitsmäßigen Routen (Armstrong et al., 2008) sowie den Einfluss von landschaftlichen Orientierungshilfen zu untersuchen (Biro et al., 2006; Mann et al., 2010) und um Methoden zur Flugprognose zu entwickeln (Mann et al., 2009; Mann et al., 2010).

5 Aufbereitung der Daten und qualitative Beurteilung der Aufbereitung

Um mit den erhaltenen Daten Arbeit zu können, mussten diese im Vorfeld der Multiskalen-Analyse eingelesen, transformiert sowie ergänzt werden.

In diesem Kapitel werden die dazu angewandten Methoden erläutert sowie qualitativ beurteilt.

5.1 Fussgänger-Daten

Die Fussgänger-Daten beinhalten die Bewegung von Fussgängern im historischen Stadtzentrum von Delft. Die Positionen sind in Form von WGS84-Koordinaten vorhanden. Die Bewegung wird durch die Struktur der Strassen und offene Flächen eingeschränkt.

5.1.1 Aufbereitung

Um mit den Bewegungsdaten arbeiten zu können, wurden die relevanten Informationen der GPX-Files extrahiert und in einer dafür erstellten Java Klasse (*Track*) gespeichert. Ein *Track* besteht aus einer Ansammlung von Aufnahmepunkten (*Record*) und besitzt einen Namen. Die einzelnen *Records* enthalten zu Beginn Informationen zu:

- Geographischer Länge
- Geographischer Breite
- Höhe
- Name des zugehörigen Tracks
- Datum (Angaben zu: Jahr, Monat, Tag, Stunde, Minute und Sekunde der Aufnahme)

Damit Distanzberechnungen einfach durchgeführt werden können, wurden die WGS84 Koordinaten in UTM-Koordinaten umgewandelt. Dafür wurde der JavaScript Code³ von Taylor (1997-1998) zu einem Java Code umgeschrieben. Nach der Umwandlung enthält jeder *Record* zusätzlich einen *x*- sowie *y*-Wert.

In den meisten Bewegungstrajektorien der Fussgänger treten lokale Punktkonzentrationen auf. Es ist zu vermuten, dass es sich dabei um ungenaue Aufnahmen innerhalb von Gebäuden oder Stopps handelt. Da diese Bewegungen nicht in die Multiskalen-Analyse miteinbezogen werden sollen, müssen sie so gut als möglich

³ <http://home.hiwaay.net/~taylorc/toolbox/geography/geoutm.html>

aus den Daten herausgefiltert werden. Zu diesem Zweck wurden zwei Bedingungen formuliert, welche die Daten erfüllen müssen, um Teil der relevanten Bewegung zu sein. Erstens muss die Geschwindigkeit auf der kleinstmöglichen zeitlichen Skala in jedem Punkt einen Minimalwert von 1.19 m/s aufweisen. Diese Untergrenze bezieht sich gemäss Knoblauch et al. (1996) auf die mittlere Geschwindigkeit älterer Frauen. Durch diese Bedingung sollen Stopps in der Bewegung herausgefiltert werden. Die zweite Bedingung gibt vor, dass bei drei aufeinanderfolgenden Richtungsänderungen - ebenfalls berechnet auf der kleinstmöglichen zeitlichen Skala - mindestens einer der erhaltenen Winkel unter 30° liegen muss. Durch dieses Kriterium sollen Unregelmässigkeiten in der Bewegung erkannt und herausgefiltert werden. Alle Punkte, welche direkt vor einem herausgefilterten Aufnahmepunkt liegen, werden in den Daten mit einem Stopp-Attribut gekennzeichnet. Jeder Stopp-Punkt enthält eine Anfangs- und Endzeit. Im Fall, dass ein Stopp-Punkt als vorhergehender Punkt für die Bestimmung der Geschwindigkeit oder der Beschleunigung verwendet wird, kann so die Endzeit in die Berechnung miteinbezogen werden. Dadurch kann vermieden werden, dass die Zeit überschätzt wird.

Da den Bewegungen ein eingeschränkter Raum zugrunde liegt, ist es von Interesse, die einschränkenden Eigenschaften zu kennen. Dies einerseits, um die Bewegungsparameter im Kontext des Raumes betrachten zu können und andererseits, um ungenaue Aufnahmepunkte in einen erlaubten Bereich verschieben zu können. Zu diesem Zweck wurde ein auf OpenStreetMap-Daten basiertes Strassennetz modelliert. Es wurden dabei nur Strassen im Netzwerk berücksichtigt, bei denen davon ausgegangen wird, dass sie für Fussgänger zugänglich sind. Konkret heisst das, dass Strassen weder in Bau noch eine Autobahn sein dürfen.

Das Grundgerüst des Netzwerks besteht aus einer Menge von einzelnen Knoten sowie Strassen mit Knotenreferenzen (*ID*). Da eine Strasse nur Knotenreferenzen besitzt, werden ihr die effektiven Knoten zugewiesen und zwischen jeweils zwei aufeinanderfolgende Knoten eine Kante gelegt. Um die Knoten und Strassen topologisch mit- und untereinander in Beziehung zu setzen, werden jedem Knoten die Informationen zugewiesen, welche Strassen und Kanten mit ihm verbunden sind. Entsprechend erhält auch jede Kante und jede Strasse Angaben darüber, welche Kanten und Strassen mit ihr verbunden sind. Um flächenhafte Strassen zu erhalten, wurde auf jede Strasse ein acht Meter breites Band gelegt. Die Wahl der Breite des Bandes beruht auf einer grosszügigen Schätzung der Strassenbreite.

Aus den OpenStreetMap Daten wurden zusätzlich zum Strassennetz flächenhafte Parks generiert. Da es nicht möglich war, weitere relevante Flächen aus den Daten

zu erfassen, wurden zusätzlich Flächen von Hand erfasst. Zu diesem Zweck wurde mit Hilfe der Google API eine [Anwendung](#)⁴ erstellt, mit welcher die geographischen Koordinaten eines Punktes auf einer Google Maps Satellitenkarte bestimmt werden können. Die so erfassten Flächen wurden anschliessend ins Netzwerk integriert. Um auch topologische Beziehungen zwischen den Flächen und Strassen zu erhalten, wurden jeder Fläche die angrenzenden Strassen zugewiesen. Um bei der Erfassung der Flächen entstandene Ungenauigkeiten zu relativieren, wurde um jede Fläche ein vier Meter breiter Puffer gelegt. Strassen, welche sich nun mit der Fläche schneiden, wurde als benachbarte Strassen betrachtet.

Mit Hilfe der modellierten Einschränkungen konnten diejenigen Aufnahmepunkte, welche ausserhalb der als möglichen klassierten Flächen liegen, in einen möglichen Bereich verschoben werden. Der dazu entwickelte Map Matching Algorithmus verwendet Distanzbeziehungen sowie Informationen über benachbarte Aufnahmepunkte und die topologischen Eigenschaften des Strassennetzes.

Ein Punkt kann nur auf eine Strasse verschoben werden, welche mit der Kante, auf welcher der vorherige Aufnahmepunkt liegt, verbunden ist. Dadurch kann einerseits das Risiko, dass die Bewegung zwischen zwei Strassen hin und her springt, vermieden werden. Andererseits kann der Rechenaufwand reduziert werden, da nur für eine geringe Anzahl Strassen Distanzberechnungen durchgeführt werden müssen. Um eine optimale Kante zu finden, auf welche der Punkt verschoben werden kann, wird die Distanz zwischen der Kante und dem Punkt, sowie zwischen der Kante und dem vorherigen und nachfolgenden Aufnahmepunkt berechnet. Der ungenaue Punkt wird schliesslich senkrecht auf diejenige Kante projiziert, bei welcher die Summe der drei Distanzen minimal ist. Dadurch können vor allem Fehler bei Aufnahmepunkten, welche sehr nahe an Ecken liegen, reduziert werden. Die Punkte werden beim Map Matching entweder an eine Strassenkante, also auf die Mitte der Strasse, oder an den Rand einer Fläche verschoben.

Da trotz der Filterung der Trajektorien nicht alle für die Bewegungsanalyse irrelevanten Punkte aus den Daten entfernt werden konnten, wurden diejenigen Trajektorien bestimmt, welche möglichst wenig irrelevante Punkte beinhalten. Es wird dabei davon ausgegangen, dass die irrelevanten Punkte innerhalb von Gebäuden liegen und damit weiter von den Strassen und zusätzlichen Flächen entfernt sind als Aufnahmepunkte im Freien. Beim Map Matching ist somit die Distanz, um welche diese Punkte verschoben werden, grösser. Aus diesem Grund wurde für jede Trajektorie ein Boxplot erstellt, welcher die Verteilung der

⁴ <http://www.geo.uzh.ch/~azeiler/GeoCoder.html>

Distanzen darstellt, um welche die Punkte beim Map Matching verschoben wurden. Durch den Vergleich der einzelnen Boxplots konnten diejenigen Trajektorien bestimmt werden, bei welchen der Mittelwert sowie das Maximum einen Grenzwert nicht überschritten. Der Grenzwert des Mittelwerts wurde bei 10 Metern und derjenige des Maximums bei 40 Metern gewählt. Ein weiteres Kriterium für die Brauchbarkeit der Trajektorien stellte die Trajektorienlänge dar. Bewegungslinien mit weniger als 300 Aufnahmepunkten wurden für die Multiskalen-Analyse nicht verwendet.

5.1.2 Qualitative Beurteilung

Im Folgenden werden die Resultate der Datenaufbereitung sowie die dazu verwendeten Methoden qualitativ beurteilt.

5.1.2.1 Filterung

Die Anzahl aller Aufnahmepunkte beträgt in den Originaldaten 270424. Durch das Filtern der Daten konnte die Anzahl der Punkte auf 70962 reduziert werden (Abbildungen 18 und 19). Das Ziel der Filterung war, Stopps sowie Unregelmässigkeiten in den Bewegungen zu entfernen. Da unter Stopps alle Bereiche der Trajektorie verstanden wurden, bei welchen die Geschwindigkeit weniger als 1.19 m/s beträgt, konnten durch die Filterung, welche genau diese Bedingung vorgibt, alle Stopps entfernt werden. Da die Definition der Stopps allerdings nur auf einer Schätzung beruht und nicht zwingend alle echten Stopps beinhaltet, konnten die ausserhalb der Definition liegenden echten Stopps auch nicht aus den Daten entfernt werden. Auch die zweite Bedingung bei der Filterung, durch welche die Unregelmässigkeiten erkannt und entfernt werden sollen, beruht auf einer Annahme. Da sich die Fussgänger auf geraden Strassen bewegen, wird dabei davon ausgegangen, dass auch die Bewegung - ausgenommen an den Ecken - mehr oder weniger gerade sein muss. Vor allem in den Bereichen der offenen Flächen muss diese Bedingung aber nicht unbedingt stimmen.

In Abbildung 19 ist zu erkennen, dass mit Hilfe der durchgeführten Filterung ein grosser Teil der als irrelevant betrachteten Aufnahmepunkte aus den Daten entfernt werden konnte, ohne die Grundgeometrie der Bewegungen zu zerstören. Der Effekt der Filterung ist vor allem in den äusseren Bereichen der Abbildung erkennbar, da dort die Konzentration der Tracks generell tiefer ist und sich somit die Bewegungslinien nicht überlagern. Ein Teil der intuitiv als irrelevant betrachteten Aufnahmepunkte wurde durch die Filterung nicht entfernt. Dies lässt

5.1.2.1 Filterung



Abbildung 18: Ungefilterte Fussgänger-Daten



Abbildung 19: Gefilterte Fussgänger-Daten



Abbildung 20: Delft Strassennetz (nur Strassen)



Abbildung 21: Delft Strassennetz (flächenhaft)

5.1.2.1 Filterung



Abbildung 22: Resultat des Map Matchings



Abbildung 23: Map Matching bei parallelen Strassen

Die roten Kreise stehen für die original GPS-Aufnahmepunkte, die grünen Punkte stellen entsprechen den verschobenen Punkte. Die blaue Verbindungslinie zeigt den Weg der Verschiebung an.

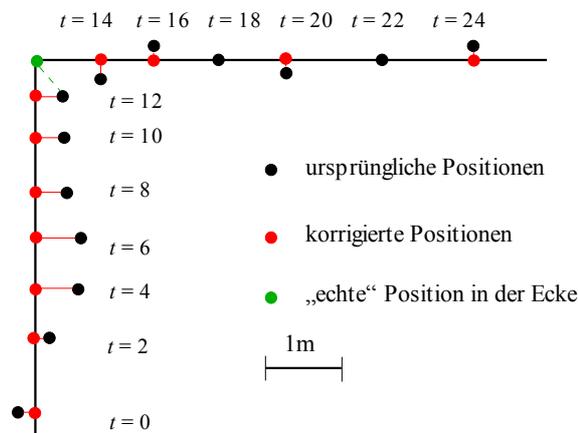


Abbildung 24: Ecken-Problem beim Map Matching

	Richtungsänderung [°]	Geschwindigkeit [m/s]
GPS-Aufnahmepunkte	67.38	0.15
nach Map Matching	60.83	0.26
„echte“ Position in der Ecke	90	0.48

Tabelle 4: Einfluss des Ecken-Problems auf die Richtungsänderung sowie die Geschwindigkeit

darauf schliessen, dass grössere Unregelmässigkeiten in den Daten vorhanden sind. Der Einfluss dieser Unregelmässigkeiten muss deshalb bei der Interpretation der erhaltenen Analyseresultate berücksichtigt werden.

5.1.2.2 Strassennetz

In Abbildung 20 ist das auf OpenStreetMap-Daten basierende Strassennetz aus Kanten und Knoten von Delft zu sehen. Abbildung 21 zeigt das Strassennetz mit den flächenhaften Strassen, den Parkflächen sowie den zusätzlich generierten Flächen.

Die Wahl der Strassen basierte auf Annahmen darüber, auf welchen Strassen sich Fussgänger bewegen können. Ob sich ein Fussgänger tatsächlich auf allen Strassen des modellierten Netzes bewegen kann, könnte nur mit Hilfe detaillierter Informationen oder vor Ort überprüft werden.

Eine weitere Unsicherheit des Strassennetzes liegt in der Wahl der Strassenbreite, welche als starke Vereinfachung der Realität für alle Strassen gleich gewählt wurde. Wären detaillierte Informationen über die einzelnen Strassenbreiten in den Daten vorhanden gewesen, hätte ein realistischeres Strassennetz konstruiert werden können. Mit der gewählten Strassenbreite von 8 Metern werden wahrscheinlich die meisten Strassen in ihrer Breite überschätzt. Bei der Erstellung der flächenhaften Strassen wurde jede Strasse einzeln so verbreitert, dass pro Strasse eine Fläche entstand. Die einzelnen Flächen der Strassen sind allerdings nicht miteinander verbunden. Bei Strassen, welche nicht gerade aufeinander treffen, entsteht dadurch ein kleiner keilförmiger Freiraum zwischen den Strassen. Da dieser Zwischenraum nur relativ klein ist, kann sein Effekt auf das Map Matching aber vernachlässigt werden.

5.1.2.3 Map Matching

Durch das Map Matching konnten alle Aufnahmepunkte, welche ausserhalb des Strassennetzes liegen, auf eine Strassenkante oder an den Rand einer Fläche verschoben werden. Das Resultat ist in Abbildung 22 zu sehen.

Abbildung 23 zeigt eine Situation, in welcher der Aufnahmepunkt mit einem rein Distanz-basierten Map Matching Ansatz auf die Parallelstrasse der Strasse mit der eigentlichen Bewegung verschoben werden würde. Durch die Bedingung, dass nur benachbarte, also verbundene Strassen für das Map Matching in Betracht gezogen werden, konnten solche Fehler vermieden werden.

Ein Problem, welches mit der verwendeten Map Matching Methode nicht behan-



Abbildung 25: Aufnahmepunkte der 16 "guten" Trajektorien

delt werden kann, sind Punkte, welche auf den Ecken liegen sollten (Abbildung 24). Da die Punkte senkrecht auf die Kante verschoben werden, kommen die Punkte nie auf einer Ecke zu liegen. Dies hat vor allem einen Einfluss auf die Verteilung der Richtungsänderungen, aber auch auf die Geschwindigkeitsberechnung. Sowohl die Geschwindigkeit als auch die Richtungsänderung werden in dem Punkt, welcher auf der Ecke liegen sollte, unterschätzt. Nach der Verschiebung der ungenauen Aufnahmepunkte sollte im schematischen Beispiel aus Abbildung 24 die Richtungsänderung im Bereich der Ecke 90° betragen. Aufgrund des beschriebenen Problems erhält man im „Eckpunkt“ allerdings eine Richtungsänderung von 60.83° . Da die zurückgelegte Strecke zwischen dem Punkt vor der Ecke, dem „Eckpunkt“, und dem nachfolgenden Punkt durch die falsche Verschiebung unterschätzt wird, erhält man im Beispiel im „Eckpunkt“ eine Geschwindigkeit, die etwas mehr als halb so gross ist, als wie wenn der „Eckpunkt“ in der Ecke liegen würde (Tabelle 4). Das bedeutet, dass die berechnete Geschwindigkeit im gezeigten Beispiel einen Fehler von fast 50% aufweist und somit eigentlich nicht verwendet werden kann, um Aussagen über die Bewegung zu treffen.

Mit Hilfe einer für jede Trajektorie erstellten Statistik über die Distanz der Verschiebung der Aufnahmepunkte konnten 16 „gute“ Tracks gefunden werden.

<i>Pigeon</i>	<i>Flight</i> (Erweiterung der <i>Track</i> -Klasse)
<ul style="list-style-type: none"> • eindeutige ID • Name • Sammlung von Einzelflügen (<i>Flight</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • eindeutige ID • Name der Taube • Referenz ID der Taube • Flugnummer • Ansammlung von Aufnahmepunkten (<i>Record</i>)

Tabelle 5: Eigenschaften der Pigeon- und Flight-Klassen

Als „gut“ werden die Trajektorien hier bezeichnet, wenn der Mittelwert der Distanz, um welche die Punkte eines Bewegungspfades verschoben wurden, unter 10 Metern und der Maximalwert unter 40 Metern liegt. Abbildung 25 zeigt alle verbleibenden Originalaufnahmepunkte. Es ist zu sehen, dass in den verbleibenden Bewegungen relativ wenige Punktkonzentrationen ausserhalb des Strassennetzes auftreten und die Punkte nahe an den Strassen beziehungsweise Flächen liegen. Im Folgenden wurde deshalb nur noch mit diesen Trajektorien gearbeitet.

5.2 Tauben-Daten

Die Tauben-Daten beinhalten jeweils fünf Flüge von insgesamt 12 Tauben. Die Flüge aller Tauben beginnen am gleichen Ort (Greenhill Farm) und enden im Taubenschlag. Die Positionen der Tauben innerhalb des Flugs sind in Form von WGS84-Koordinaten gegeben.

5.2.1 Aufbereitung

Um mit den zur Verfügung stehenden Tauben-Daten arbeiten zu können, mussten die in Text-Files gespeicherten Informationen über die Flüge der Tauben extrahiert und in einer sinnvollen Struktur gespeichert werden. Es wurde deshalb eine Java Klasse (*Pigeon*) erstellt, welche die Informationen über die einzelnen Tauben beinhaltet. Eine weitere Java Klasse (*Flight*) enthält die Daten eines einzelnen Fluges (Tabelle 5).

Da die Positionsaufnahmen auch in diesem Fall in Form von WGS84-Koordinaten vorliegen, mussten diese wie bei den Fussgänger-Daten in UTM-Koordinaten umgewandelt werden.

In Abbildung 17 sind die Flüge aller 12 Tauben dargestellt. Die fünf Einzelflüge einer Taube sind jeweils in der gleichen Farbe abgebildet.

6 Experimente

Im Folgenden werden die an den beiden zur Verfügung stehenden Datensätzen durchgeführten Experimente beschrieben.

Die Durchführung der Experimente soll es ermöglichen, neue Erkenntnisse aus den Daten zu gewinnen.

6.1 Fussgänger

Die Bewegung der Fussgänger ist beschränkt auf diejenigen Bereiche, welche für Fussgänger zugänglich sind. Die Bewegung findet somit in einem eingeschränkten Raum statt. Der Fokus des folgenden Experiments liegt deshalb auf dem Einfluss des Raumes beziehungsweise des Map Matchings auf die Bewegungsparameter.

6.1.1 Vergleich der Parameter der gematchten und Original-Daten auf verschiedenen zeitlichen Skalen

Um den Einfluss des Map Matchings auf die Berechnung der Bewegungsparameter auf verschiedenen zeitlichen Skalen identifizieren zu können, wurden für die originalen GPS-Aufnahmepunkte sowie für die durch Map Matching verschobenen Punkte die Bewegungsparameter für eine Anzahl zeitlicher Skalen (2s, 4s, 10s, 20, 30, 60s, 90s und 120s) bestimmt und in Form von Boxplots dargestellt. Mit Hilfe der Boxplots sollen die Verteilung der Parameterwerte, der Mittelwert sowie der Median verglichen werden können.

Um den skalenabhängigen Einfluss des Map Matchings auf die Verteilung der Richtungsänderungen analysieren zu können, wurden für die Winkel der Richtungsänderungen zusätzlich jeweils für die GPS-Punkte sowie für die gematchten Punkte Sternplots auf den verschiedenen zeitlichen Skalen generiert.

Um ein quantitatives Mass für den Einfluss des Map Matchings auf verschiedenen Skalen zu erhalten, wurden in einem weiteren Schritt die Mittel- /Medianwerte der Parameter auf den einzelnen Skalen bestimmt und die Differenz zwischen dem Mittel-/Medianwert der GPS-Aufnahmepunkte und dem der verschobenen Punkte berechnet. Die Mittelwerte der Differenzen wurden in einem Balkendiagramm dargestellt.

