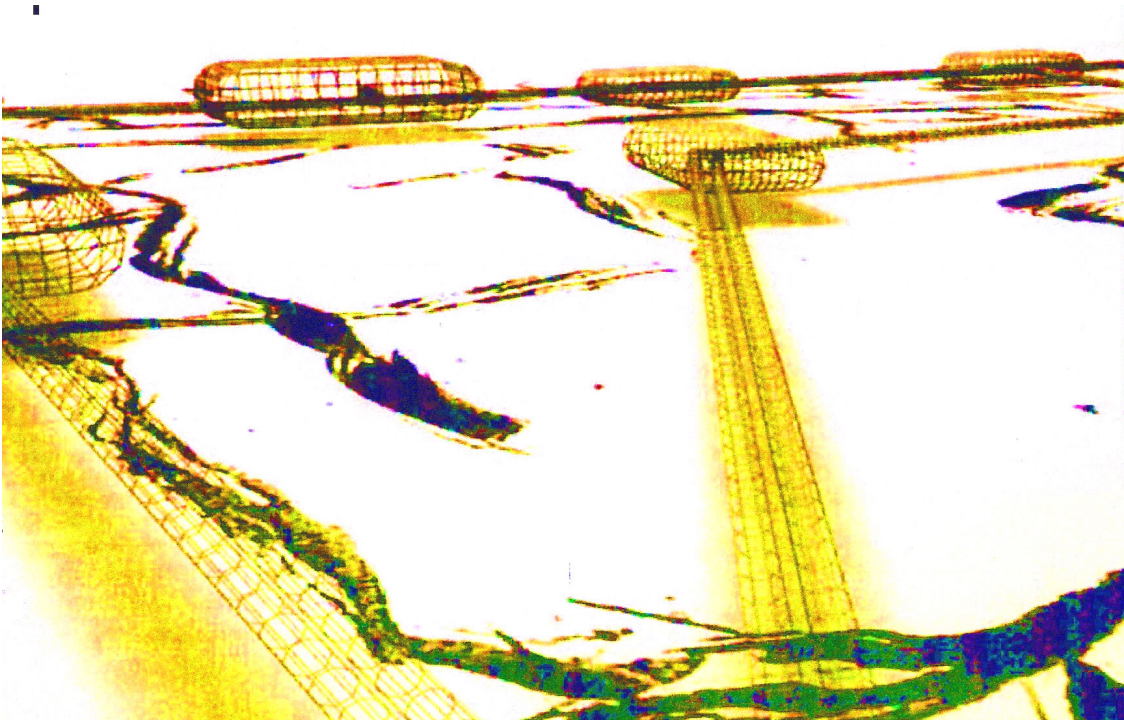


Ortungsgenauigkeit der Radfahrernavigation

Ansatz zur Verbesserung der Positions-
bestimmung als Beitrag zur Optimierung
von Navigationssystemen für Radfahrer

Stefan Tetzner

6



Band 6

**Ansatz zur Verbesserung der Positionsbestimmung als ein Beitrag
zur Optimierung von Navigationssystemen für Radfahrer**

**DISSERTATION
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

**Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Stefan Tetzner**

**Eingereicht bei der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Abteilung Bauwissenschaften,
Universität Duisburg-Essen
Essen 2008**

Stefan Tetzner

Geburtsdatum: 19.11.1970

Geburtsort: Hannover

Datum der mündlichen Prüfung: 03.07.2008

- 1. Gutachter: Herr Prof. Dr. techn. Jörg Schönharting**
- 2. Gutachter: Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich**

Tetzner, Stefan (Hrsg.):

Ansatz zur Verbesserung der Positionsbestimmung als ein Beitrag
zur Optimierung von Navigationssystemen für Radfahrer

Verkehrswesen und Verkehrsbau, Universität Duisburg-Essen, Bd. 6

ISBN 3-922602-31-2

Künstlerische Gestaltung des Titelbildes: Bettina Zachow

Copyright Universität Duisburg-Essen, 2008.

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen
und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-922602-31-2

Universität Duisburg-Essen, Campus Essen,
FG Verkehrswesen und Verkehrsbau,
Universitätsstraße 15, 45141 Essen, Telefon: 0201/183-2698
Internet: www.traffic.uni-essen.de