6.2 Tauben

Die Bewegungen der Tauben finden in einem uneingeschränkten Raum statt und alle Tauben müssen die gleiche Strecke vom Ort der Freilassung bis zum Taubenschlag zurücklegen. Durch die Experimente soll der Einfluss der zeitlichen Skala sowie die Parameter in Abhängigkeit der Zeit auf verschiedenen Skalen untersucht werden. Weiter sollen Ähnlichkeiten zwischen Tauben und zwischen Skalen analysiert werden. Es soll untersucht werden, ob ein Lernverhalten bei den Tieren beobachtet werden kann und es soll getestet werden, ob ein Zusammenhang zwischen der Wegtreue und einem der Bewegungsparameter beobachtet werden kann.

6.2.1 Einfluss der zeitlichen Skala auf die Bewegungsparameter

Um den Einfluss der zeitlichen Skala auf die Werte der Bewegungsparameter identifizieren zu können, wurden die Parameter auf verschiedenen zeitlichen Skalen (2s, 4s, 10s, 20s, 30s, 60s, 90s und 120s) berechnet.

Um die Verteilung sowie die Mittel- und Medianwerte der einzelnen Skalen vergleichen und um mögliche Tendenzen erkennen zu können, wurden die Resultate für jede Skala in Form eines Boxplots dargestellt und alle Boxplots nebeneinander visualisiert. Die Boxplots aller Parameter der Flüge einer Taube wurden in Form von Small Multiples dargestellt.

Um die Verteilung der Richtungsänderung deutlicher sichtbar zu machen, wurden auf den einzelnen Skalen Sternplots der Richtungsänderungen erstellt. Im Gegensatz zu den Boxplots kann hier die Häufigkeit von Winkelklassen verglichen werden. Die Klassenbreite wurde bei 10° gewählt.

6.2.2 Zeitliche Abhängigkeit der Bewegungsparameter auf verschiedenen Skalen

Um den Einfluss der zeitlichen Skala auf die Bewegungsparameter eines Fluges in Abhängigkeit der Zeit zu untersuchen, wurden die Parameter für alle möglichen Aufnahmepunkte berechnet und ihr Wert in einem Streudiagramm in Abhängigkeit der Flugzeit dargestellt. Um die Werte auf den verschiedenen Skalen miteinander vergleichen zu können, wurden die Werte der untersuchten Skalen farblich kodiert und gemeinsam in einem Diagramm visualisiert. Auf diese Weise können verschiedene Bereiche der Flugtrajektorie analysiert und verglichen werden. Um einen Trend der Parameter besser identifizieren zu können, wurden die Werte linear miteinander verbunden. Dies stellt aber nur eine visuelle Hilfe dar und soll nicht kennzeichnen, dass die Werte interpoliert wurden. Diese Darstellungsform

zeigt deutlich, dass die Anzahl der Parameterwerte, welche pro Skala berechnet werden können, variiert.

6.2.3 Lernverhalten der Tauben, Ähnlichkeiten der Parameter zwischen einzelnen Tauben sowie Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Skalen

Da für jede Taube fünf aufeinanderfolgende Flüge vorhanden sind, soll analysiert werden, ob ein Lernverhalten der Tiere beobachtet werden kann. Zu diesem Zweck wurden die Parameterwerte der einzelnen Flüge farblich kodiert und für jeweils eine Skala in der Form eines zeitlich abhängigen Streudiagramms dargestellt.

Um gleichzeitig die Werte der Tauben untereinander vergleichen zu können, wurden für jeweils eine Skala die Diagramme der Tauben untereinander platziert. Um schliesslich darüber hinaus Aussagen über die Veränderung der Parameter über die zeitliche Skala machen zu können, wurden die untereinander platzierten Diagramme jeder Skala nebeneinander dargestellt. Resultierend erhält man eine Matrix aus Diagrammen (*small multiples*), wobei alle Diagramme einer Reihe einer Taube zugeordnet werden können und alle Diagramme einer Spalte sich auf die gleiche zeitliche Skala beziehen.

Da die Flüge einiger Tauben im Verhältnis zu den Flügen der anderen Tauben sehr lange sind, wurden die Werte dieser Tauben in der *small multiples* Darstellung nicht visualisiert. Dies angesichts der Tatsache, dass die Matrix unter Einbezug der langen Flüge sehr gross werden würde und die Flüge untereinander nur noch schlecht vergleichbar wären. Es wurden deshalb nur die Flüge der Tauben dargestellt, bei welchen alle Flüge weniger als 800 Aufnahmepunkte enthalten.

6.2.4 Zusammenhang zwischen Wegtreue und einzelnen Bewegungsparametern auf verschiedenen Skalen

Freeman et al. (2010) haben anhand der hier verwendeten Daten und einem zusätzlichen Datensatz mit Flügen von gepaarten Tauben einen Zusammenhang zwischen der Wegtreue eines Tieres und der Wahrscheinlichkeit, dass diese Taube bei einem gepaarten Flug die Führungsrolle übernimmt, festgestellt. Im Rahmen dieser Arbeit soll nun analysiert werden, ob die Bewegungsparameter auf verschiedenen Skalen und die Wegtreue-Werte miteinander in Beziehung stehen.

Um die Wegtreue zu berechnen, haben Freeman et al. (2010) in einem ersten Schritt die fünf Flüge jeder Taube mit Hilfe der *piecewise cubic spline* Interpolati-

on auf 500 Punkte normalisiert. In einem zweiten Schritt wurden 500 aufeinanderfolgende Punkte auf eine gerade Verbindungslinie zwischen dem Ort der Freilassung und dem Taubenschlag gelegt. Danach wurde während 100 Iterationen jeder Punkt auf der Linie an die mittlere Position aus den nächsten Nachbarn der fünf Originalflüge verschoben. Das Resultat aus diesem Prozess lieferte einen mittleren Flugpfad. Die Wegtreue wurde schliesslich für jeden Punkt des Mittelpfades als die Varianz der Distanz zwischen dem Punkt und dem nächsten Nachbarpunkt der fünf Originalflüge berechnet.

Aufgrund dessen, dass die Implementierung einer *piecewise cubic spline* Interpolation nicht ohne weiteres möglich war, wurde in dieser Arbeit eine leicht andere Methode zur Berechnung der Wegtreue entwickelt.

Die Methode verwendet die nicht normalisierten Originalflüge. Wie auch in der von Freeman et al. (2010) verwendeten Methode werden 500 aufeinanderfolgende, äquidistante Punkte auf eine gerade Linie zwischen dem Ort der Freilassung und dem Taubenschlag gelegt. Anschliessend wird durch jeden Punkt eine senkrecht zur Verbindungslinie stehende Gerade gelegt. Im nächsten Schritt werden für jede der senkrechten Geraden die nächsten Nachbarpunkte der fünf Originalflüge verwendet, um eine mittlere Position zu berechnen. Der Punkt auf der Verbindungslinie wird dann auf diese Mittelposition verschoben. Die Wegtreue wird als die Standardabweichung der Distanz zwischen der Mittelposition und dem nächsten Nachbarpunkt der fünf Originalflüge berechnet. Die Standardabweichung wurde gewählt, da der Wertebereich kleiner ist als bei der Varianz und somit eine übersichtlichere Darstellung möglich war.

Die Wegtreue wurde für alle Tauben berechnet und in Form von Boxplots dargestellt.

Um einen möglichen Zusammenhang zwischen der Wegtreue und den einzelnen Bewegungsparameter identifizieren zu können, wurden die Boxplots der Wegtreue und diejenigen der einzelnen Parameter auf verschiedenen Skalen einander gegenübergestellt und visuell verglichen. Zusätzlich wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt.

7 Resultate und Interpretation

Im folgenden Kapitel werden die Resultate der durchgeführten Experimente vorgestellt und interpretiert.

7.1 Fussgänger-Daten

Um den Einfluss des eingeschränkten Raumes sowie des Map Matchings auf die Bewegungsparameter der Fussgänger zu untersuchen, wurden in einem Experiment die Bewegungsparameter der original GPS-Aufnahmepunkte mit denjenigen der gematchten Daten auf acht zeitlichen Skalen verglichen.

7.1.1 Vergleich der Parameter der Original-GPS-Daten mit den gematchten Daten auf verschiedenen zeitlichen Skalen

Die Abbildungen 27-34 zeigen den Unterschied zwischen den Bewegungsparametern der Original-GPS-Daten und der gematchten Daten. Dafür wurde auf acht Skalen für jeden Aufnahmezeitpunkt einer Bewegung die Differenz zwischen dem Parameter im Originalpunkt und dem Parameter im gematchten Punkt berechnet. Für jede Bewegung wurde der Mittelwert sowie der Median der erhaltenen Differenzen bestimmt. Schliesslich wurde für jede Skala der Durchschnitt der Median- und Mittelwerte der 16 gültigen Bewegungen berechnet und graphisch dargestellt.

Geschwindigkeit

In Bezug auf die Geschwindigkeit (Abbildungen 27 und 28) ist bis zu einer Skala von 60 Sekunden der grösste Unterschied zwischen den Differenzen der Mittelwerte und den Differenzen der Mediane zu sehen. Dies lässt darauf schliessen, dass die Werte bis zu dieser Skala und insbesondere auf der kleinsten Skala von 2 Sekunden stark durch Störungen geprägt sind. Der Median, welcher gegenüber Extremwerten robuster ist, zeigt, dass die Differenz zwischen der Geschwindigkeit der Original-Daten und derjenigen der gematchten Daten bei grösser werdenden zeitlichen Skalen sinkt. Dieser Effekt kann durch den relativen Längenunterschied der betrachteten Bewegungsabschnitte erklärt werden. Die gematchten Aufnahmepunkte liegen innerhalb eines Strassenabschnitts mehr oder weniger auf einer geraden Linie, wohingegen die Originaldaten grössere Variationen aufweisen. Je kleiner die Skala gewählt wird, auf welcher die Ge-

7.1.1 Vergleich der Parameter der Original-GPS-Daten mit den gematchten Daten auf verschiedenen zeitlichen Skalen

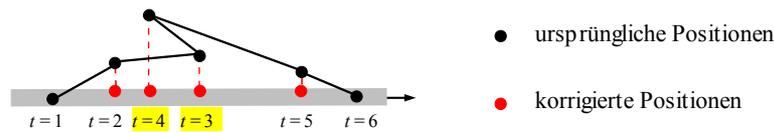


Abbildung 26: Schematische Darstellung einer Rückprojektion

schwindigkeit berechnet wird, desto grösser ist der relative Unterschied des zurückgelegten Weges und entsprechend ist die Differenz der Geschwindigkeit grösser. Ab einer Skala von zirka 60 Sekunden gleichen sich die Werte einander an. Es spielt also keine Rolle mehr, ob die Daten auf das Strassennetz verschoben werden oder nicht.

Beschleunigung

Bei der Beschleunigung (Abbildungen 29 und 30) sind auf den beiden kleinsten Skalen (2s, 4s) grosse Unterschiede zwischen den Median- und Mittelwerten zu sehen. Wie auch bei der Geschwindigkeit lässt dies auf viele Extremwerte in den Daten schliessen. Für die restlichen Skalen ist die Beschleunigung in den gematchten Daten grösser als diejenige in den Original-Daten. Wie auch bei der Geschwindigkeit gleichen sich die Werte bei grösser werdenden Skalen einander an.

Richtungsänderung

Die Mittel- und Medianwerte der Richtungsänderung (Abbildungen 31 und 32) unterscheiden sich, relativ gesehen, weniger stark, als diejenige der Geschwindigkeit und der Beschleunigung. Sowohl bei den Median- als auch bei den Mittelwerten ist deutlich zu sehen, dass bis zu einer Skala von 10 Sekunden die Richtungsänderungen in den gematchten Daten grösser sind. Bei einer Skala von 20 Sekunden springt die Differenz vom negativen in den positiven Bereich. Dies bedeutet, dass die Richtungsänderungen in den Original-Daten grösser sind. Da die Bewegungen nach dem Map Matching auf die mehrheitlich geraden Strassen verschoben wurden, ist die negative Differenz auf den kleinen Skalen unerwartet. Eine mögliche Erklärung dafür sind Rückprojektionen. Diese entstehen, wenn ein Punkt beim Map Matching relativ zur Bewegungsrichtung hinter den vorherigen Punkt projiziert wird (Abbildung 26). Dadurch entstehen Rückwärtsbewegungen und Richtungsänderungen von um die 180°. Solche Rückprojektionen treten in den Daten vor allem in den Bereichen der Punktkonzentrationen auf, da dort keine

eindeutige Bewegungsrichtung vorliegt. Die höheren Werte der Original-Daten in den grösseren Skalen wurden erwartet. Allerdings wurde angenommen, dass die Werte sich wie bei der Geschwindigkeit und der Beschleunigung einander angleichen. Dies aufgrund der Erwartung, dass bei grösseren Skalen nur noch die mehrheitlich rechtwinklige Struktur des Strassennetzes für die Änderungen der Richtung entscheidend ist. Dieser Effekt ist nicht deutlich zu erkennen. Eine mögliche Erklärung dafür bietet das in Abbildung 24 und Tabelle 4 skizzierte Ecken-Problem. In Tabelle 4 wurde anhand eines einfachen Beispiels die Richtungsänderung an einer Ecke für die Original-Daten und die gematchten Daten berechnet. Im Beispiel ist zu erkennen, dass sich die Richtungsänderungen deutlich unterscheiden.

Ein weiterer Grund für die fehlende Angleichung der Werte in den grösseren Skalen sind Punktkonzentrationen ausserhalb der Strassenflächen. In den Original-Daten entstehen in diesen Bereichen im Gegensatz zur restlichen Bewegung „willkürliche“ Winkel. In den gematchten Daten wurden die Punkte auf die Strasse verschoben und somit der restlichen Bewegungsrichtung angeglichen.

Gewundenheit

In Bezug auf die Gewundenheit (Abbildungen 33 und 34) ist zu sehen, dass die Werte auf den Skalen von 2 und 4 Sekunden für die gematchten Daten grösser sind. Wie bei den Richtungsänderungen ist das auch in diesem Fall unerwartet, da die gematchten Punkte auf den geraden Kanten und schmalen Strassenflächen liegen und somit die Gewundenheit sehr nahe bei 1 liegen sollte. Eine Erklärung für die unerwartet hohen Werte sind auch hier Rückprojektionen (Abbildung 26). Als Beispiel stelle man sich vor, dass der erste von drei zeitlich aufeinanderfolgenden Punkten auf einer Geraden 2 Meter vom dritten Punkt und 7 Meter vom zweiten Punkt entfernt ist. Die resultierende Gewundenheit im zweiten Punkt läge dadurch bei 7 statt bei 1 und wäre somit extrem hoch.

Ab einer zeitlichen Skala von 10 Sekunden sind die Gewundenheitswerte der Original-Daten grösser als diejenigen der gematchten Daten. Bei der Betrachtung der Mediane ist zu sehen, dass die Differenz zwischen der Skala von 10 Sekunden bis zur Skala von 30 Sekunden grösser wird und auf den höheren Skalen wieder sinkt. Dies wird so interpretiert, dass bis zur Skala von 30 Sekunden die in die Berechnung miteinbezogenen Bewegungsabschnitte vorwiegend auf einem einzigen Strassensegment liegen und somit nicht durch die Struktur des