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung der Untersuchung	11
1.1	Hintergründe.....	11
1.2	Problemstellung.....	13
1.3	Ziel der Arbeit	15
1.4	Aufbau der Arbeit	16
2	Zur Gestaltung von Radtouren.....	19
2.1	Infrastruktur des Radverkehrs	19
2.1.1	Radwegenetze.....	19
2.1.2	Statische Zielführung.....	24
2.1.3	Dynamische Zielführung.....	24
2.2	Ausgestaltung von Radtouren	25
2.2.1	Differenzierung von Radtouren.....	25
2.2.2	Analyse der Planung einer Tour	30
2.2.3	Analyse der Durchführung einer Tour.....	32
2.2.4	Kriterien bei der Wegewahl.....	36
2.3	Einsatz von Navigationslösungen bei Radtouren	44
2.3.1	Funktionsweise der Satellitennavigation.....	48
2.3.2	Kartenbezugssysteme	51
2.3.3	Routing	54
2.3.4	Ortung und Zielführung.....	61
2.3.5	Grafische Oberfläche und verwendete Karten.....	67
3	Zur Genauigkeit der Standortbestimmung	75
3.1	Begriffe	78
3.2	Probleme bei der Positionsbestimmung	80
3.3	Erzielbare Genauigkeit	83
3.4	Ausfallhäufigkeiten und -wahrscheinlichkeiten	98
4	Zur Wahrscheinlichkeit, sich bei einer Radtour zu verfahren	101
4.1	Hintergrund.....	101
4.2	Verhalten des Nutzers ohne GPS in einem realen Netz.....	103
4.2.1	Modellnetz	103

4.2.2	Beobachtung	104
4.2.3	Befragung	112
4.3	Simulation des Nutzerverhaltens mit GPS in einem virtuellen Netz	117
4.3.1	Modellnetz	117
4.3.2	Hintergrund der Simulation	121
4.3.3	Ergebnisse	123
4.4	Simulation des Nutzerverhaltens mit GPS in einem realen Netz	126
4.4.1	Modellnetz	126
4.4.2	Nachbildung des Nutzerverhaltens	130
4.4.3	Ergebnisse der simulierten Rundtour	136
4.4.4	Ergebnisse der simulierten Etappe	143
4.5	Auswirkungen einer fehlerhaften Ortung auf die Interpretation des aktuellen Standortes (Kantenfehlinterpretation)	148
5	Lösungsansätze zur Verbesserung der Standortbestimmung	153
5.1	Einfache mathematische Korrekturansätze	155
5.2	Korrektur mittels Wegstreckenmessung	163
5.3	Korrektur durch Einbezug der Höhenmeter	168
5.4	Korrektur durch Einbezug eines Kompasses	178
5.5	Korrektur mittels Überprüfung der Plausibilität des GPS	178
5.6	Korrektur mittels Ähnlichkeitstransformation	180
6	Auswirkungen der Standortoptimierung auf die Wahrscheinlichkeit, sich bei einer Radtour zu verfahren	185
6.1	Entwicklung des Simulationsalgorithmus	185
6.2	Einschränkungen des Verfahrens	192
6.3	Simulationsergebnisse	193
6.3.1	Ergebnisse ohne Einbezug des Verschiebungsvektors	194
6.3.2	Ergebnisse unter Einbezug des Verschiebungsvektors	204
6.4	Verbesserungspotenzial der Standortbestimmung	207
6.4.1	Verbesserungspotenzial bei GPS-Ungenauigkeit	207
6.4.2	Verbesserungspotenzial bei GPS-Ausfall	209
6.5	Optimierungsgrad der Standortbestimmung	210
6.5.1	Indikatoren zur Ermittlung des Verbesserungspotenzials	211

6.5.2	Kantenbefahrungsgrad ohne GPS-Unterstützung	213
6.5.3	Kantenbefahrungsgrad mit fehlerhafter GPSUnterstützung.....	213
6.5.4	Kantenbefahrungsgrad mit korrigierter GPS-Unterstützung	215
7	Zusammenfassung und Ausblick	219
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	219
7.2	Ausblick.....	222
	Verzeichnisse	225
	Abkürzungsverzeichnis.....	226
	Abbildungsverzeichnis.....	229
	Tabellenverzeichnis.....	234
	Literaturverzeichnis	236
	Verzeichnis der Internetquellen	247
	Verzeichnis der Daten- und Kartenquellen	250
	Anhang.....	253

1 Zielsetzung der Untersuchung

1.1 Hintergründe

Die Stellung des Fahrrades als Verkehrsmittel in Deutschland ist in der Vergangenheit deutlich gestiegen – und auch in Zukunft wird das Fahrrad als umweltfreundliches und sich von verknappenden und verteuernenden Mineralölvorräten unabhängiges Fortbewegungsmittel an Bedeutung gewinnen. Zwar sind die in Deutschland per Rad zurückgelegten Wege pro Tag von 21 Mio. im Jahr 1982 auf 19 Mio. im Jahr 2002 zurückgegangen, gleichzeitig hat sich aber die Fahrleistung um etwa 30 % von 53 [Mio. P-km] in 1982 auf 69 [Mio. P-km] in 2002 erhöht.¹ Dies stellt eine Jahresfahrleistung von ca. 300 km pro Einwohner dar. Insgesamt werden in Deutschland 9 % der Wege mit dem Rad zurückgelegt.²

Besonderes bedeutsam ist das Fahrrad als Verkehrsmittel im Urlaub und unterliegt auch in diesem Bereich einer steigenden Nachfrage.³ Laut der jährlich erscheinenden Radreiseanalyse des Allgemeinen Deutschen Fahrrad Clubs (ADFC) nutzen fast 45 % der Deutschen über 14 Jahren das Fahrrad im Urlaub.⁴ Jeder siebte macht davon häufig bis sehr häufig Gebrauch. Bis zu 90 % der Fahrradurlaube sind lt. ADFC Haupturlaubsreisen, im Jahr 2002 haben mehr als zwei Millionen Deutsche eine Radreise unternommen.⁵

Die Förderung des Verkehrsmittels „Fahrrad“ wird in allen politischen Ebenen erkennbar. Der von der Bundesregierung herausgegebene Radverkehrsplan stellt Konzepte und Maßnahmen zur Förderung und Attraktivitätssteigerung des

¹ Infas: Mobilität in Deutschland 2002, S. 98.