7.1.1 Vergleich der Parameter der Original-GPS-Daten mit den gematchten Daten auf verschiedenen zeitlichen Skalen

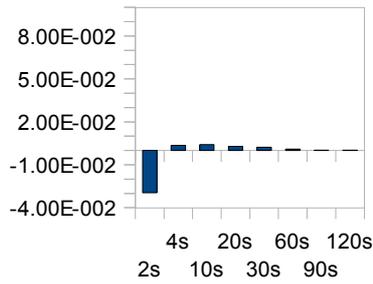


Abbildung 27: Differenzen der Mittelwerte der Geschwindigkeit

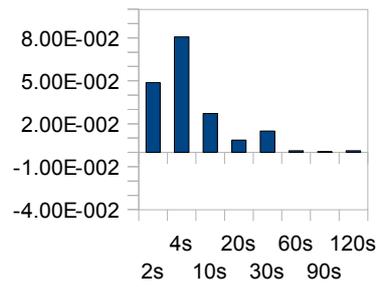


Abbildung 28: Differenzen der Mediane der Geschwindigkeit

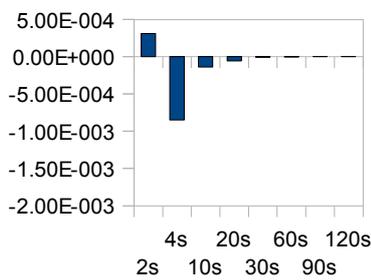


Abbildung 29: Differenz der Mittelwerte der Beschleunigung

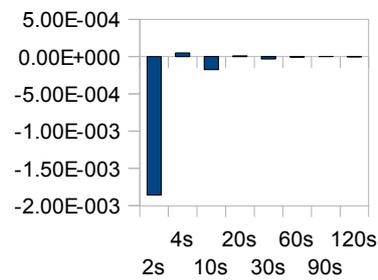


Abbildung 30: Differenz der Mediane der Beschleunigung

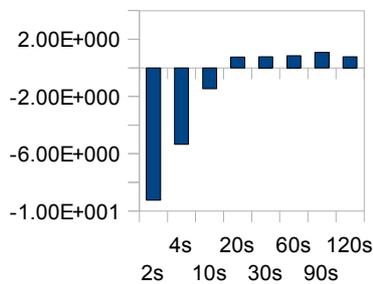


Abbildung 31: Differenz der Mittelwerte der Richtungsänderung

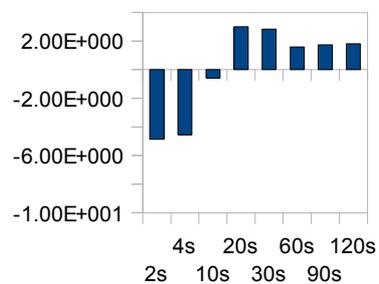


Abbildung 32: Differenz der Mediane der Richtungsänderung

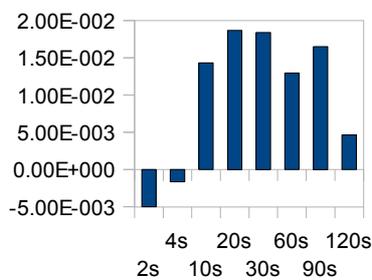


Abbildung 33: Differenzen der Mittelwerte der Gewundenheit

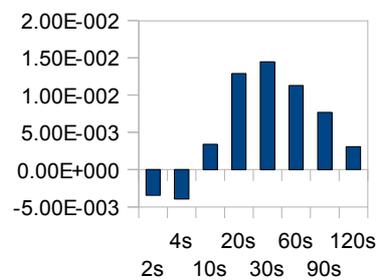


Abbildung 34: Differenzen der Mediane der Gewundenheit

7.1.1 Vergleich der Parameter der Original-GPS-Daten mit den gematchten Daten auf verschiedenen zeitlichen Skalen

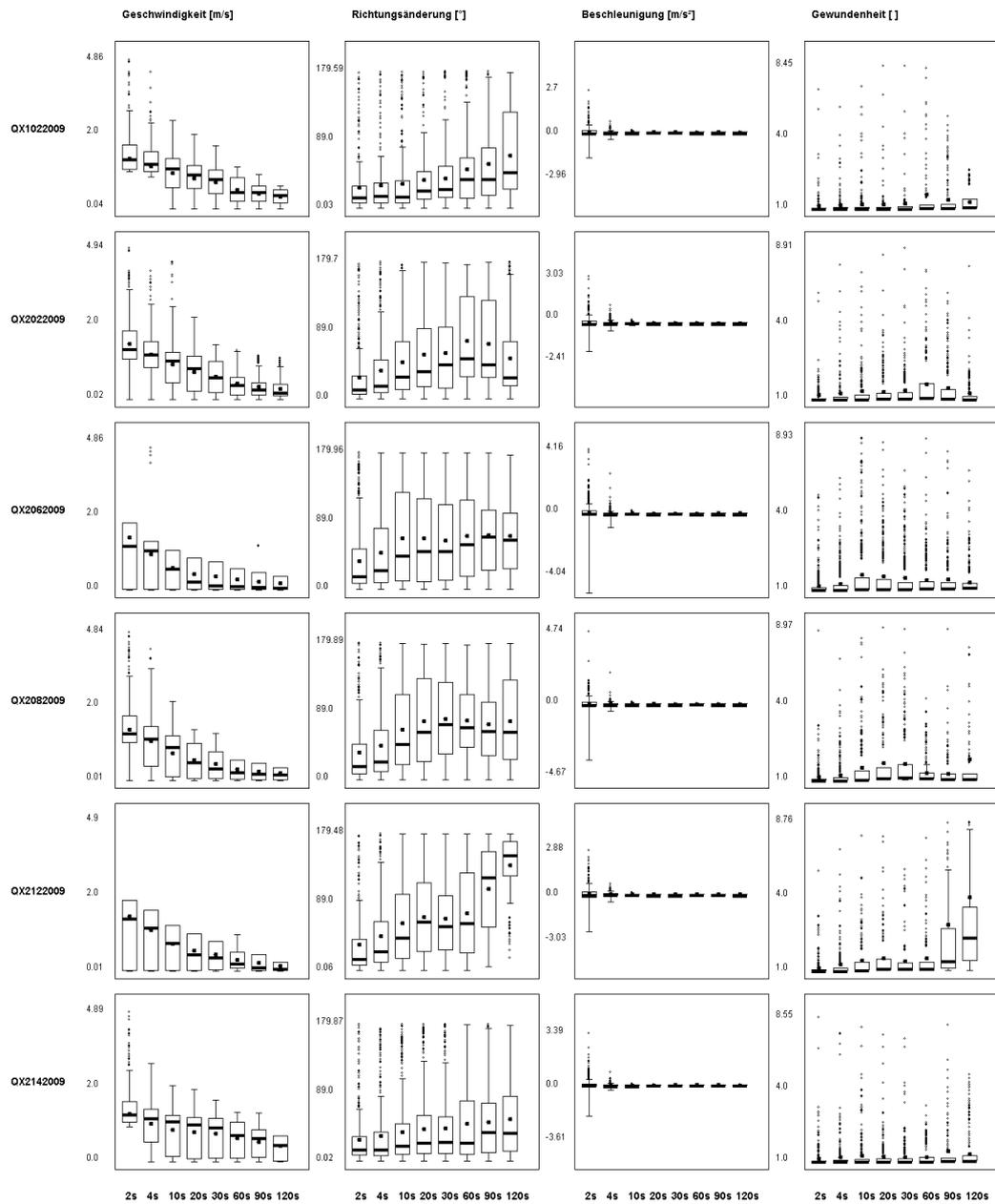


Abbildung 35: Bewegungsparameter der original GPS-Daten

7.1.1 Vergleich der Parameter der Original-GPS-Daten mit den gematchten Daten auf verschiedenen zeitlichen Skalen

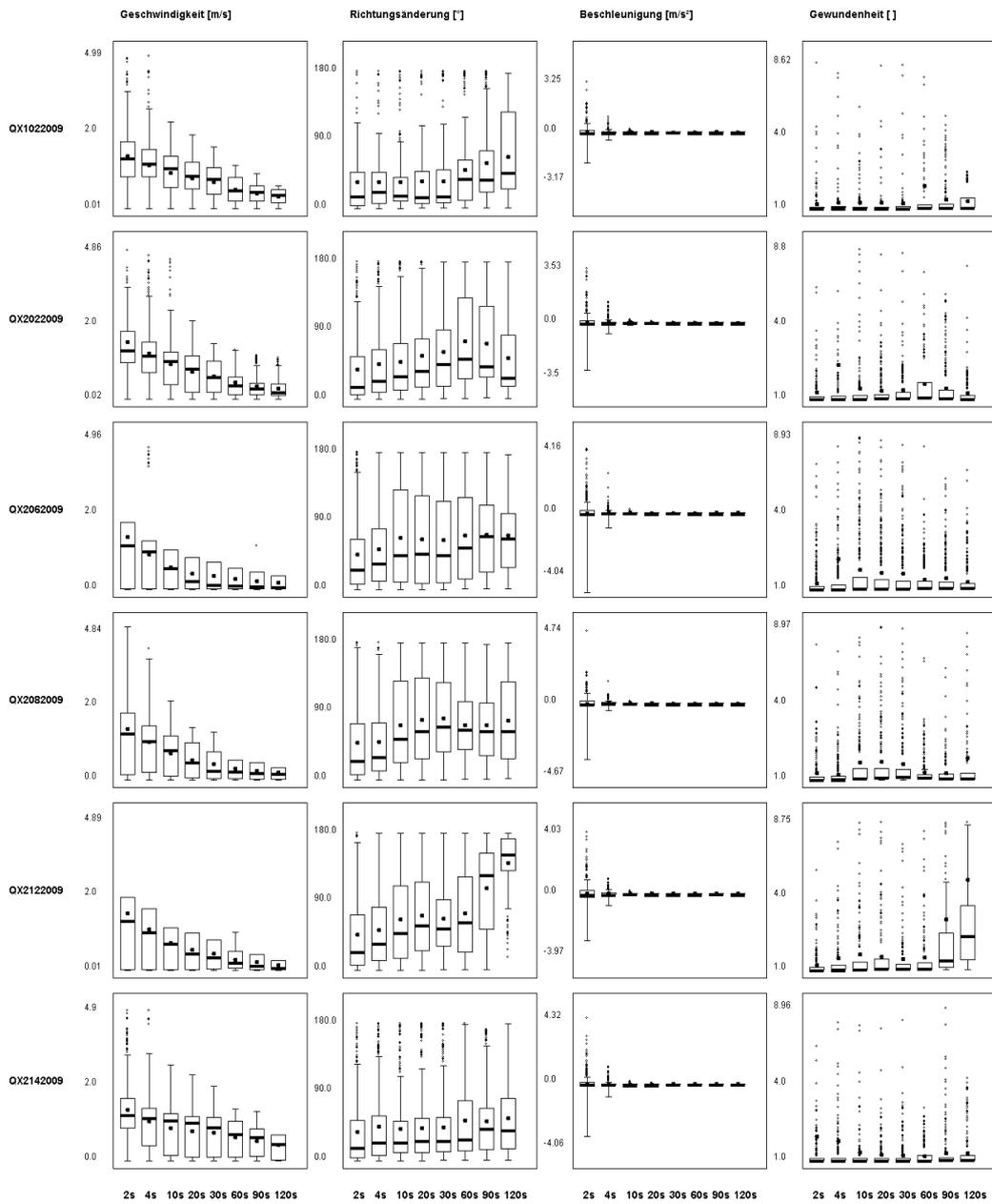


Abbildung 36: Bewegungsparameter der ans Netzwerk angepassten Daten

Strassennetzes beeinflusst werden. Ab einer Skala von 60 Sekunden wird die Bewegung über mehrere Strassenabschnitte betrachtet und die Struktur des Strassennetzes beeinflusst somit die Bewegung. Bei grösser werdenden Skalen wird dieser Einfluss immer dominanter, so dass die Gewundenheit in der Bewegung praktisch nur noch von der Struktur des Strassennetzes abhängt.

Für sechs exemplarische Trajektorien (*QX1022009*, *QX2022009*, *QX2062009*, *QX2082009*, *QX2122009* und *QX2142009*) wurden jeweils für die Original-Daten (Abbildung 35) sowie die gematchten Daten (Abbildung 36) Boxplots erstellt. Da die Unterschiede zwischen den Parameterwerten der Original-Daten und der Parameterwerte der gematchten Daten jedoch relativ klein sind, kann durch einen visuellen Vergleich der Plots nur wenig ausgesagt werden. Die einzigen grösseren Unterschiede sind in der Streuung der Werte in den beiden kleinsten Skalen (2s und 4s) zu sehen. In den meisten Fällen ist die Streuung der Werte in den gematchten Daten deutlich grösser und es sind mehr Extremwerte vorhanden. Diese Beobachtung bestärkt die Annahme, dass die grossen Unterschiede der Differenzen der Median- und Mittelwerte auf den beiden kleinsten Skalen in den Abbildungen 27-34 die Folge von Unregelmässigkeiten und Extremwerten in den Daten sind.

Exemplarisch wurde für den Fussgänger *QX2062009* die Verteilung der Richtungsänderungen in den Original-Daten (Abbildung 37) und in den gematchten Daten (Abbildung 39) mit Hilfe von Sternplots auf acht zeitlichen Skalen dargestellt.

Wie bereits angenommen wurde, sind Rückwärtsbewegungen, also Richtungsänderungen von 180° , in den gematchten Daten auf den kleinen Skalen zu erkennen. Allerdings sind auch 180° -Winkel in den grösseren Skalen, sowohl in den gematchten als auch in den Original-Daten, zu sehen. Betrachtet man die Abbildungen 38 und 40 ist dies jedoch nachvollziehbar, da zuerst eine Hin- und anschliessend eine Rückwärtsbewegung über den gesamten Track hinweg stattgefunden hat.

Es wurde erwartet, dass ab einer bestimmten Skala das rechtwinklige Strassennetz für die Bewegung dominierend ist. Das bedeutet, dass mehrheitlich Winkel im Bereich von 0° , 90° , 180° oder 270° auftreten müssten.

Sowohl in den gematchten als auch in den Original-Daten ist ein solches Muster ab einer Skalen von 60 Sekunden zu sehen.

7.1.1 Vergleich der Parameter der Original-GPS-Daten mit den gematchten Daten auf verschiedenen zeitlichen Skalen

Verteilung der Richtungsänderung der Original-Daten des Fußgängers QX2062009

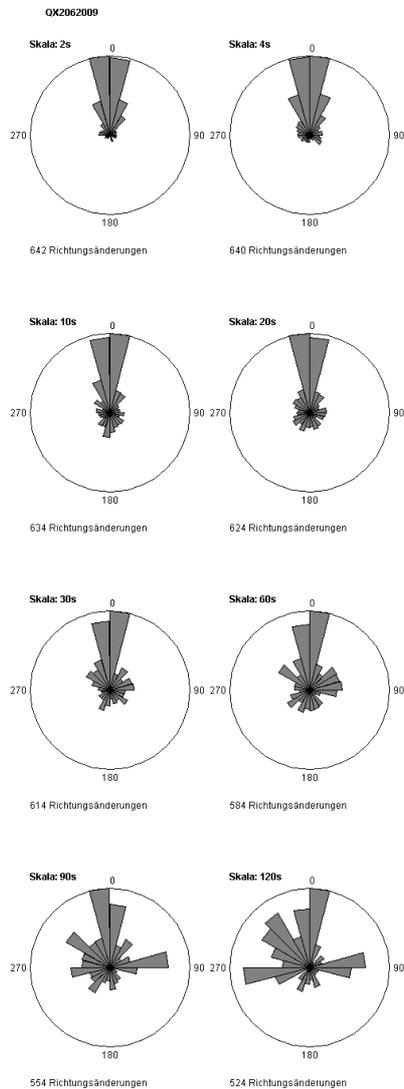


Abbildung 37: Verteilung der Richtungsänderungen in den Original-Daten

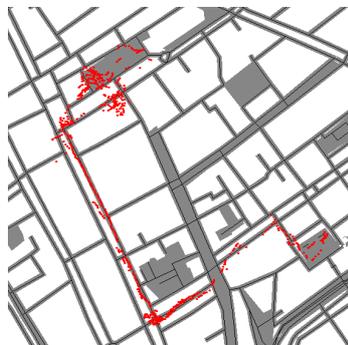


Abbildung 38: Original Aufnahmepunkte

Verteilung der Richtungsänderung der ans gematchten Daten des Fußgängers QX2062009

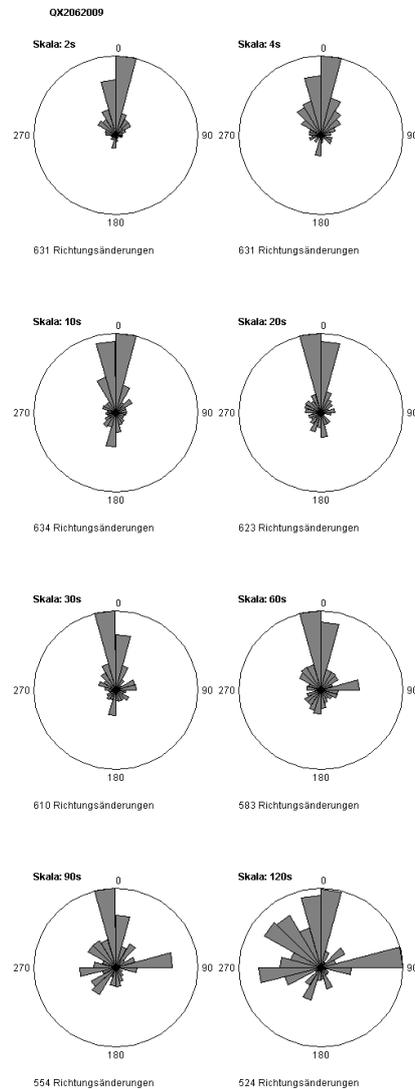


Abbildung 39: Verteilung der Richtungsänderungen in den gematchten Daten

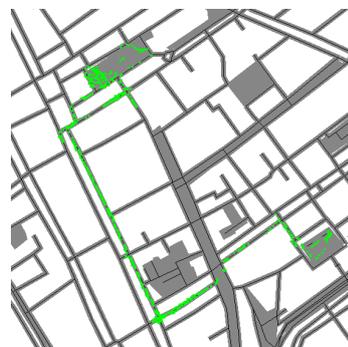


Abbildung 40: Gematchte Aufnahmepunkte

7.1.1 Vergleich der Parameter der Original-GPS-Daten mit den gematchten Daten auf verschiedenen zeitlichen Skalen

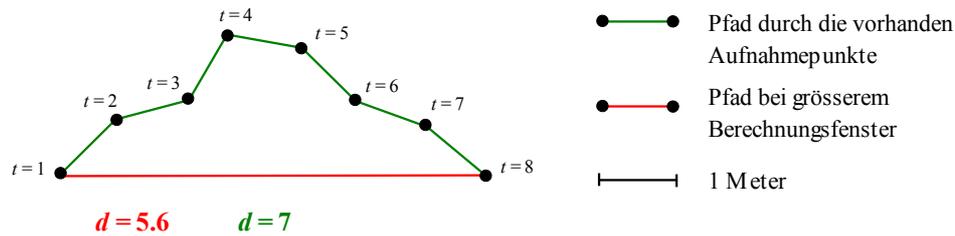


Abbildung 41: Verhältnis zwischen zurückgelegter Strecke durch alle vorhandenen Aufnahmepunkte und bei einem grösseren Berechnungsfenster. In der Abbildung entspricht t der Zeit und d der Distanz

Anhand des durchgeführten Experimentes konnte gezeigt werden, dass sich der Einfluss des Map Matchings in Bezug auf die analysierten Bewegungsparameter mit der gewählten zeitlichen Skala ändert.

Weiter wurde durch das Experiment vor allem ersichtlich, dass auf kleinen Skalen bis ca. 10-20 Sekunden der Einfluss von Störungen in den Daten die Werte der Original-Daten und auch der gematchten Daten zu stark beeinflussen, um Rückschlüsse über das Bewegungsverhalten ziehen zu können. Weiter konnte gezeigt werden, dass ungenaues oder fehlerhaftes Map Matching die Parameterwerte stark beeinflussen kann. Auch wurde ersichtlich, dass der Einfluss des Map Matchings auf kleinen Skalen grösser ist und mit zunehmender Skala abnimmt. Diesbezüglich konnte aus den Resultaten der Analyse geschlossen werden, dass ab einer zeitlichen Skala von ca. 60 Sekunden die Struktur des Strassennetzes auf die Gewundenheit der Bewegung sowie die Richtungsänderungen während der Bewegung einen dominierenden Einfluss hat.

7.2 Tauben-Daten

In Bezug auf die Tauben-Daten wurde untersucht, welchen Einfluss die zeitliche Skala auf die Bewegungsparameter hat und wie sich die Parameter in Abhängigkeit der Zeit über mehrere Skalen verhalten. Weiter wurde die Ähnlichkeit der Parameter zwischen einzelnen Tauben, die Ähnlichkeit zwischen verschiedenen Skalen sowie das Lernverhalten der Tiere analysiert. Schliesslich wurde untersucht, ob und auf welchen zeitlichen Skalen ein Zusammenhang zwischen der Wegtreue und einem der Bewegungsparameter besteht.

7.2.1 Einfluss der zeitlichen Skala auf die Bewegungsparameter

Als exemplarisches Beispiel zeigt Abbildung 42 die vier untersuchten Bewegungsparameter der fünf aufeinanderfolgenden Flüge der Taube *rwt* auf acht zeitlichen Skalen.

Die Boxplots zeigen, dass die Streuung auf grösseren Skalen generell kleiner wird. Dies kann auf einen generellen Glättungseffekt bei grösseren Berechnungsfenstern zurückgeführt werden. Dabei ist der relative Einfluss von Extremwerten kleiner, je grösser das Berechnungsfenster gewählt wird.

Geschwindigkeit

Bei allen Flügen ist in Bezug auf die Geschwindigkeit eine leichte Abnahme des Mittelwerts sowie des Medians zu sehen. Da für die Berechnung der Geschwindigkeit die euklidische Distanz zwischen zwei Punkten verwendet wird, wird angenommen, dass dieser Effekt durch die Unterschätzung des zurückgelegten Weges bei grösser werdenden Skalen erklärt werden kann (Abbildung 41).

Beschleunigung

In Bezug auf die Beschleunigung ist zu sehen, dass sich diese bei grösser werdenden Skalen bei 0 m/s^2 einpendelt. Das bedeutet, dass die Geschwindigkeit auf den grösseren Skalen weniger Variationen unterliegt und somit konstanter ist. Dieses Verhalten lässt sich durch die Art der Berechnung begründen. Aufgrund der diskreten Aufnahmewerte wird die Beschleunigung in einem Punkt nicht durch die Geschwindigkeitsänderung in einem infinitesimalen Zeitabstand, sondern über den gesamten Zeitraum des Berechnungsfensters bestimmt. Je grösser dieser Zeitraum ist, desto kleiner ist deshalb das Verhältnis zwischen der Geschwindigkeitsänderung und der Zeit.

Richtungsänderung

Die Werte der Richtungsänderungen sind bei allen Flügen und auf allen Skalen relativ tief. In den Flügen 2, 3, 4 und 5 steigen die Werte bis zu einer Skala von 20-30 Sekunden und sinken schliesslich wieder. Betrachtet man die Flüge in Abbildung 44, lässt sich dies durch die Geometrie der Bewegung erklären. Auf den kleinen Skalen bewegt sich die Taube relativ konstant geradeaus. Auf den mittleren Skalen ist der Bogen in der Bewegung sichtbar und auf den grossen Skalen ist die Hauptbewegung vom Ort der Freilassung zum Taubenschlag dominierend.

7.2.1 Einfluss der zeitlichen Skala auf die Bewegungsparameter

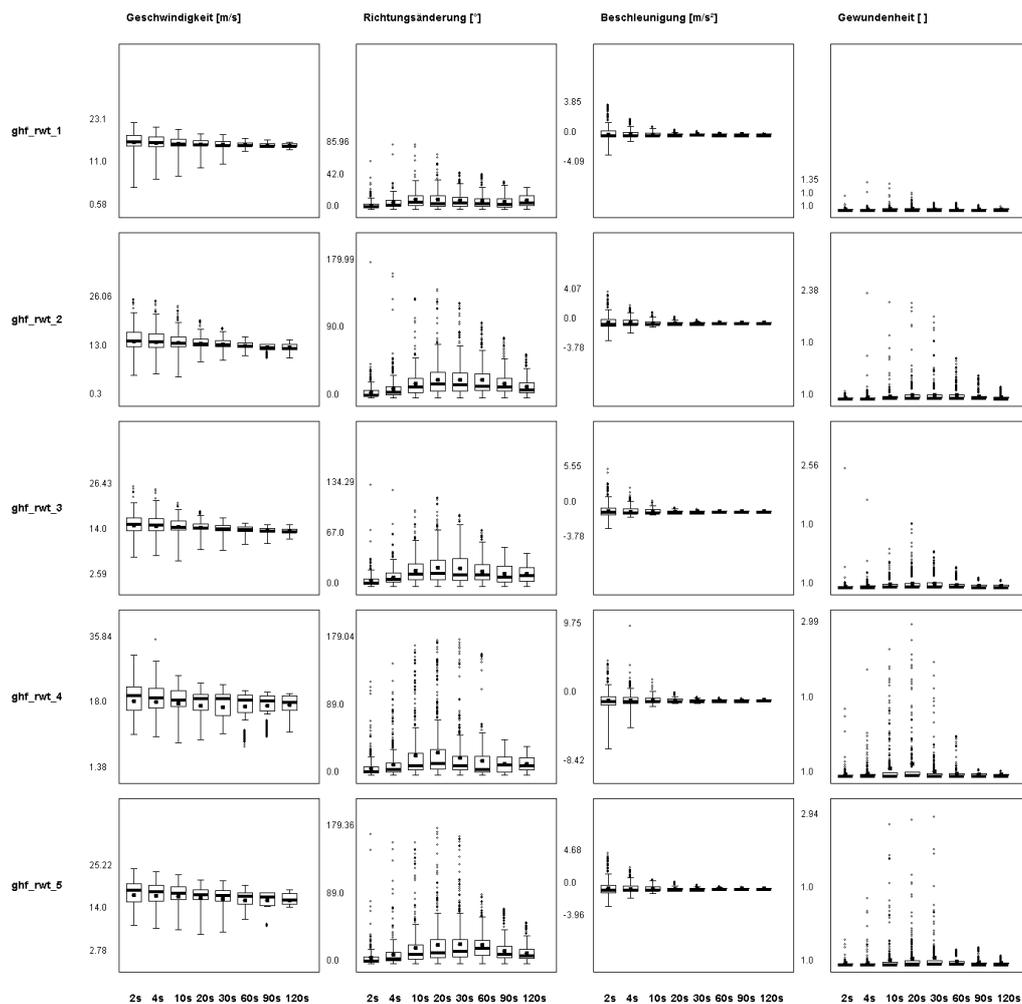


Abbildung 42: Boxplots der vier Bewegungsparameter der fünf Flüge der Taube *rwt* auf acht zeitlichen Skalen

Gewundenheit

Der Median der Gewundenheit ist für alle Flüge und für alle Skalen nahe bei 1. Der Mittelwert sowie die Streuung sind bei allen Flügen auf der kleinsten sowie grössten Skala tief und weisen auf einer der mittleren Skalen ein Maximum auf. Wie bei den Richtungsänderungen widerspiegelt dieses Verhalten die Geometrie der Flüge. Auf kleinen Skalen ist die Bewegung sehr geradlinig. Auf grösseren Skalen entspricht die Gewundenheit der Direktheit des Fluges vom Start- bis zum Zielort. Die mittleren Skalen zeigen die Effizienz (Armstrong et al., 2008) während des Fluges.

7.2.1 Einfluss der zeitlichen Skala auf die Bewegungsparameter

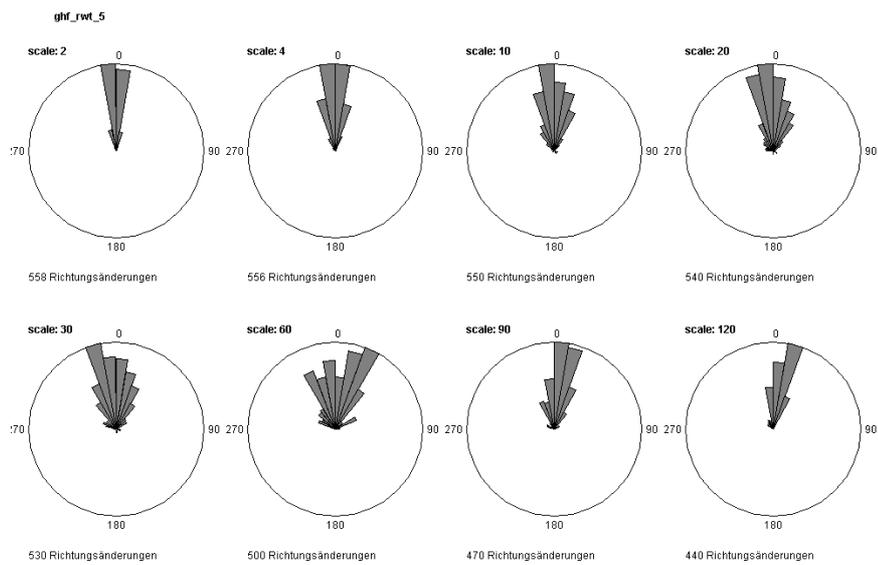


Abbildung 43: Verteilung der Richtungsänderungen im 5. Flug der Taube *rwt*

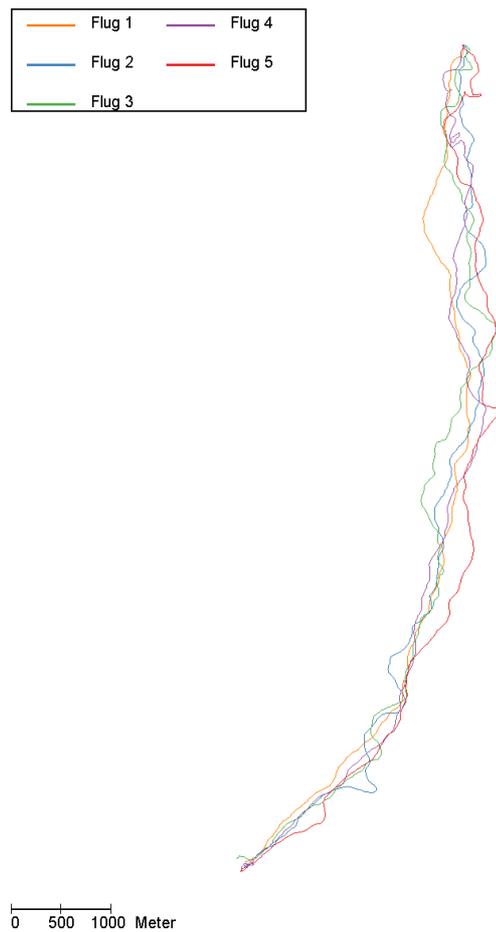


Abbildung 44: Flüge der Taube *rwt*

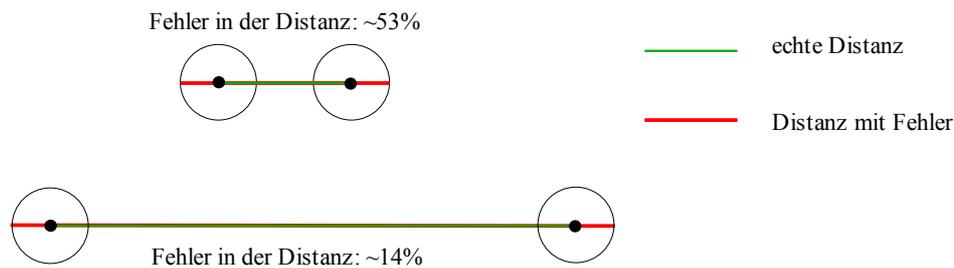


Abbildung 45: Einfluss des Fehlers in der Position auf die Bestimmung der Distanz zwischen zwei Punkten

Als exemplarisches Beispiel sind in Abbildung 43 die Verteilungen der Richtungsänderungen im 5. Flug der Taube *rwt* auf den acht betrachteten zeitlichen Skalen in Form von Sternplots mit einer Klassenbreite von 10° dargestellt. Wie schon in den Boxplots erkennt man, dass die Änderungen generell klein sind und die Streuung in den Skalen von 20, 30 und 60 Sekunden im Gegensatz zu den anderen Skalen grösser ist. Weiter erkennt man in den mittleren Skalen, dass sowohl Richtungsänderungen nach links als auch nach rechts stattfinden. Auf den Skalen von 90 und 120 Sekunden ist praktisch nur noch die Hauptrichtung der Bewegung vom Ort der Freilassung zum Taubenschlag leicht nach rechts erkennbar.

7.2.2 Zeitliche Abhängigkeit der Bewegungsparameter auf verschiedenen Skalen

In den Abbildungen 46-49 sind die Bewegungsparameter für jeden möglichen Aufnahmepunkt exemplarisch für den 5. Flug der Taube *rwt* auf verschiedenen zeitlichen Skalen dargestellt. Aus Darstellungsgründen wurden nur fünf (4s, 10s, 20s, 60s und 120s), statt wie bisher acht zeitliche Skalen gewählt.

Bei allen Parametern ist für grösser werdende Skalen ein Glättungseffekt erkennbar. Wie auch schon in den Boxplots zu sehen ist, ist die Streuung der Parameterwerte auf der kleinsten Skala von 4 Sekunden am grössten. Die Werte der Skala von 2 Sekunden wurden nicht dargestellt, da auf dieser Skala die Streuung noch grösser ist als auf der Skala von 4 Sekunden und dies die Abbildung nicht mehr leserlich gemacht hätte. Die grosse Streuung in den kleinen Skalen kann durch die Ungenauigkeit in der Position der Aufnahmepunkte erklärt werden. Dabei ist das Verhältnis zwischen dem Fehler und dem korrekten Wert grösser, wenn die Skala klein ist (Abbildung 45). Damit ist auch der Einfluss auf

den berechneten Wert grösser (Jerde und Visscher, 2005).

In allen Abbildungen ist anhand der Länge und Lage der Verbindungslinie der Werte zu erkennen, für welche Aufnahmezeitpunkte auf einer bestimmten Skala ein Parameterwert berechnet werden konnte.

Auf den Skalen zwischen 4 Sekunden und 20 Sekunden ist die Variation in den Parametern, wie bereits erwähnt, sehr gross und (wahrscheinlich) fehlerbehaftet. Aussagen über das Bewegungsverhalten wären deshalb wenig sinnvoll.

Auf der Skala von 60 Sekunden ist bereits relativ klar zu sehen, wie sich die Parameterwerte während des Fluges verhalten. Allerdings können für die ersten sowie letzten 30 Sekunden des Fluges keine Werte berechnet werden. Betrachtet man nur die Werte auf der Skala von 60 Sekunden, ist zu sehen, dass beispielsweise die Geschwindigkeit niedrig beginnt und anschliessend grösser wird. Betrachtet man aber auch die Skala von 20 Sekunden, ist zu erkennen, dass in den ersten 30 Sekunden die Geschwindigkeit bereits zu und wieder abgenommen hat. Bei der Gewundenheit sowie der Beschleunigung sind die Werte auf der Skala von 120 Sekunden praktisch konstant und Aussagen über das Flugverhalten in Abhängigkeit der Zeit sind nur noch begrenzt möglich beziehungsweise die Werte entsprechen mehr oder weniger dem Mittelwert.

Bei Rückschlüssen auf die Bewegung muss somit immer berücksichtigt werden, für welche Aufnahmezeitpunkte die betrachteten Werte berechnet wurden und welchen Einfluss Fehler in dieser Skala haben.

Da in der verwendeten Darstellung für alle Skalen sichtbar ist, für welche Aufnahmezeitpunkte ein Parameterwert berechnet wird und sich die X-Achsen (=Zeit-Achsen) in den Abbildungen der einzelnen Parameter entsprechen, ist es möglich, die Parameter in einem bestimmten Punkt zu vergleichen und miteinander in Beziehung zu setzen. Beispielsweise sind nach ca. 260 Sekunden eine Abnahme der Geschwindigkeit, eine negative Beschleunigung, eine grosse Richtungsänderung sowie eine erhöhte Gewundenheit sichtbar. Dies lässt auf ein „Ereignis“, wie beispielsweise das Umfliegen eines Hindernisses oder Desorientierung, im Bewegungsverhalten schliessen. Auf den kleineren Skalen sind die Werte relativ zum Rest sehr hoch beziehungsweise tief, was die Erkennung des „Ereignisses“ ermöglicht. Auf den grösseren Skalen lässt sich die Dauer beziehungsweise die zeitliche Auswirkung des „Ereignisses“ anhand der Breite des Bereichs mit erhöhten Werten erkennen.

7.2.2 Zeitliche Abhängigkeit der Bewegungsparameter auf verschiedenen Skalen

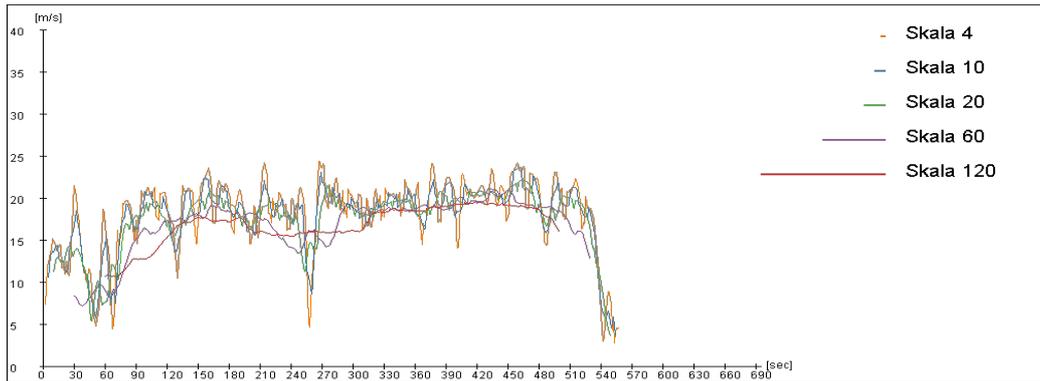


Abbildung 46: Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeit auf fünf zeitlichen Skalen

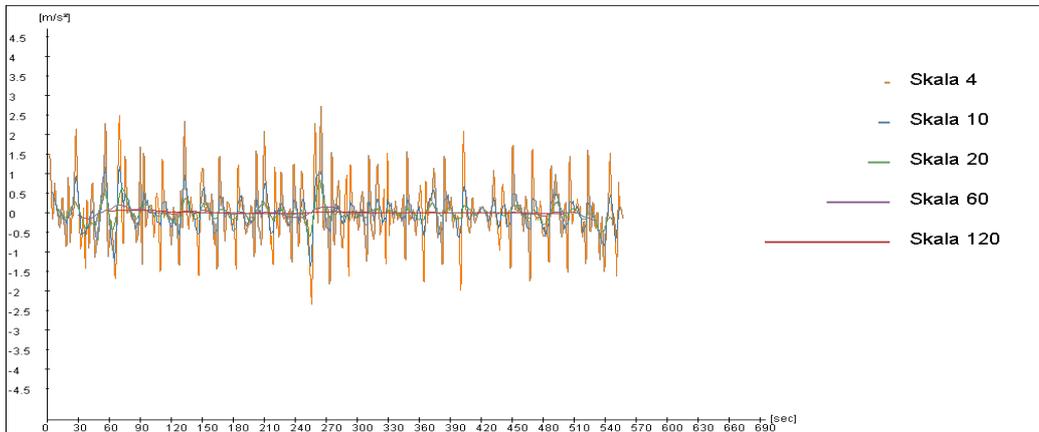


Abbildung 47: Beschleunigung in Abhängigkeit der Zeit auf fünf zeitlichen Skalen

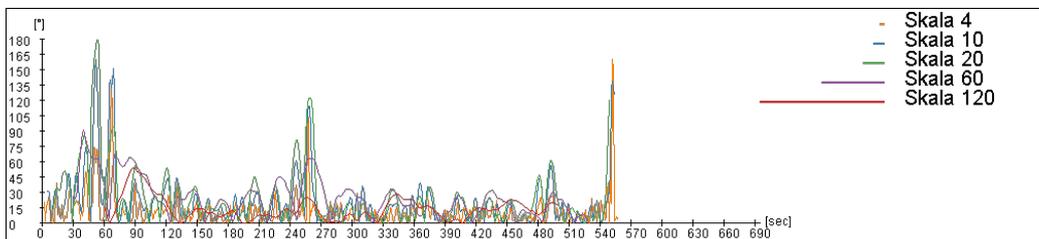


Abbildung 48: Richtungsänderung in Abhängigkeit der Zeit auf fünf zeitlichen Skalen

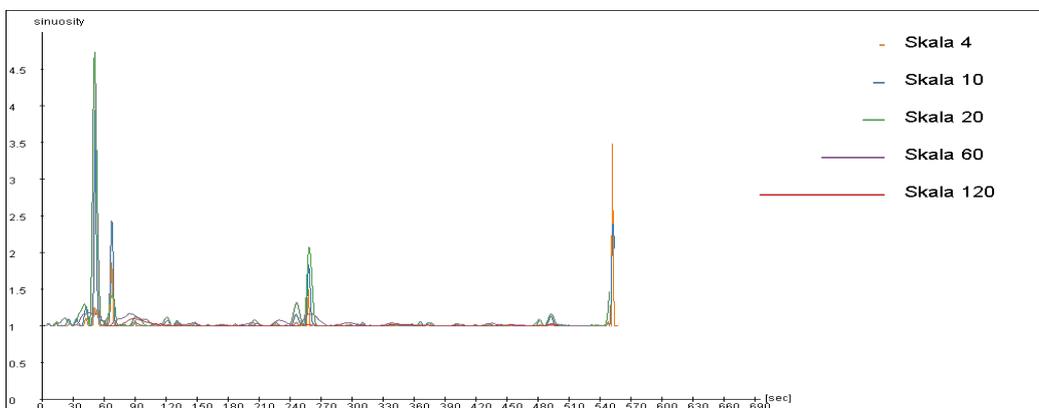


Abbildung 49: Gewundenheit in Abhängigkeit der Zeit auf fünf zeitlichen Skalen

7.2.3 Ähnlichkeiten der Parameter zwischen einzelnen Tauben, Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Skalen sowie Lern-verhalten

In den Abbildungen 50-53 sind Small Multiples der vier Bewegungsparameter visualisiert (vergrösserte Darstellungen befinden sich im Anhang). Aus Darstellungs-Gründen wurden nur fünf zeitliche Skalen (4s, 10s, 20s, 60s und 120s) und vier exemplarische Tauben (*a29*, *b17*, *liv* und *rwt*) verwendet. In den Reihen der Small Multiples sind jeweils die von der Zeit abhängigen Bewegungsparameter einer Taube auf fünf Skalen dargestellt. Eine Spalte enthält die Bewegungsparameter einer Skala aller vier Tauben.

Durch die Small Multiples-Darstellung ist zu sehen, dass die einzelnen Parameter auf den einzelnen Skalen die gleiche Grössenordnung aufweisen und sich in den meisten Fällen nur in bestimmten Bereichen stark unterscheiden.

Durch den Vergleich der Parameter zwischen den Tieren kann das Bewegungsverhalten der einzelnen Tauben in Beziehung gesetzt werden.

Auf kleineren Skalen können anhand der Häufigkeit hoher Gewundenheitswerte Hypothesen über die Sicherheit in der Wahl des Weges gemacht werden. Eine Hypothese wäre: „Hohe Gewundenheitswerte lassen auf grössere Unsicherheiten schliessen“. Die Gewundenheitswerte auf grösseren Skalen können verglichen werden, um zu untersuchen, welche Taube grössere „Umwege“ macht. Die entsprechende Hypothese wäre: „Hohe Gewundenheitswerte lassen auf grosse Umwege schliessen“. Zeigen alle Tauben zu ähnlichen Zeiten hohe Gewundenheitswerte, kann auf ein Hindernis geschlossen werden, welches umflogen werden muss.

Da die Gewundenheit von der Richtungsänderung abhängt, bedeuten hohe Gewundenheitswerte, dass auch grössere Richtungsänderungen stattgefunden haben müssen. Hohe Richtungsänderungen können somit gleich wie die hohen Gewundenheitswerte verglichen werden.

Die Werte der Geschwindigkeit können als Zeichen der Fitness der Tauben interpretiert und verglichen werden. Bei der Analyse der Variationen der Geschwindigkeitswerte kann die Hypothese aufgestellt werden, dass weniger Variationen eine grössere Sicherheit über die Richtigkeit des gewählten Weges indizieren. Durch den Vergleich zwischen Tauben können unter Umständen zeitliche Bereiche identifiziert werden, in welchen bei allen Tauben entweder starke oder schwache Variationen auftreten. Bereiche mit grossen Variationen könnten auf räumliche/strukturelle Gebiete zurückgeführt werden, in welchen sich die Tauben generell eher unwohl beziehungsweise unsicher fühlen. Bereiche mit

niedrigen Variationen hingegen als Gebiete, in welchen sich die Tauben wohl fühlen beziehungsweise, welche den Tauben vertraut sind.

Die Beschleunigungswerte auf kleinen Skalen sind sehr stark durch Unsicherheiten beeinflusst. Auf den grösseren Skalen liegen die Werte praktisch bei 0 m/s^2 und zwischen den Tauben sind nur sehr kleine Unterschiede zu erkennen. Zudem ist durch die verwendete Darstellungsform bereits ersichtlich, wie sich die Geschwindigkeit verändert. Der Vergleich der Werte liefert somit keine zusätzlichen Informationen.

Da die fünf Einzelflüge einer Taube zeitlich hintereinander stattgefunden haben, kann anhand eines Vergleichs der Flüge das Lernverhalten einer Taube untersucht werden.

Unter der Annahme, dass ein Lernverhalten stattgefunden hat, wurde erwartet, dass über die fünf Flüge hinweg:

- die Flugzeit abnimmt
- die Gewundenheitswerte abnehmen
- die Häufigkeit von hohen Gewundenheitswerten abnimmt
- die Häufigkeit der Richtungsänderungen abnimmt
- die Geschwindigkeit zunimmt
- die Variation in der Geschwindigkeit abnimmt

In Bezug auf die Flugzeit ist in Abbildungen 50-53 zu sehen, dass keine der Tauben das erwartete Lernverhalten aufweist und auch kein anderer offensichtlicher Zusammenhang zwischen der Flugzeit und der Anzahl vorheriger Flüge besteht. Auch bei den Richtungsänderungen, der Gewundenheit, der Geschwindigkeit sowie der Variation der Geschwindigkeit ist das erwartete Verhalten nicht erkennbar.

Dass sich die Bewegungsparameter der aufeinanderfolgenden Flüge nicht wie erwartet verhalten, kann verschiedene Ursachen haben. Eine Möglichkeit ist, dass die Erwartungen nicht zutreffend sind. Eine andere Erklärung liegt in den Daten selbst. Da es sich bei den Flügen nicht um die ersten, sondern um die letzten von insgesamt 20 Flügen handelt, ist es vorstellbar, dass der Lernprozess bereits abgeschlossen ist und die Variationen zwischen den Flügen andere Gründe haben. Diese Vermutung wird bestätigt durch die von Armstrong et al. (2008) durchgeführte Studie, in welcher das Lernverhalten über alle 20 Flüge hinweg anhand der Effizienz (berechnet als die Gewundenheit des gesamten Flugs) untersucht wurde.

7.2.3 Ähnlichkeiten der Parameter zwischen einzelnen Tauben, Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Skalen sowie Lern-verhalten

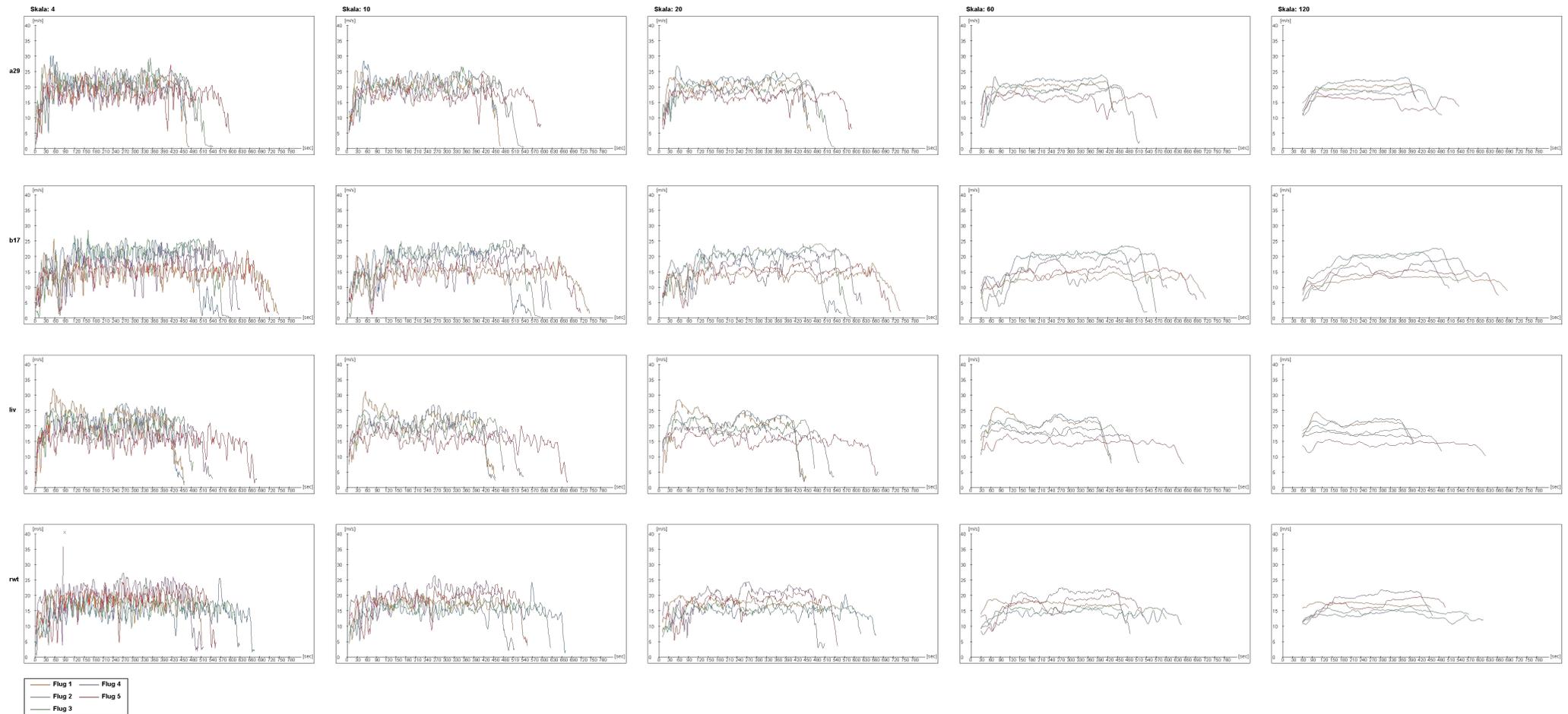


Abbildung 50: Small Multiples der Geschwindigkeit für fie Flüge von vier Tauben

7.2.3 Ähnlichkeiten der Parameter zwischen einzelnen Tauben, Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Skalen sowie Lern-verhalten

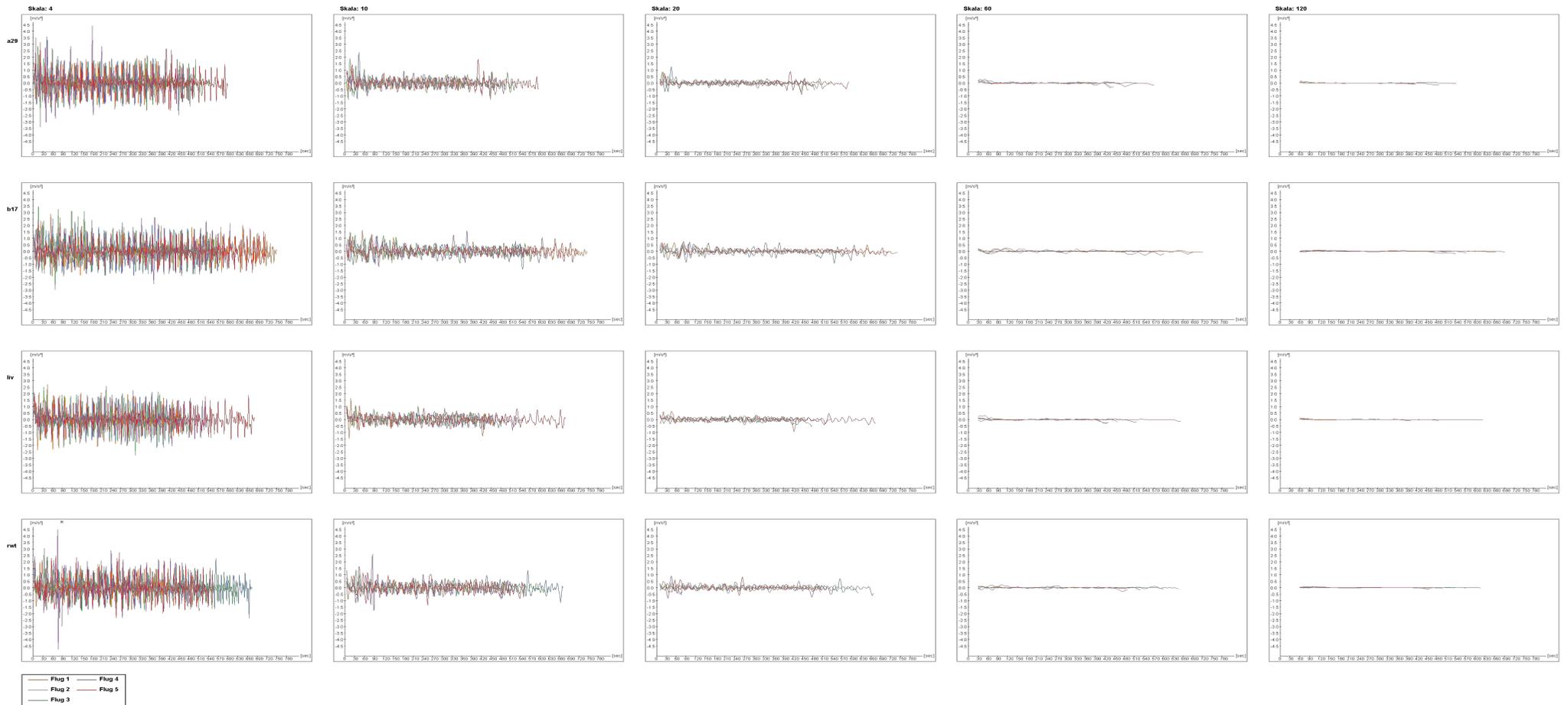


Abbildung 51: Small Multiples der Beschleunigung für die Flüge von vier Tauben

7.2.3 Ähnlichkeiten der Parameter zwischen einzelnen Tauben, Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Skalen sowie Lern-verhalten

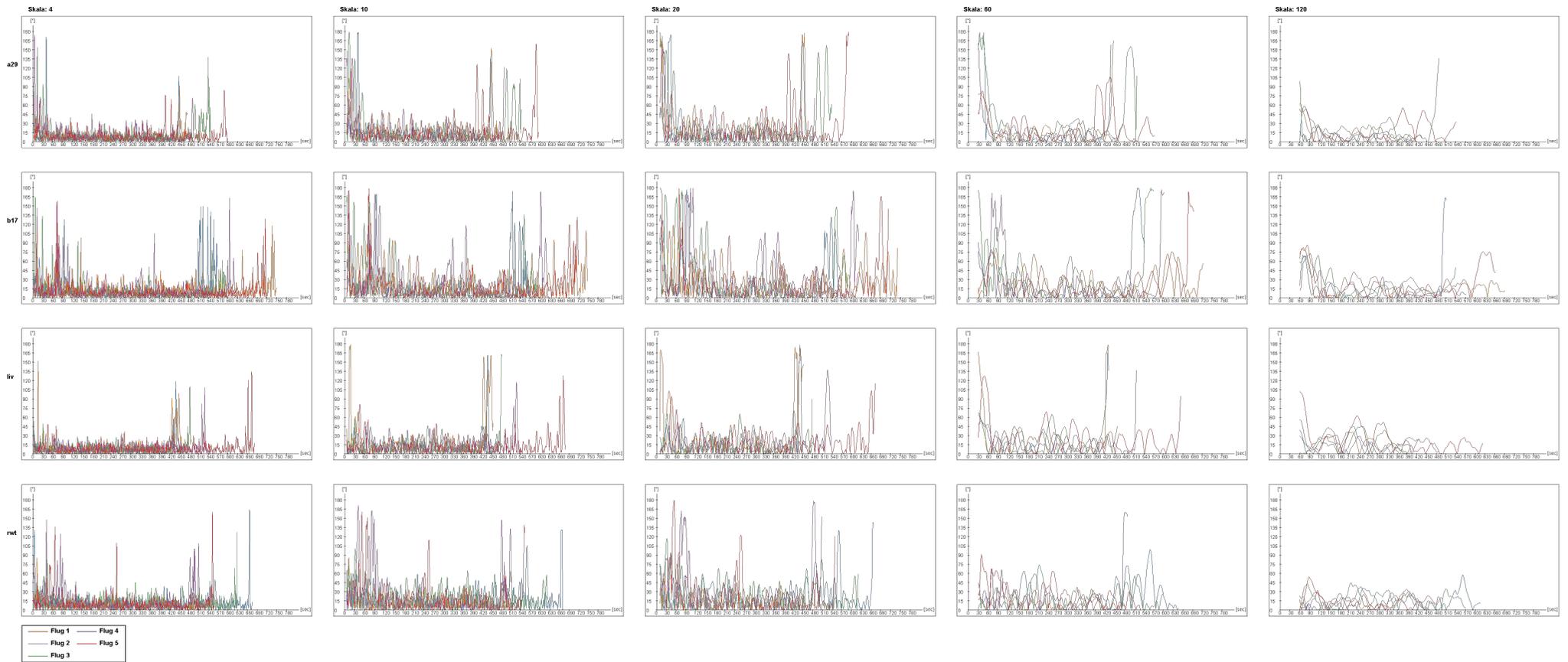


Abbildung 52: Small Multiples der Richtungsänderung für die Flüge von vier Tauben

7.2.3 Ähnlichkeiten der Parameter zwischen einzelnen Tauben, Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Skalen sowie Lern-verhalten

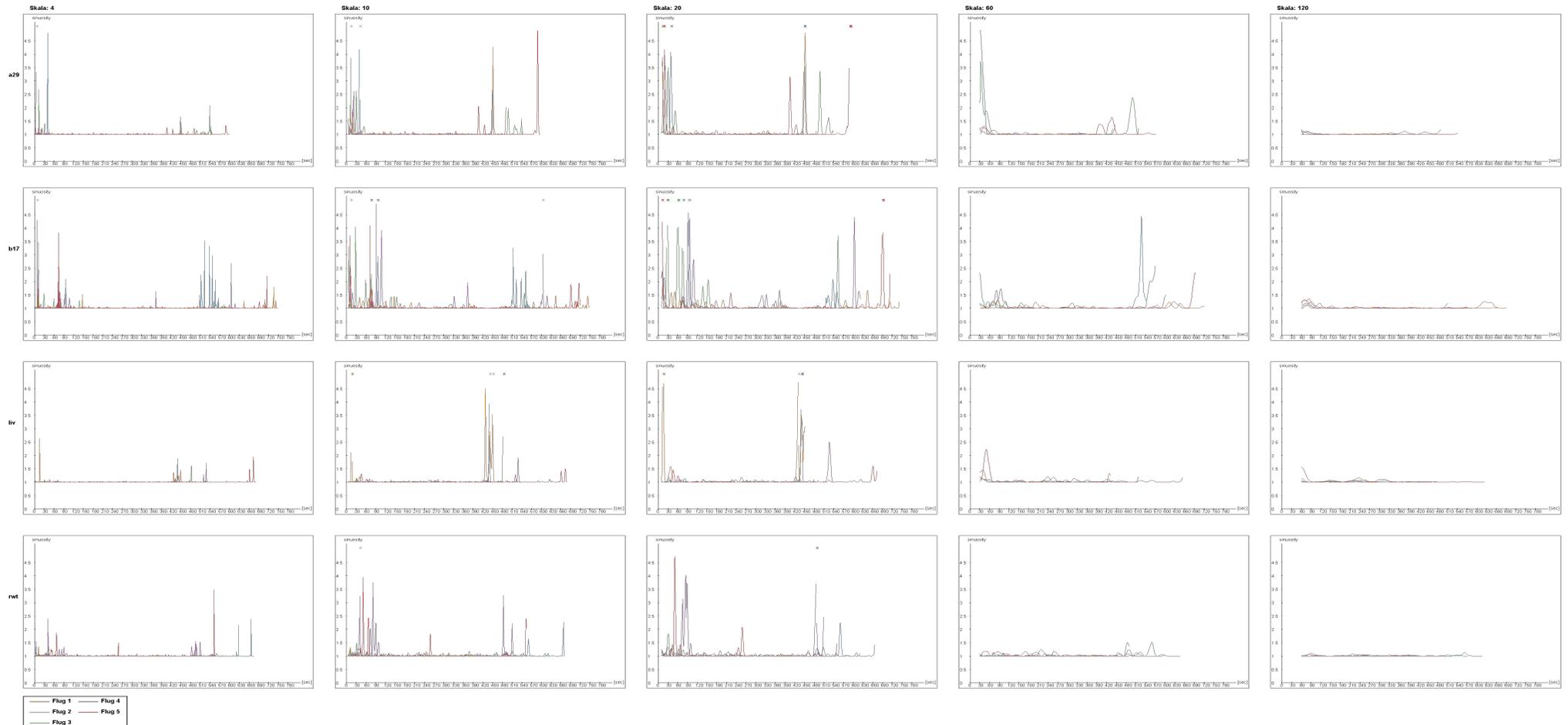


Abbildung 53: Small Multiples der Gewundenheit für die Flüge von vier Tauben

Armstrong et al. (2008) beobachteten drei Lernphasen: 1. ein schneller Anstieg der Effizienz innerhalb der ersten paar Flüge, gefolgt von 2. einem graduellen Fortschritt bis 3. eine obere Grenze nach 8-10 Flügen erreicht ist. Demzufolge ist es nachvollziehbar, dass in den letzten fünf Flügen, also den Flügen 15- 20, kein Lernverhalten beobachtet werden konnte.

7.2.4 Zusammenhang zwischen Wegtreue und einzelnen Bewegungsparametern auf verschiedenen Skalen

Die Abbildungen 54 - 57 zeigen beispielhaft anhand der vier Tauben *a29*, *a99*, *b17* und *liv* das Resultat der Konstruktion eines Mittelpfades mit 500 Punkten. Es ist zu sehen, dass der erhaltene Pfad grundsätzlich dem entspricht, was intuitiv unter einem Mittelpfad verstanden wird. Die grauen Linien in den Abbildungen entsprechen den 500 senkrecht zur Hauptrichtung stehenden Geraden, von welchen aus die nächsten Punkte der Originalflüge bestimmt wurden.

In Abbildung 58 sind die Wegtreue-Werte der vier Tauben in Form von Boxplots dargestellt. Vergleicht man die Median-Werte der vier Tiere, ist zu sehen, dass die Taube *liv* den tiefsten Wert aufweist und somit gemäss Freeman et al. (2010) diejenige Taube wäre, welche mit grosser Wahrscheinlichkeit bei einem paarweisen Flug mit einer der anderen drei Tauben die Führungsrolle übernehmen würde. Die zweittiefsten Wegtreue-Werte weist die Taube *b17* auf, gefolgt von *a29*. Die Taube *a99* weist die höchsten Werte auf. Betrachtet man die Flüge der Tauben in den Abbildungen 54-57, ist zu erkennen, dass die erhaltenen Wegtreue-Werte mit den Erwartungen übereinstimmen. Die fünf Pfade der Taube *liv* liegen vor allem im letzten (unteren) Teil des Fluges sehr nahe beieinander und führen damit zu tiefen Wegtreue-Werten. Im Gegensatz dazu sind die Pfade der Taube *a99* weiter voneinander entfernt und vor allem im ersten (oberen) Teil der Flüge sind grosse Abweichungen vom Mittelpfad erkennbar.

Die Boxplots in Abbildung 59 beinhalten die Werte des jeweiligen Parameters aller fünf Flüge der vier Tauben auf acht zeitlichen Skalen. Durch den visuellen Vergleich der Boxplots der Bewegungsparameter mit denjenigen der Wegtreue lässt sich kein deutlicher Zusammenhang zwischen einem der Parameter und der Wegtreue erkennen.

Ein zweiteiliger Pearson-Korrelationstest zwischen dem Median der Wegtreue-Werte einer Taube und dem Median der Bewegungsparameter hat ebenfalls für keinen der Parameter auf keiner Skala einen signifikanten linearen Zusammenhang mit der Wegtreue ergeben.

7.2.4 Zusammenhang zwischen Wegtreue und einzelnen Bewegungsparametern auf verschiedenen Skalen

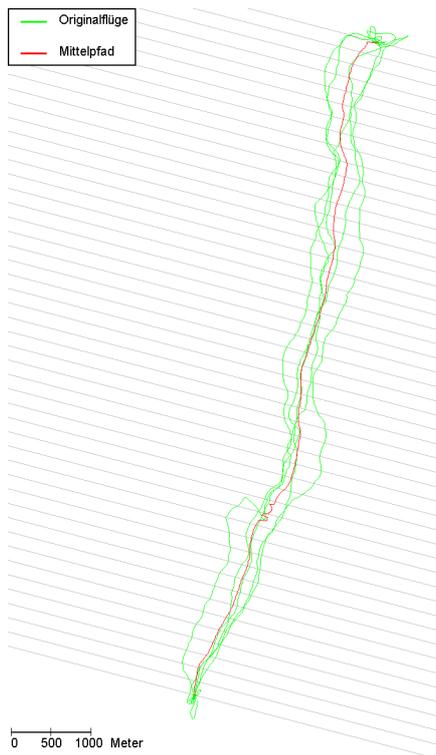


Abbildung 54: Mittelpfad der Taube a29

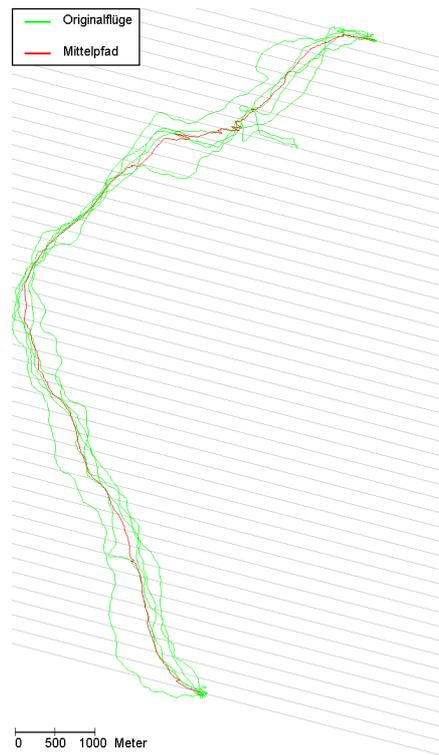


Abbildung 55: Mittelpfad der Taube a99

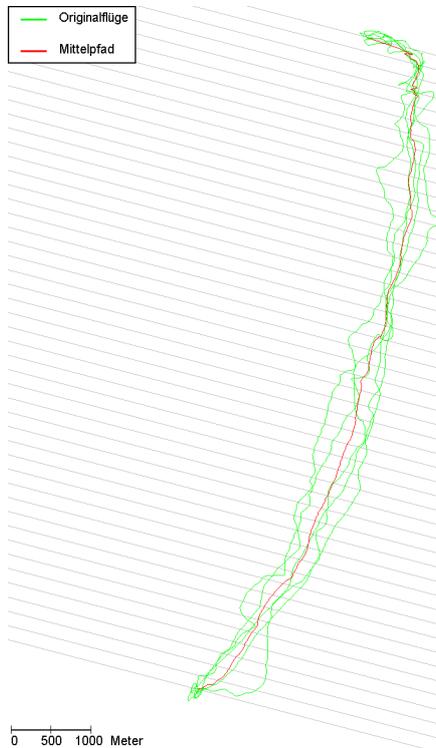


Abbildung 56: Mittelpfad der Taube b17

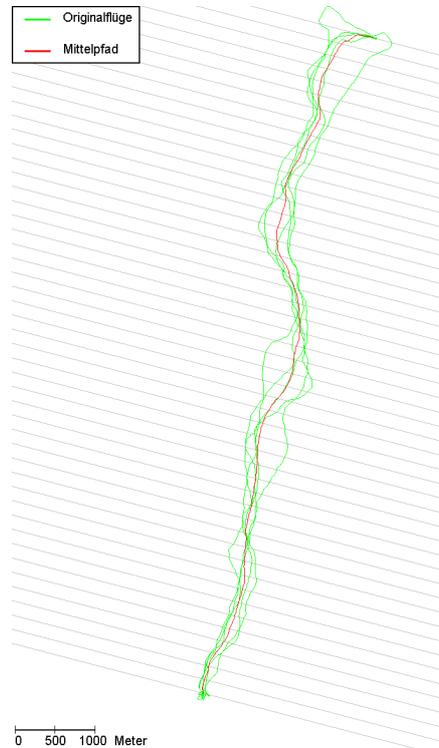


Abbildung 57: Mittelpfad der Taube liv

7.2.4 Zusammenhang zwischen Wegtreue und einzelnen Bewegungsparametern auf verschiedenen Skalen

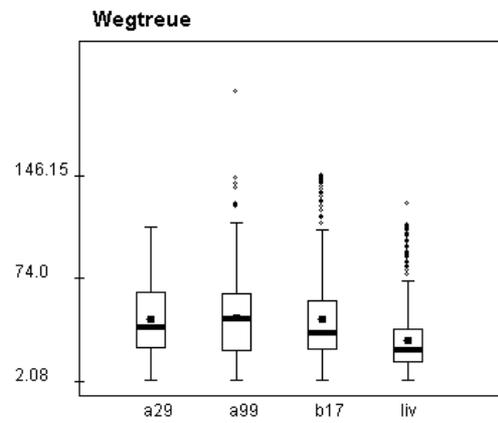


Abbildung 58: Wegtreue-Werte der einzelnen Tauben

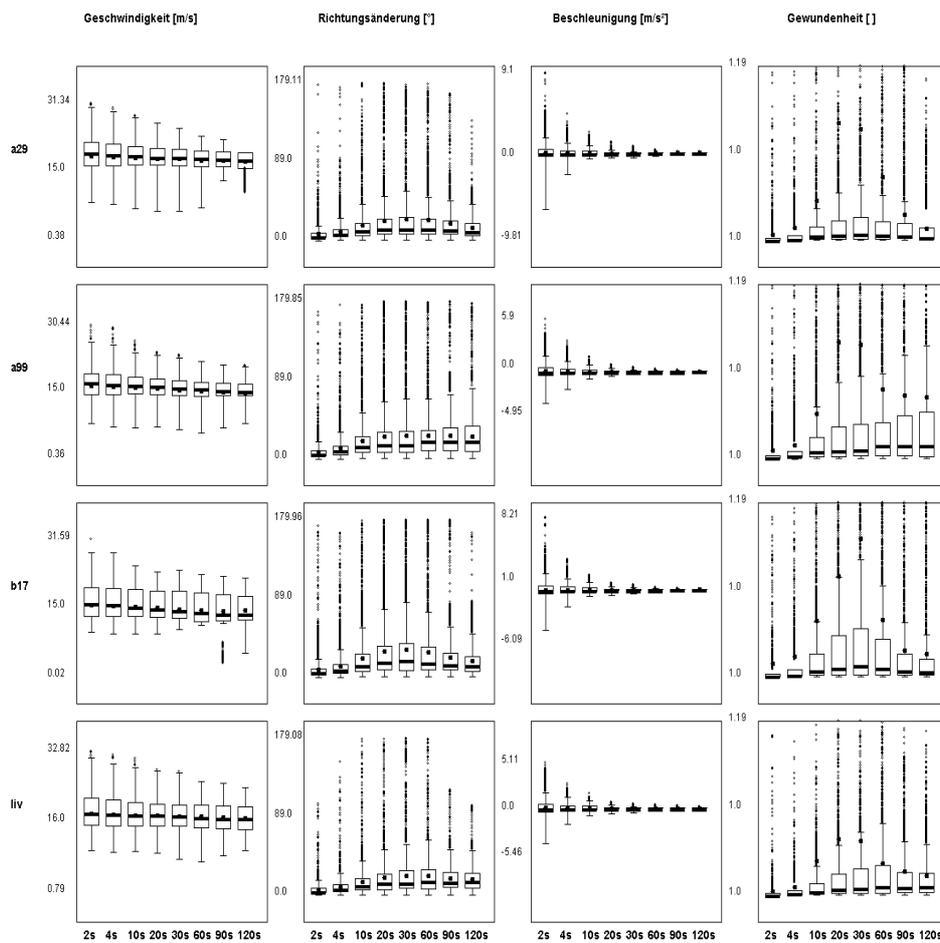


Abbildung 59: Boxplots der Bewegungsparameter aus allen fünf Flügen der Tauben *a29*, *a99*, *b17* und *liv*

8 Diskussion

Das Ziel dieser Arbeit ist die Diskussion von drei Fragen: (1) Wie kann man für eine Auswahl von Bewegungsparametern eine zeitliche Multiskalen-Analyse durchführen? (2) Worin liegen die Potentiale, respektive die Schwierigkeiten bei zeitlichen Multiskalen-Analysen? (3) Wie kann der Einfluss der gewählten zeitlichen Skalen auf die Bewegungsparameter mit Hilfe einer Multiskalen-Analyse genutzt werden, um neue Erkenntnisse über vorhandene Daten zu gewinnen?

Ein weiteres wichtiges Thema, welches sich aus der Arbeit ergeben hat und deshalb zu Beginn diskutiert werden soll, ist die Aufbereitung ungenauer GPS-Daten, wie man sie typischerweise in der Realität erhält.

8.1 Datenaufbereitung

Durch die Verwendung von GPS-Aufnahmegaräten kann in kurzer Zeit und unter geringen Kosten eine sehr grosse Menge an Positionsaufnahmen gewonnen werden. Diese Eigenschaft wird von vielen Forschern genutzt, um die Bewegung von Menschen (z.B. Dias et al., 2007), Tieren (z.B. Wartmann et al., 2010; Laube und Purves, 2010; Fryxell et al., 2008; Webb et al., 2009), Fahrzeugen (z.B. Andrienko et al., 2007) etc. zu untersuchen.

Die Qualität der Daten sowie deren Aufbereitung wird dabei nur in seltenen Fällen (Laube und Purves, 2010; Dias et al., 2007) diskutiert und mit den Resultaten in Verbindung gebracht.

In dieser Arbeit hat die Filterung der Daten gezeigt, dass trotz der Entfernung von knapp 3/4 der ursprünglichen Datenpunkte vor allem in den Bereichen, in denen sich Fussgänger in Gebäuden aufhalten, hohe Unregelmässigkeiten vorhanden sind, welche ein unerwartetes Bewegungsverhalten verursachen und deshalb nicht aus den Daten entfernt werden konnten. Dies zeigt die Schwierigkeit auf, dass bei einer Filterung stets Annahmen über ein „normales“ beziehungsweise ein „anormales“ Verhalten getroffen werden müssen. Wird ein bestimmtes Verhalten von Unregelmässigkeiten als „normal“ betrachtet, werden zu wenige Punkte aus den Daten entfernt. Umgekehrt besteht die Gefahr, dass durch zu viele Erwartungen über ein normales Verhalten natürliche Variationen entfernt werden und dadurch die Resultate einer Bewegungsanalyse auf den erwarteten Bereich eingeschränkt und verfälscht werden. Es wird deshalb argumentiert, dass bei der Analyse von Bewegungsdaten 1. die Filterbedingungen transparent sein müssen,

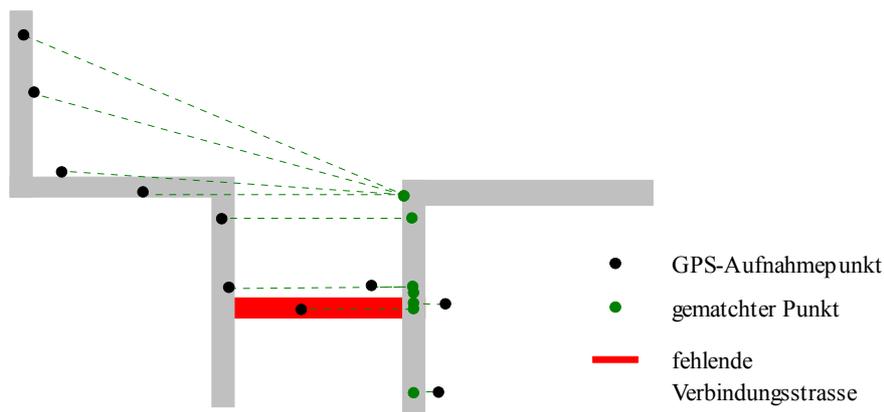


Abbildung 60: schematische Darstellung des Map Matching Problems bei fehlenden Strassen

2. Unsicherheiten bei der Filterung in der Interpretation der Analyseresultate berücksichtigt werden müssen und 3. die Verwendung von sehr ungenauen GPS-Daten für Bewegungsanalysen allgemein hinterfragt werden muss.

Bei der Generierung des Delft-Strassennetzes muss die Vollständigkeit des OpenStreetMap-Datensatzes kritisch hinterfragt werden. Van Exel (2010) argumentiert, dass freiwillige geographische Datensammlungen durch heterogene und ungleiche Qualität charakterisiert sind. Dies aus dem Grund, dass sie mit unterschiedlichen Aufnahmeverfahren (GPS-Trajektorien, Bilder, etc.) und durch unterschiedliche Nutzer mit verschiedenen Motivationen aufgenommen wurden und da die Mitwirkenden sowie die Mitwirkung räumlich nicht gleichmässig verteilt ist. Vergleichbare Resultate ergaben sich auch aus den Studien von Mondzech und Sester (2011) und Haklay (2010).

Im Juli 2007 wurden die Daten des gesamten niederländischen Strassennetzes vom kommerziellen Hersteller für Navigationsinformationen AND⁵ (Automotive Navigation Data) für das OpenStreetMap Projekt zur Verfügung gestellt (Haklay und Weber, 2008). Es wird deshalb argumentiert, dass die Vollständigkeit und Qualität der Delft-Daten gut und für den Verwendungszweck angemessen sind.

Bei der Modellierung des Strassennetzes muss die Wahl der Strassen sowie die Breite der über die Strassen gelegten Bänder kritisch hinterfragt werden. Werden zu wenige Strassen in das Modell integriert, kann die mit dem angewandten Map Matching Algorithmus gematchte Bewegung massiv verfälscht werden. Dies aus dem Grund, dass Punkte nur auf benachbarte Strassen verschoben werden können

5 http://www.and.com/index.php?option=com_content&view=article&id=41&Itemid=40

und wenn eine Verbindungsstrasse fehlt, die gesamte Bewegung abbricht (Abbildung 60). Bei einem zu dichten Strassennetz hingegen sind im Modell sehr viele Strassen miteinander „benachbart“ und die Eigenschaft des Algorithmus, Punkte nur auf benachbarte Strassen zu verschieben, bringt keinen grossen Mehrwert.

In Bezug auf die Strassenbreite wird argumentiert, dass eine zu kleine Breite die natürliche Bewegung innerhalb einer Strasse einschränkt und so berechnete Bewegungsparameter verfälscht. Eine zu breite Strasse erhält die natürliche Bewegung, wird aber stärker von Unregelmässigkeiten beeinflusst. Im Fall der zu schmalen Strassen kann bei der Analyse der Bewegung nicht abgeschätzt werden, ob und in welchem Ausmass die Resultate verfälscht wurden. Bei zu breiten Strassen können Unsicherheiten eher abgeschätzt und in die Interpretation miteinbezogen werden. Dadurch wird begründet, dass bei mangelnden Informationen über die reale Strassenbreite eine Überschätzung der Breite weniger beziehungsweise einen eher zu erwartenden Einfluss auf die Berechnung von Bewegungsparametern hat und deshalb bevorzugt werden soll.

Bei der Implementierung und Anwendung eines Map Matching Algorithmus wurde in dieser Arbeit gezeigt, dass das Resultat einerseits durch die Map Matching Bedingungen und andererseits durch die Qualität der ursprünglichen Daten beeinflusst wird. Die meisten allgemein verwendeten geometrischen Map Matching Ansätze basieren auf einem einfachen Suchalgorithmus, bei welchem jeder Punkt dem nächsten Knotenpunkt des Netzwerks zugeordnet wird (Ochieng et al., 2009). Der implementierte Algorithmus verwendet zusätzlich zu den geometrischen Eigenschaften des Strassennetzes Informationen über vorhergehende und nachfolgende Aufnahmepunkte sowie über topologische Nachbarschaftsbeziehungen der Strassen. Es konnte gezeigt werden, dass dadurch Fehlmatchings auf parallele Strassen vermieden werden konnten. Es konnte weiter gezeigt werden, dass der verwendete Algorithmus und somit auch alle Algorithmen, welche auf den gleichen, ähnlichen oder weniger Informationen basieren, in den Strassenecken nicht das erwartete Resultat liefert und zu grossen relativen Fehlern bei der Berechnung der Bewegungsparameter führt.

Die Qualität der Daten ist insofern entscheidend für das Map Matching Resultat, als das Unsicherheiten in Form von Punktwolken zu Rückprojektionen führen und damit eine oft falsche Rückwärtsbewegung in den Daten verursachen können.

8.2 Wahl der Bewegungsparameter und Methode zur Durchführung der Multiskalen-Analyse

Im Folgenden werden die Wahl und Berechnung der Bewegungsparameter sowie die Wahl der zeitlichen Multiskalen-Analyse-Methode diskutiert.

8.2.1 Parameterwahl

Um Bewegungen auf einer multiskalaren Ebene zu untersuchen, wurden die vier abgeleiteten Bewegungscharakteristiken *Geschwindigkeit*, *Beschleunigung*, *Richtungsänderung* und *Gewundenheit* verwendet.

Es wird argumentiert, dass durch die Geschwindigkeit Aussagen über die zurückgelegte Distanz eines Objektes während einer gewissen Zeitperiode getroffen werden können. Anhand der Beschleunigung ist es möglich, Erkenntnisse über die Änderung der Geschwindigkeit zu erhalten. Durch die Analyse der Richtungsänderung werden Aussagen über die Geometrie des Weges ermöglicht und der Parameter Gewundenheit lässt auf die Direktheit der Bewegung schliessen. Für die Berechnung der Werte wurden für alle Parameter jeweils drei Aufnahmepunkte verwendet, wobei der Parameterwert dem mittleren der Punkte zugeordnet wurde. Dadurch konnte gewährleistet werden, dass für jeden Parameter die gleichen Aufnahmepunkte in die Berechnung miteinbezogen werden und so die Parameter untereinander verglichen werden konnten. In den meisten Studien, welche in der Literatur betrachtet wurden, wurde die Berechnung der Parameter nicht transparent gemacht. Dadurch können Einflüsse, welche auf die Art der Berechnung zurückzuführen sind, bei der Interpretation der erhaltenen Resultate nicht beurteilt werden. Laube und Purves (2011), welche die Art der Berechnung aufzeigen, verwenden in ihrer Studie für die Berechnung der Geschwindigkeit sowie der Richtungsänderung ebenfalls drei Aufnahmepunkte. Für die Berechnung der Gewundenheit werden eine fixe Anzahl (z.B. 5) Aufnahmepunkte in die Berechnung miteinbezogen. Für die unterschiedlichen Parameterberechnungen werden somit unterschiedliche Aufnahmepunkte berücksichtigt, wodurch ein Vergleich der Parameter untereinander nur unter Berücksichtigung dieses Aspektes möglich ist und die zeitliche Skala strenggenommen nicht gleich ist. Allerdings musste festgestellt werden, dass die Berechnung der Gewundenheit mit nur drei Aufnahmepunkten - also so, wie es in dieser Arbeit gemacht wird - keinen Mehrwert gegenüber der Richtungsänderung ergibt, da die beiden Werte nahezu perfekt korrelieren. Wenn die Gewundenheit als Bewegungsparameter beibehalten werden will und alle Parameter miteinander vergleichbar sein sollen, müsste demnach ein anderes Mass für die Gewundenheit gewählt werden oder alle

Parameter müssten unter Einbezug der gleichen Anzahl Punkte wie die Gewund-enheit berechnet werden.

8.2.2 Methoden-Wahl

In der Literatur konnten drei Arten von zeitlichen Multiskalen-Analysen an Bewegungsdaten identifiziert werden:

- Für jede zeitliche Skala wurde ein eigener Datensatz verwendet, um die Bewegungsparameter abzuleiten (z.B. Fryxell et al., 2008).
- Für die Berechnung der Bewegungsparameter auf verschiedenen zeitlichen Skalen wurden neue Subsamples des gesamten Ausgangsdatsatzes verwendet (z.B. Reynolds und Laundre, 1990; Wartman et al., 2010).
- Auf jeder Skala wurde der Ausgangsdatsatz verwendet, aber die Grösse des beweglichen Berechnungsfensters angepasst (Laube und Purves, 2011).

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Verwendung von Subsamples eines ganzen Datensatzes die Anzahl Aufnahmepunkte, welchen ein Parameterwert zugewiesen werden kann, stark einschränkt und sich die Lage der Punkte je nach Skala ändert. Ein weiteres Problem im Zusammenhang mit dem Sub-sampling-Ansatz wurde in der Wahl des 1. Punktes in einem Subsample beobachtet. Je nach gewähltem Startpunkt können sich die berechneten Parameter stark voneinander unterscheiden. Um den Einfluss des gewählten Startpunktes zu modellieren, kann zum Beispiel eine Monte Carlo Simulation durchgeführt werden, welche bei jedem Durchlauf bei einem anderen Startpunkt beginnt.

Aus den identifizierten Problemen kann gefolgert werden, dass Parameterwerte, welche auf verschiedenen Skalen berechnet wurden, nicht miteinander verglichen werden können, die Anzahl möglicher Skalen durch die schnelle Abnahme der Anzahl Aufnahmepunkte auf grösseren Skalen stark eingeschränkt ist und der Vergleich zwischen verschiedenen Datensätzen aufgrund des grossen Einflusses der Wahl des Startpunktes kritisch ist. Insgesamt kann die Methode somit als nicht geeignet betrachtet werden, um zeitliche Multiskalen-Analysen durchzuführen.

Die Berechnung von Bewegungsparametern auf verschiedenen zeitlichen Skalen aus verschiedenen Datensätzen bringt die gleichen Schwierigkeiten mit sich, wie die Berechnung der Parameter aus den Subsamples, ist aber zusätzlich problematisch, da die Qualität der Daten variieren kann. Unterschiedliche Datensätze für jede Skala sind somit nicht geeignet, um zeitliche Multiskalen-

Analysen durchzuführen.

Bei dem Berechnungsfenster-Ansatz konnte gezeigt werden, dass je nach zeitlicher Skala ebenfalls einer gewissen Anzahl Aufnahmepunkte am Anfang sowie am Ende der Trajektorie kein Parameterwert zugeordnet werden kann, die Anzahl der Punkte aber deutlich kleiner ist als beim Subsampling-Ansatz. Weiter werden im Gegensatz zu den beiden anderen Methoden, ausser am Anfang und am Ende, immer den gleichen Aufnahmepunkten Parameterwerte zugewiesen. Dadurch ist es mit diesem Ansatz möglich, die Werte über verschiedene Skalen hinweg zu vergleichen und den Effekt der Skala zu untersuchen. Für die Interpretation der Resultate ist allerdings das Bewusstsein darüber, dass am Anfang sowie am Ende der Bewegung keine Werte berechnet werden können unerlässlich.

8.3 Potentiale und Schwierigkeiten der zeitlichen Multiskalen-Analyse

Durch den Vergleich verschiedener räumlicher sowie raum-zeitlicher Multiskalen-Studien aus der Literatur konnte eine Anzahl Potentiale und Schwierigkeiten von Multiskalen-Analysen herausgearbeitet werden. Die zusammengetragenen Potentiale beinhalten die Möglichkeit, skalenabhängige Eigenschaften (z.B. Wu, 2004), Phänomene (z.B. Schmidt und Andrew, 2005) und Verhalten (z.B. Webb, 2009) zu identifizieren. Weitere Potentiale wurden in der Erkennung von Skaleneffekten (z.B. Reynolds und Laundre, 1990) und Veränderung über verschiedene Skalen (z.B. Wartmann et al., 2010) sowie in der Erfassung grösserer Zusammenhänge (z.B. Nams, 2005) mit Hilfe von Multiskalen-Analysen gesehen. In Bezug auf die Schwierigkeiten bei zeitlichen Multiskalen-Analysen wurde festgestellt, dass in verschiedenen Studien unterschiedliche Ansätze verwendet werden, um Parameterwerte auf verschiedenen Skalen zu berechnen und diese nur in den seltensten Fällen begründet oder diskutiert werden. Diese meist intuitiv durchgeführten zeitlichen Multiskalen-Analysen zeigen, dass der Einfluss der zeitlichen Skala bei der Analyse von Bewegungen bisher nicht oder nur in geringem Mass berücksichtigt wurde und dass das grundsätzliche Problem bei zeitlichen Multiskalen-Analysen von Bewegungsdaten das Nichtvorhandensein von theoretischen und methodischen Konzepten zu sein scheint.

Durch die Durchführung der Experimente in dieser Arbeit konnten allgemein betrachtet vergleichbare Potentiale wie in der Literatur gefunden werden. Konkret konnte ein skalenabhängiger Einfluss des Strassennetzes und damit verbunden des Map Matchings auf die Parameter der Fussgängerbewegung identifiziert sowie

eine Skala erkannt werden, auf welcher der Einfluss des Strassennetzes für die Bewegung dominierend ist. Weiter konnte der skalenabhängige Einfluss von Unsicherheiten in den Daten dargestellt werden und in Bezug auf die Tauben-Daten konnten zeitliche Bewegungsereignisse erkannt sowie ihre zeitliche Auswirkung auf die Parameter identifiziert werden.

In Bezug auf die Schwierigkeiten wurde festgestellt, dass durch eine explorative zeitliche Multiskalen-Analyse nur schon für ein Objekt und insbesondere für mehrere Objekte sehr grosse Mengen an Informationen entstehen. Bei der Auswertung und Darstellung der Resultate musste deshalb eine repräsentative Auswahl getroffen werden. In Bezug auf die Darstellung der Parameterwerte auf verschiedenen zeitlichen Skalen konnte beobachtet werden, dass bei geringen Änderungen sowie bei vielen Extremwerten die Verwendung von Boxplots ungeeignet ist, da die Daten kaum verglichen werden können. Eine weitere Schwierigkeit wurde in Bezug auf die verwendete Multiskalen-Analyse-Methode im Wegfallen der ersten beziehungsweise letzten Werte einer Trajektorie identifiziert. Dadurch war es nicht möglich, Aussagen über den Einfluss der Skala auf das Verhalten in diesen Bereichen zu machen. Ein weiteres Problem, welches bei der Analyse auftrat, jedoch kein spezifisches Multiskalen-Problem darstellt, ist der Einfluss der Datenqualität auf die Resultate. Schliesslich konnte festgestellt werden, dass der Einfluss der Art der Berechnung sich auf die Parameterwerte auf verschiedenen Skalen auswirkt und unter Umständen Effekte verursacht, welche fälschlicherweise einem skalenspezifischen Bewegungsverhalten, statt der Art der Berechnung, zugeschrieben werden können.

8.4 Vergleich der Experimente

An den zwei gegebenen Datensätzen wurden insgesamt fünf Experimente durchgeführt, um mit Hilfe einer Multiskalen-Analyse neue Erkenntnisse aus den Daten zu gewinnen.

Vergleich der Parameter der gemachten und Original-Daten auf verschiedenen zeitlichen Skalen:

Durch den Vergleich der Bewegungsparameter der Original-GPS-Fussgänger-Daten und den gemachten Daten auf verschiedenen zeitlichen Skalen konnte der Einfluss der Unsicherheiten in den Daten abgeschätzt werden. Dabei wurde beobachtet, dass erst ab einer Skala von 10-20 Sekunden Rückschlüsse über das Bewegungsverhalten gezogen werden können. Weiter konnte der Einfluss des

Map Matchings auf verschiedenen Skalen, vor allem in den Werten der Richtungsänderung, beobachtet werden. Anhand der Darstellung der Richtungsänderungen in Form von Sternplots konnte eine Skala von 60 Sekunden identifiziert werden, auf welcher die Struktur des Strassennetzes die Bewegung dominierend beeinflusst und der Unterschied zwischen den gematchten Daten und Originaldaten deshalb nur noch gering vorhanden ist.

Wie bereits in der Studie von Laube und Purves (2011) anhand einer Monte Carlo Simulation dargestellt wurde, zeigen auch die Resultate dieses Experiments, dass bei sehr kleinen zeitlichen Skalen der Einfluss der Unsicherheiten in den realen GPS-Daten zu gross ist, um aussagekräftige Bewegungsparameter berechnen zu können.

Diese Erkenntnis ist insofern relevant für zukünftige Studien und Forschungen, als dass die Speicherkapazität von GPS-Geräten zunimmt und mit den gegebenen Technologien GPS-Positionen mit einer hohen Rate aufgenommen werden können. Ohne das Bewusstsein über den Effekt der Unsicherheiten auf kleinen Skalen kann dies zur Annahme verleiten, dass höhere Aufnahmeraten zu besseren/genaueren Resultaten führen.

Die zweite wichtige Erkenntnis dieses Experiments unterstützt die Annahme, dass der Einfluss des Map Matchings auf die Bewegungsparameter auf kleinen zeitliche Skalen stärker ist als auf grösseren Skalen und dass eine Skala existiert, ab welcher die Struktur des Strassennetzes einen dominanten Einfluss auf die Bewegungsparameter ausübt und somit das Map Matching die Bewegungsparameter nicht beziehungsweise nur mehr in geringem Mass beeinflusst. Diese Erkenntnis ist für zukünftige Studien und Forschungen relevant, um je nach zeitlicher Skala, auf welcher eine Bewegung analysiert werden will, beurteilen zu können, welche Einflüsse dominant sind und vor allem, ob die gewünschten Eigenschaften mit ausreichender Genauigkeit untersucht werden können.

Einfluss der zeitlichen Skala auf die Bewegungsparameter:

In Bezug auf die Geschwindigkeit und die Beschleunigung konnte anhand der Multiskalen-Analyse vor allem eine auf die Art der Berechnung zurückzuführende Abnahme der Mittelwerte, der Mediane sowie der Streuung beobachtet werden.

Durch die multiskalare Analyse der Richtungsänderung und der Darstellung der Verteilung in Form von Sternplots konnten skalenabhängige Hauptrichtungen identifiziert werden und in Bezug auf die Gewundenheit konnte festgestellt werden, dass auf kleinen Skalen sowie auf den grössten Skalen erwartete Werte resultierten und die mittleren Skalen die „interessanten“ Variationen während des

Fluges aufzeigten. Als interessante Änderungen werden dabei solche gesehen, welche etwas über das Verhalten während des Fluges aussagen. Also ob beispielsweise die Flugbewegung auf einer bestimmten zeitlichen Skala direkt und somit gemäss Armstrong et al. (2008) effizient ist oder ob ein gewisses Suchverhalten (Patterson, 2008) stattgefunden hat.

Für zukünftige Studien und Forschungen sind diese Erkenntnisse von Bedeutung, da aufgezeigt werden konnte, dass unabhängig davon, ob sich die Geschwindigkeit über die Skalen hinweg effektiv ändert, eine auf die Unterschätzung der Distanz bei der Berechnung zurückzuführende Abnahme der Werte stattfindet. Eine Fehlinterpretation dieses Effekts kann zu falschen Rückschlüssen auf das Bewegungsverhalten führen.

Anhand der Erkenntnis, dass auf verschiedenen Skalen unterschiedliche Hauptrichtungen und Gewundenheitswerte zu beobachten sind, wird argumentiert, dass es mit Hilfe einer zeitlichen Multiskalen-Analyse möglich ist, die Phänomenskala eines bestimmten Bewegungsverhaltens über den gesamten Flug hinweg zu bestimmen.

Zeitliche Abhängigkeit der Bewegungsparameter auf verschiedenen zeitlichen Skalen:

Anhand der Darstellung der Werte in Abhängigkeit der Zeit konnte in diesem Experiment der Einfluss von Unsicherheiten als systematisch-wirkende Variationen in den Werten beobachtet werden. Es konnte festgestellt werden, dass erst ab einer Skala von ca. 60 Sekunden die Unsicherheiten nicht mehr dominierend waren und Aussagen über das Bewegungsverhalten gemacht werden konnten.

Diese Erkenntnis bestärkt die bereits durch die Ergebnisse des ersten Experiments gemachte Aussage, dass das Bewusstsein über den Einfluss ungenauer GPS-Positionen grundlegend ist, um Rückschlüsse auf das Bewegungsverhalten ziehen zu können.

Es wurde weiter ersichtlich, dass auf grösseren Skalen das Wegfallen der ersten und letzten Bewegungspunkte einen sichtbaren Einfluss auf das Gesamtbild der Werte hat. Es wird deshalb argumentiert, dass die Angabe der zeitlichen Skala bei der Berechnung der von Parameterwerten und/oder der Anzahl berechneter Werte unerlässlich ist.

Weiter konnten durch die zeitliche Multiskalen-Analyse Bewegungsereignisse sowie die zeitliche Auswirkung der Ereignisse identifiziert werden.

Dieses Ergebnis ist für künftige Untersuchungen bedeutend, indem es zeigt, dass es möglich ist, einerseits explorativ skalenabhängige Ereignisse in der Bewegung

zu identifizieren und andererseits die zeitliche Skala, auf welcher das Ereignis einen Einfluss auf die Bewegung hat, also die Phänomen-Skala, zu bestimmen.

Lernverhalten der Tauben, Ähnlichkeit der Parameter zwischen den Tauben sowie Ähnlichkeit zwischen verschiedenen Skalen:

Durch den Vergleich der Flüge der einzelnen Tauben, welche alle den gleich Start- und Zielort aufweisen, konnte festgestellt werden, dass die einzelnen Parameter aller betrachteten Tauben auf allen Skalen die gleiche Grössenordnung aufweisen. Aufgrund dieser Erkenntnis wird argumentiert, dass die Ähnlichkeit der Parameter auf allen Skalen möglicherweise dazu verwendet werden kann, um bei Vergleichen zwischen Tauben und weiteren Objekten die Grundlage für eine automatische Klassifizierung zu erstellen.

Die Resultate des Experiments zeigten das Auftreten von auffälligen Veränderungen der Parameterwerte, also Bewegungsereignissen, in bestimmten Skalen etwa zur gleichen Zeit bei allen Tauben. Daraus wurde die Hypothese formuliert, dass gemeinsame Bewegungsereignisse wie beispielsweise Hindernisse auf der Flugstrecke zurückzuführen sind.

Diese Hypothese muss zwar überprüft werden, sie ist aber für weitere Studien insofern relevant, als dass bei einer Bestätigung die Bewegung einer einzelnen Taube aufgrund des Bewegungsverhaltens aller Tauben besser verstanden werden kann.

Es wird angenommen, dass es theoretisch möglich wäre, anhand der Unterschiede in den Bewegungsparameter der einzelnen Flüge einer Taube auf bestimmten Skalen Hinweise auf ein Lernverhalten zu finden. Da das Lernverhalten in den vorhandenen Flügen aber bereits abgeschlossen ist (Armstrong et al., 2008), konnte dieser Aspekt im Experiment nicht untersucht werden.

Zusammenhang zwischen Wegtreue und einzelnen Bewegungsparametern auf verschiedenen Skalen:

Im 5. Experiment wurde untersucht, ob ein linearer Zusammenhang zwischen den Wegtreue-Werten und den Bewegungsparametern auf einer bestimmten zeitlichen Skala vorhanden ist. Es wurde erwartet, dass insbesondere die Werte der Richtungsänderung sowie diejenigen der Gewundenheit mit den Wegtreue-Werten in Zusammenhang stehen und dass sich dieser Zusammenhang auf einzelnen zeitlichen Skalen stärker zeigt als auf anderen.

Anhand der Resultate aus den Experimenten konnte kein Zusammenhang zwischen einem der Bewegungsparameter und der Wegtreue erkannt werden. Dieses

Ergebnis war auf den ersten Blick unerwartet. Beachtet man allerdings die Tatsache, dass die Wegtreue durch die Standardabweichung der räumlichen Distanz zwischen den Originalflügen und dem Mittelpfad berechnet wird, sagt ein Wegtreue-Wert etwas über eine Verteilung aus. Im Experiment wurde dieses Mass in der Korrelationsanalyse mit dem Median der Parameter verglichen. Es ist deshalb nachvollziehbar, dass kein Zusammenhang entdeckt werden konnte. In den Boxplots waren die Unterschiede zwischen den Streuungen zu klein, um visuell einen Zusammenhang erkennen zu können. Um eine mögliche Korrelation zu untersuchen, wäre die Verwendung der Streuung der Parameter wahrscheinlich sinnvoller gewesen.

Anhand der fünf explorativ durchgeführten Experimente konnte gezeigt werden, dass unter Verwendung einer zeitlichen Multiskalen-Analyse neue Erkenntnisse über die existierenden Daten gewonnen werden können. Zu den wichtigsten dieser Erkenntnisse gehören die Identifikation von skalenabhängigen Bewegungsereignissen, wie das Umfliegen von Hindernissen und das Erkennen des Einflusses von Unsicherheiten, wobei dieser in den Fussgänger-Daten bis zu einer Skala von 10 Sekunden und bei den Tauben-Daten bis zu einer Skala von 60 Sekunden beobachtet werden konnten. Eine weitere wichtige Erkenntnis war die Identifikation einer Skala von 60 Sekunden bei den Fussgänger-Daten, ab welcher der Einfluss des Strassennetzes die Bewegung der Fussgänger dominant beeinflusst. All diese Erkenntnisse hätten durch die Analyse auf nur einer zeitlichen Skala nicht gewonnen werden können.

9 Schlussfolgerungen

Das Ziel dieser Arbeit war die Definition einer zeitlichen Multiskalen-Analyse-Methode, die Erarbeitung der Potentiale und Schwierigkeiten von zeitlichen Multiskalen-Analysen sowie die Durchführung von Experimenten mit Hilfe der definierten Multiskalen-Analyse-Methode, um neue Erkenntnisse aus den vorhandenen den Daten zu gewinnen.

Es wurden insgesamt fünf Experimente an zwei Datensätzen durchgeführt. Der erste Datensatz beinhaltet die Bewegung von Fussgängern im historischen Stadtzentrum von Delft (NL). Im Zusammenhang mit diesem Datensatz wurde ein auf OpenStreetMap-Daten basierendes Strassennetz modelliert, anhand dessen ungenaue Aufnahmepunkte mit Hilfe eines dafür entwickelten Map Matching Algorithmus an den zugrundeliegenden Raum angepasst wurden. Der zweite Datensatz beinhaltet die Flugbewegungen von Tauben in der Nähe von Oxford (GB).

Im ersten Experiment wurde anhand der Fussgänger-Daten analysiert, welchen Einfluss das Map Matching auf die, auf verschiedenen zeitlichen Skalen berechneten, Bewegungsparameter hat. Im zweiten Experiment wurde der Einfluss der zeitlichen Skala auf die Bewegungsparameter der Tauben untersucht. Im dritten Experiment wurden die Bewegungsparameter der Tauben auf verschiedenen Skalen in Abhängigkeit der Zeit analysiert. Im vierten Experiment wurde an den Tauben-Daten das Lernverhalten der Tauben, die Ähnlichkeit der Bewegungsparameter zwischen den einzelnen Tauben sowie die Ähnlichkeit der Parameter zwischen den Skalen untersucht. Im fünften Experiment wurde schliesslich untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen der Wegtreue einer Taube und einem der Bewegungsparameter der Taube besteht.

In Folgenden wird aufgeführt, was in dieser Arbeit erreicht wurde und welche Erkenntnisse gewonnen werden konnten. Schliesslich wird festgehalten, in welchen Bereichen und in welcher Form weitere Forschungsarbeit nötig ist.

9.1 Erreichtes

- Im Hintergrund wurde dargestellt, was unter Bewegung zu verstehen ist und welche Bewegungsparameter existieren. Weiter wurden die verschiedenen Räume, in welchen sich Objekte bewegen können, beschrieben und die damit verbundenen Schwierigkeiten aufgezeigt. Anhand verschiedener multiskalarer Studien aus den Bereichen Biologie, Ökologie

und GIS wurde der Stand der Forschung hergeleitet, die vorhandenen Forschungslücken bezüglich zeitlicher Multiskalen-Analysen identifiziert sowie drei Forschungsfragen abgeleitet.

- In einem weiteren Schritt wurden die Bewegungsparameter *Geschwindigkeit*, *Beschleunigung*, *Richtungsänderung* und *Gewundenheit* aufgrund ihrer zeitlichen Abhängigkeit sowie der Möglichkeit, durch sie Rückschlüsse auf das Bewegungsverhalten zu ziehen, als in dieser Arbeit zu untersuchende Parameter festgelegt und die Art ihrer Berechnung definiert. Weiter wurde die von Laube und Purves (2011) verwendete Methode zur zeitlichen Multiskalen-Analyse, welche auf der Verwendung eines beweglichen und in der Grösse variierbaren Berechnungsfensters basiert, aufgrund der Vorteile, welche die Methode gegenüber anderen in der Literatur gefundenen Methoden aufweist, übernommen.
- Da vor allem die Fussgänger-Daten nicht in der erhaltenen Form für die Analyse verwendet werden konnten, bestand ein grosser Teil der Arbeit aus der Aufbereitung dieser Daten. Dabei wurden in einem ersten Schritt sowohl für die Fussgänger- als auch für die Tauben-Daten eine Methode entwickelt, um die relevanten Informationen (Position, Zeitstempel, zugehörige Trajektorie) aus den gegebenen Daten extrahieren zu können, sowie um die im WGS84-Referenzsystem gegebenen Positionsinformationen ins UTM-Referenzsystem zu transformieren. Für die Fussgänger-Daten wurde in einem zweiten Schritt beurteilt, welche der ursprünglich 270424 Punkte als relevant betrachtet werden können und entsprechende Filterbedingungen definiert und angewendet. Als Resultat dieser Filterung verblieben 70962 als relevant betrachtete Aufnahmepunkte. Da die Bewegung der Fussgänger auf einem Strassennetz stattfindet, wurde ein auf OpenStreetMap-Daten basierendes Strassennetz mit topologischen Informationen und flächenhaften Strassen von Delft modelliert. Um zusätzliche offene Flächen in das Strassennetz einzubeziehen, wurde eine Anwendung entwickelt, mit welcher die WGS84-Koordinaten in einer GoogleMaps Karte bestimmt werden konnten. Die zusätzlichen Flächen konnten somit manuell digitalisiert werden. Um anschliessend diejenigen Aufnahmepunkte, welche ausserhalb des modellierten Strassennetzes lagen, auf letzteres zu verschieben, wurde ein Map Matching Algorithmus entwickelt und auf die Daten angewendet. Dadurch konnten alle Punkte in den „erlaubten“ Bereich verschoben werden. Um bei den Tauben-Daten die Wegtreue berechnen zu können,

wurde, basierend auf dem Algorithmus, welchen Freeman et al. (2010) in ihrer Arbeit verwendeten, ein Algorithmus entwickelt, um einen Mittelpfad zu konstruieren.

- Für die Darstellung der Resultate der Multiskalen-Analyse wurden Boxplots, Sternplots, Streudiagramme sowie Small Multiples programmiert, welche relativ einfach und schnell für den jeweiligen Zweck angepasst werden konnten.
- Um den Einfluss der zeitlichen Skala identifizieren zu können und um neue Erkenntnisse aus den Daten zu gewinnen, wurden insgesamt fünf Experimente festgelegt und durchgeführt.

9.2 Erkenntnisse

- Es wurde festgestellt, dass theoretische und methodische Konzepte für zeitliche Multiskalen-Analysen von Bewegungsdaten im Bereich der Geographischen Informationswissenschaften fehlen.
- Als generelle Potentiale von zeitlichen Multiskalen-Analysen wurden identifiziert:
 - Identifikation skalenabhängiger Eigenschaften, Phänomene und Verhaltensmuster
 - Erkennung von Skaleneffekten
 - Identifikation von Veränderung über verschiedene Skalen
- Als generelle Schwierigkeiten von zeitlichen Multiskalen-Analysen wurden identifiziert:
 - Umgang und Darstellung der grossen Menge an Informationen, welche durch eine Multiskalen-Analyse entsteht
 - „Wegfallen“ der ersten und letzten Aufnahmepunkte bei grösseren zeitlichen Skalen
 - Der Einfluss der Datenqualität auf die Resultate
 - Der Einfluss der Art der Berechnung auf die Resultate
- Die wichtigsten Erkenntnisse aus den Experimenten beinhalten:
 - Für die Fussgänger-Daten wurde eine zeitliche Skala von 10-20 Sekunden identifiziert, ab welcher der Einfluss der Unsicherheiten tief genug ist, um Aussagen über das Bewegungsverhalten machen zu

können.

- Für die Fussgänger-Daten wurde eine zeitliche Skala von ca. 60 Sekunden identifiziert, ab welcher der Einfluss des Strassennetzes für die Bewegung dominierend ist.
- Für die Tauben-Daten wurde eine zeitliche Skala von ca. 60 Sekunden identifiziert, ab welcher der Einfluss der Unsicherheiten in den Daten nicht mehr dominant sichtbar war.
- Durch den Vergleich der Parameterwerte mehrerer Tauben konnten Hypothesen über den räumlichen/strukturellen Kontext gemacht werden, wie beispielsweise: „Hohe Gewundenheitswerte, welche bei allen Tauben etwa gleichzeitig auftreten, lassen auf ein räumliches Hindernis schliessen.“.

9.3 Ausblick

Es wurde festgestellt, dass im Bereich der Geographischen Informationswissenschaften theoretische und methodische Konzepte in Bezug auf zeitliche Multiskalen-Analysen von Bewegungsdaten fehlen. Es wäre deshalb von Interesse, in einer weiterführenden Arbeit solche Konzepte, unter Einbezug der Erkenntnisse aus dieser Arbeit und jener von Laube und Purves (2011), zu entwickeln. Weiter wäre es sinnvoll, eine Methode zu entwickeln, mit welcher der Einfluss der Unsicherheit in den Daten, unabhängig vom Datensatz, im Sinne einer Fehlerfortpflanzung quantifiziert werden kann. Ebenso wäre eine, ebenfalls vom Datensatz unabhängige, Quantifizierung des Einflusses der Unterschätzung der Distanz auf die Abnahme der Geschwindigkeit sowie der Beschleunigung auf grösseren Skalen von Interesse. Bei der Interpretation der Resultate der Multiskalen-Analysen in den Experimenten wurde der Fokus vor allem auf methodische Erkenntnisse gelegt. Es wäre deshalb vor allem bei den Tauben-Daten interessant, die Resultate in Zusammenarbeit mit einem Biologen anhand einer objektorientierteren Perspektive zu interpretieren. Weiter wurde festgestellt, dass das Wegfallen der ersten und letzten Werte bei der gewählten Multiskalen-Analyse Methode das Gesamtbild der Bewegung beeinflusst. Es wäre deshalb von Interesse, eine Methode zu finden, mit welcher diese Werte besser miteinbezogen werden können. Eine Möglichkeit dafür wäre ein Fuzziness-Ansatz, wobei jedem Punkt innerhalb eines Berechnungsfensters der Parameterwert des mittleren Punktes zugeteilt würde und der effektive Wert in einem Punkt aus dem Mittelwert aller Zuweisungen bestünde. Ein Fuzziness-Ansatz wäre nicht nur bei

der Berechnung der Werte auf einer einzelnen Skala, sondern ähnlich wie bei Fisher et al. (2004) auch über die verschiedenen Skalen hinweg vorstellbar. In Bezug auf die Darstellung der Ergebnisse musste in dieser Arbeit festgestellt werden, dass keine der gewählten Darstellungsformen mit den grossen Informationsmengen, welche eine Multiskalen-Analyse liefert, umgehen kann. In zukünftigen Arbeiten wäre deshalb ein besserer Einbezug von Methoden aus dem Bereich der *visual analytics* nötig.

Literaturverzeichnis

- Andrienko G., Andrienko N., Wrobel, S. (2007). Visual Analytics Tools for Analysis of Movement Data. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter - Special issue on visual analytics*, 9(2), 38-46.
- Andrienko, G. und Andrienko, N. (2008). Spatio-temporal Aggregation for Visual Analysis of Movements. *IEEE VAST*, 51-58.
- Andrienko, G., Andrienko, N., Dykes, J., Fabrikant, S. I., Wachowicz, M. (2008a). Geovisualization of Dynamics, Movement and Change: Key Issues and Developing Approaches in Visualization Research. *Information Visualization*, 7, 173-180.
- Andrienko, N., Andrienko, G., Pelekis, N., Spaccapietra, S. (2008b). Basic Concepts of Movement Data. In (eds.) Giannotti, G., Pedreschi, D., *Mobility, data mining, and privacy: geographic knowledge discovery*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, DE, 15-38.
- Armstrong, Ch., Mann, R., Collett, M., Freeman, R., Roberts, S., Wilkinson, H., Guilford, T. (2008). Why do pigeons form habitual routes? In *Proceedings of Orientation and Navigation - Birds, Humans and Other Animals Conference of the Royal Intitute of Navigation*.
- Benhamou, S. (2004). How to reliably estimate the tortuosity of an animal's path: straightness, sinuosity, or fractal dimension? *Journal of Theoretical Biology*, 229 (2), 209-220.
- Biro, D., Sumpter, D. J. T., Meade, J. (2006). From Compromise to Leadership in Pigeon Homing. *Current Biology*, 16, 2123-2128.
- Brillinger, D. R., Preisler, H., K., Ager, A. A., Kie, J. G. (2004). An exploratory data analysis (EDA) of the paths of moving animals. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 122, 43-63.
- Dias, E., Edwardes, A. and Purves, R. (2007) Analysing and Aggregating Visitor Tracks in a Protected Area. *5th International Symposium on Spatial Data Quality proceedings*. Enschede, ISPRS.
- Dodge, S., Weibel, R., Forootan, E. (2009). Revealing the physics of movement: Comparing the similarity of movement characteristics of different types of

Literaturverzeichnis

- moving objects. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33, 419-434.
- Fisher, P., Wood J., Cheng T. (2004). Where is Helvellyn? Fuzziness of multi-scale landscape morphometry. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 29, 106-128.
- Freeman, R., Mann, R., Guilford, T., Biro, D. (2010). Group decisions and individual differences: route fidelity predicts flight leadership in homing pigeons (*Columba livia*). *Biology letters*, 7, 63-66.
- Fritz, H., Said, S., Weimerskirch, H. (2003). Scale-dependent hierarchical adjustments of movement patterns in a long-range foraging seabird. *Proceedings of The Royal Society of London B*, 270, 1143-1148.
- Fryxell, J. M., Hazell, M., Börger, L., Dalziel, B. D., Haydon, D. T., Morales, J. M., McIntosh, T., Rosatte, R. C. (2008). Multiple Movement Modes by Large Herbivores at Multiple Spatiotemporal Scales. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 105 (49), 19114-19119.
- Gibson, C. C., Ostrom E., Ahn, T. K. (2000). The concept of scale and human dimensions of global change: a survey. *Ecological Economics*, 32, 217-239.
- Goodchild, M. F. (2001). Models of Scale and Scales of Modelling. In: (eds.) Tate, N. J. und Atkinson, P. M., *Modeling Scale in Geographical Information Science*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, U.K, 3-10.
- Greenfeld, J. S. (2002). Matching GPS Observations to Locations on a Digital Map. *Environmental Engineering*, 1 (3), 164-173.
- Haklay , M. und Weber, P. (2008). OpenStreetMap: User-Generated Street Maps. *Pervasive Computing*, 7 (4), 12-18.
- Haklay, M. (2010). How good is volunteered geographical information? A comparative study on OpenStretMap and Ordnance Survey datasets. *Environment an Planning B: Planning and Design*, 37, 682-703.
- Hornsby, K. und Egenhofer, M. J. (2002). Modeling Moving Objects over Multiple Granularities. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 36 (1-2), 177-194.

Literaturverzeichnis

- Jerde, Ch. L., Visscher, D. R. (2005). GPS Measurement Error Influences on Movement Model Parameterization. *Ecological Applications*, 15 (3), 806-810.
- Kircher, E. und Schneider, W. B. (2002). Physikdidaktik in der Praxis. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, DE, 121.
- Knoblauch, R. L, Pietrucha, M. T., Nitzburg, M. (1996). Field Studies of Pedestrian Walking Speed and Start-Up Time. *Transportation Research Record: journal of the Transportation Research Board*, 1538, 27-38.
- Krumm, J., Letchner, J., Horvitz, E. (2007). Map Matching with Travel Time Constraints. In *Society of Automotive Engineers (SAE) 2007 World Congress*; 2007-01-1102.
- Laube P., Purves, R. S. (2011). How fast is a cow? Cross-Scale Analysis of Movement Data. *Transactions in GIS*, 15 (3), 401-418.
- Laube, P. (2009). Progress in Movement Pattern Analysis. In (eds.) Gottfried B. und Aghajan, H., *Behaviour Monitoring and Interpretation- BMI - Smart Environments*, CRC Press, 43-71.
- Laube, P., Dennis, T., Forer, P., Walker, M. (2007). Movement Beyond the Snapshot - Dynamic Analysis of Geospatial Lifelines. *Computers, Environment and Urban Systems*, 31, 481-501.
- Lloyd, Ch. D. (2010). Spatial data analysis. Oxford University Press Inc., New York, U.S., 26.
- Mann, R., Freeman, R., Osborne, M., Garnett, R., Armstrong, Ch., Meade, J., Biro, D., Guilford, T., Roberts, S. (2010). Objectively identifying landmark use and predicting flight trajectories of the homing pigeon using Gaussian processes. *Journal Of The Royal Society Interface*, 8, 210-219.
- Mann, R., Freeman, R., Osborne, M., Garnett, R., Meade, J., Armstrong, Ch., Biro, D., Guilford, T., Roberts, S. (2009). Gaussian Processes for Prediction of Homing Pigeon Flight Trajectories. *AIP Conference Proceedings*, 1193, 360-367.
- Mark, D., Egenhofer, M. (1998). Geospatial lifelines. In (eds.) Günther, O., Sellis, T., Theodoulidis, B., *Integrating Spatial and Temporal Databases. Dragstuhl-*

Literaturverzeichnis

Seminar-Report, 228.

- Mondzech, J. und Sester, M. (2011). Quality Analysis of OSM Data Based on Application Needs. *Cartographica*, 46 (2), 115-125.
- Montello, D. R. (2001). Scale in Geography. In (eds.) Smelser, N. J. und Baltes, *International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences*, Pergamon Press, Oxford, U. K., 13501-13504.
- Nams, V. O. (2005). Using animal movement paths to measure response to spatial scale. *Oecologia*, 143, 179-188.
- Ochieng, W. Y., Quddus, M., Noland, R. B. (2009). Map-Matching in Complex Urban Road Networks. *Brazilian Journal of Cartography*, 55 (2), 1-18.
- OpenStreetMap (2011). OpenStreetMap Wiki - Data Primitives. <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Data_Primitive>. Zugriff: 28.11.2011.
- Patterson, T. A., Thomas, L., Wilcox, C., Ovaskainen, O., Matthiopoulos, J. (2008). State-space models of individual animal movement. *Trends in Ecology and Evolution*, 23 (2), 87-94.
- Pfoster, D., Jensen, C. S., Theodoridis, Y. (2000). Novel Approaches to the Indexing of Moving Object Trajectories. In *Proceedings of the 26th VLDB Conference*, 395-406.
- Reynolds, T. D., Laundre, J. W. (1990). Time Intervals for Estimating Pronghorn and Coyote Home Ranges and Daily Movements. *The Journal of Wildlife Management*, 54 (2), 316-322.
- Schmidt, J., Andrew, R. (2005). Multi-scale landform characterization. *Area*, 37 (3), 341-350.
- Spaccapietra, S., Parent, C., Damiani M. L., de Macedo, J. A., Porto, F., Vangenot, C. (2008). A conceptual view on trajectories. *Data & Knowledge Engineering*, 65, 126-146.
- Stahel, W. A. (2002). Statistische Datenanalyse - Eine Einführung für Naturwissenschaftler. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, DE, 26.
- Stewart Hornsby, K., King K. (2008). Modeling Motion Relations for Moving

Literaturverzeichnis

- Objects on Road Networks. *Geoinformatica*, 12, 477-495.
- Taylor, C. L (1997-1998). Geographic/UTM Coordinate Converter. <<http://home.hiwaay.net/~taylorc/toolbox/geography/geoutm.html>>. Zugriff: 25.03.2011.
- Tufte, E. R. (1991). *Envisioning Information*. Graphics Press, Cheshire, Connecticut, U.S., 67-80.
- Turner, M. G. (1989). Landscape Ecology: The Effect of Pattern on Process. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 20, 171-197.
- Van Exel, M., Dias, E., Fruitier, S. (2010). The impact of crowdsourcing on spatial data quality indicators. *The 6th International conference on GIS*.
- Van Schaik, J. und van der Spek, S. (2008). *Urbanism on Track: Application of Tracking Technologies in Urbanism*. Delft University Press, Amsterdam, NL.
- Wartmann, F.M, Purves, R. S., van Schaik, C. P. (2010). Modelling ranging behaviour of female orang-utans: a case study in Tuanan, Central Kalimantan, Indonesia. *Primates*, 51(2), 119-130.
- Watson, M. K. (1978). The Scale Problem in Human Geography. *Geografiska Annaler. Series B, Human Geography*, 60 (1), 36-47.
- Webb, S. L., Riffell, S. K., Gee, K. L., Demarais, S. (2009). Using Fractal Analysis to Characterize Movement Paths of White-Tailed Deer and Response to Spatial Scale. *Journal of Mammalogy*, 90 (5), 1210-1217.
- Weibel, R, Sack, J.-R., Sester, M., Bitterlich, W. (2008). Representation, Analysis and Visualization of Moving Objects. In *Dagstuhl Seminar Proceedings*, 08451.
- White, Ch. E., Bernstein, D., Kornhauser, A. L. (2000). Some map matching algorithms for personal navigation assistants. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 8 (1-6), 91-108.
- Wu, J. (2004). Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations. *Landscape Ecology*, 19, 125-138.

A. Anhang

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Small Multiples der Geschwindigkeiten der Flüge von vier Tauben	93
Abbildung 2: Small Multiples der Beschleunigungswerte der Flüge von vier Tauben.....	94
Abbildung 3: Small Multiples der Richtungsänderungen der Flüge von vier Tauben.....	95
Abbildung 4: Small Multiples der Gewundenheitswerte der Flüge von vier Tauben	96

Anhang

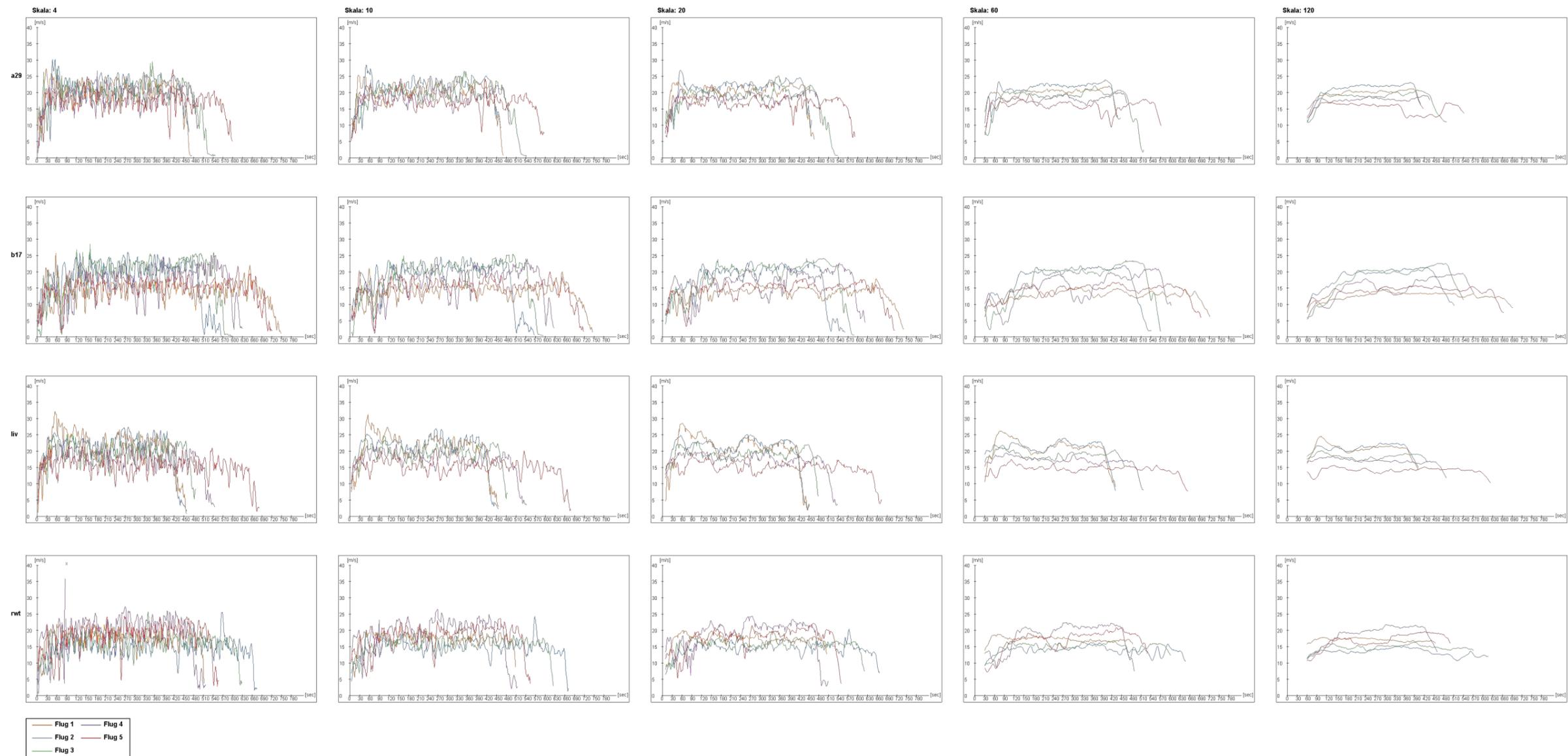


Abbildung 1: Small Multiples der Geschwindigkeiten der Flüge von vier Tauben

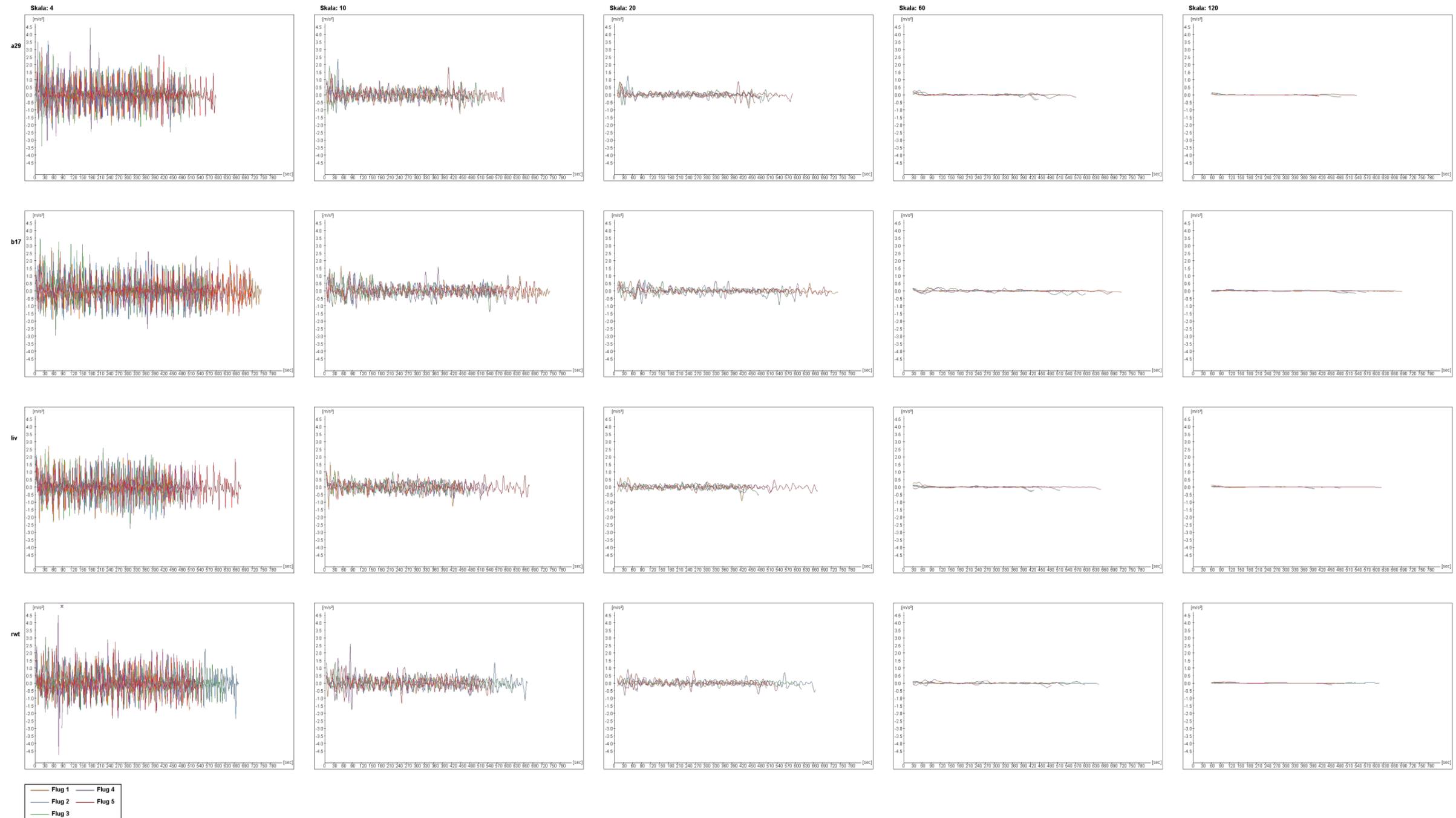


Abbildung 2: Small Multiples der Beschleunigungswerte der Flüge von vier Tauben

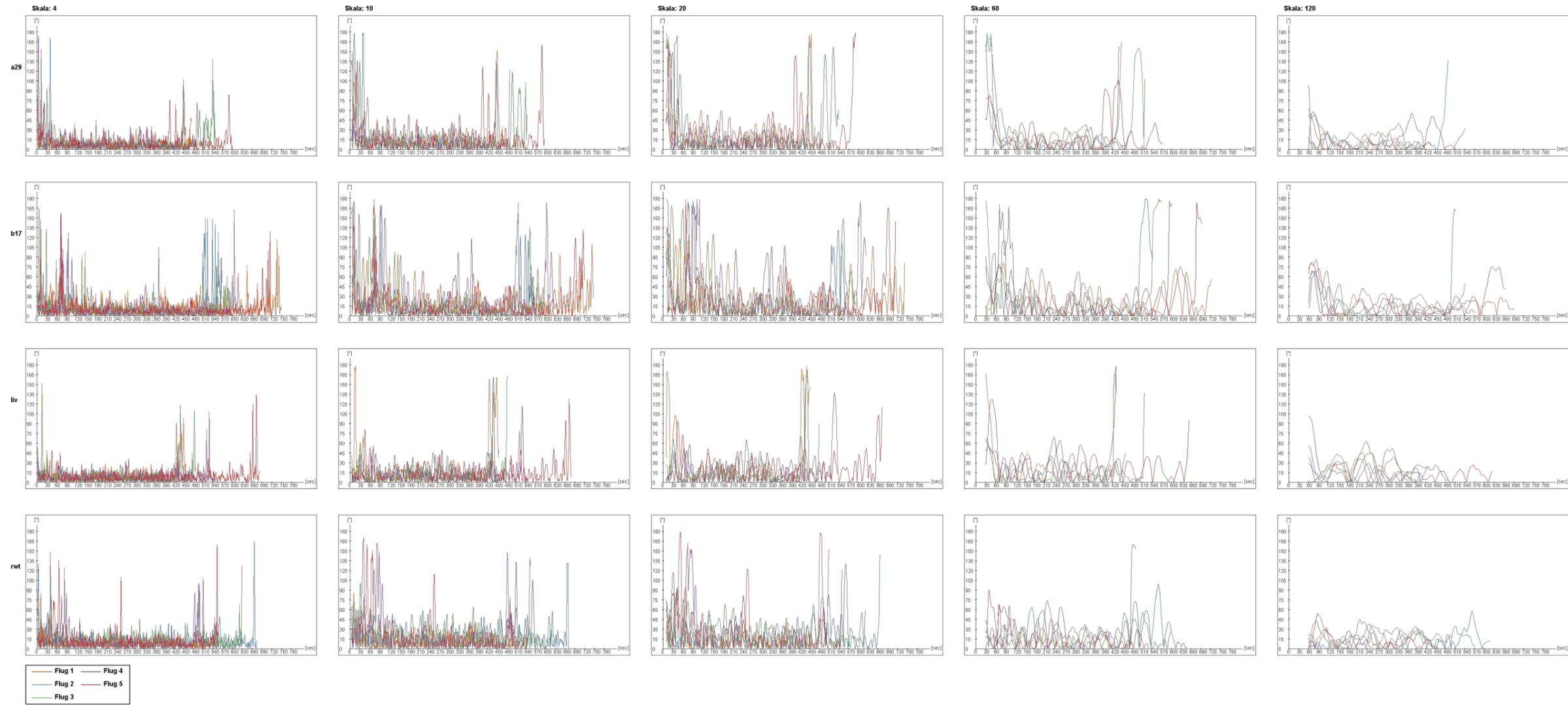


Abbildung 3: Small Multiples der Richtungsänderungen der Flüge von vier Tauben

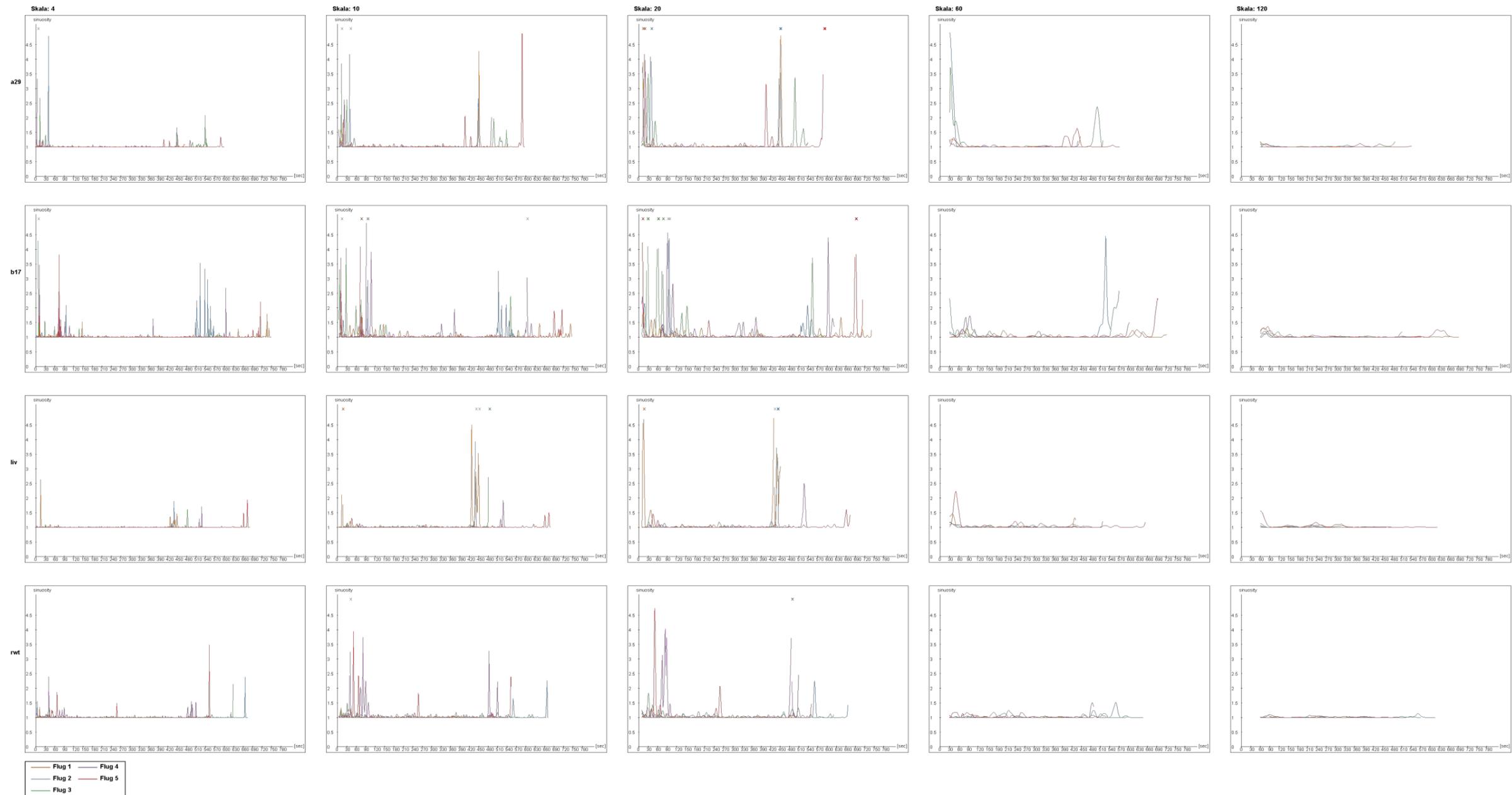


Abbildung 4: Small Multiples der Gewundenheitswerte der Flüge von vier Tauben

B. 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, 30.01.2012

Alexandra Zeiler