² Infas: Mobilität in Deutschland 2002, S. 71.

³ Vgl. ADFC: Radreiseanalyse 2003.

⁴ Vgl. ADFC: Radreiseanalyse 2007.

⁵ Vgl. ADFC: Radreiseanalyse 2006, 2007.

Radverkehrs in Deutschland vor.⁶ Von Ländern und Kommunen wird der Ausbau eines geschlossenen, sicheren und einheitlich beschilderten Radwegenetzes^{7 8 9} mit ergänzender Infrastruktur¹⁰ (z. B. Fahrradparkhäuser) vorangetrieben.

Bei Fahrradfahrten mit beruflichem Hintergrund, die meist nur wenige Kilometer lang sind, verfügt der Nutzer i. d. R. über gute Kenntnisse der Umgebung. Fahrten mit Freizeitzweck sind dagegen ein Vielfaches länger, das Radwegenetz und die Umgebung sind meist nicht oder wenig bekannt. Wurde früher vom Nutzer konventionell auf Karten zur Vorbereitung und Durchführung der Tour zurückgegriffen, kommen dazu heute vermehrt Navigationslösungen zum Einsatz, um die Schwierigkeiten der herkömmlichen Tourenplanung bzw. Tourendurchführung zu umgehen. Die Vorteile von Navigationsanwendungen liegen in der Routensuche, der Ortung und der Zielführung sowie in der Unterstützung des Fahrers durch statistische und standortabhängige Informationen (Local Based Services, kurz: LBS).

Die Nutzung von Navigationssystemen ist nach Inbetriebnahme des Global Positioning Systems (GPS) durch das amerikanische Verteidigungsministerium im Juli 1995¹¹ möglich geworden. Ein Einsatz für den zivilen Bereich, speziell im Freizeitbereich, ist aber erst seit Abschaltung der Selective Availability (SA)¹²

⁶ Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: Nationaler Radverkehrsplan 2002-2012.

⁷ Forschungsprogramm „100 Radstationen in NRW“ von 1995.

⁸ Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Energie und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen: FahrRad in NRW!, S. 78 ff.

⁹ Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Energie und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen: Fahrradfreundliches Nordrhein-Westfalen, S. 12.

¹⁰ Siehe <http://www.radverkehrsnetz.nrw.de>.

¹¹ <http://gps.faa.gov/FAQ/faq-gps.htm>.

¹² Die „Selective Availability“ ist eine künstliche Verschlechterung des GPS-Signals durch das amerikanische Militär.

am 1. Mai 2000 sinnvoll möglich. Die Entwicklungen der vergangenen Jahre hinsichtlich des Preises, der Geräteabmessungen und der zur Verfügung stehenden digitalen Wegenetze haben die Verbreitung von Navigationssystemen auch unter Radfahrern vorangetrieben.

1.2 Problemstellung

Die Hypothese der vorliegenden Arbeit ist, dass die vorhandenen Navigationssysteme für Radfahrer nach wie vor unzureichend geeignet sind. Eine Umsetzung der Bedürfnisse von Radfahrern in ein speziell auf ihre Anforderungen zugeschnittenes System hat nicht stattgefunden, da letztere offensichtlich nicht hinreichend ermittelt worden sind. Vielmehr wurden multinutzertaugliche Systeme angeboten oder Systeme aus dem Kfz-Bereich für den Einsatz im Fahrradbereich adaptiert, die jedoch die speziellen Bedürfnisse von Radfahrern nicht oder nur unzureichend abdecken.

Von der ökonomischen Seite her könnten die Hauptgründe dafür darin liegen, dass sich die aufwändige Forschung und Entwicklung aus Sicht der Anbieter nicht lohnt und die Zahlungsbereitschaft potenzieller Nutzer – im Gegensatz zur Investitionsbereitschaft im Kraftfahrzeugsektor – nicht hoch genug ist. Die Produktion entsprechender Systeme erscheint, insbesondere durch den Aufwand der Datenaufnahme und -pflege, wenig wirtschaftlich. Außerdem wird die Sinnhaftigkeit einer fahrradbezogenen Anwendung von vielen Nutzern insbesondere wegen der vermeintlichen Unvereinbarkeit von Natur und Technik und aufgrund der verhältnismäßig hohen Kosten nicht erkannt. Eine verbesserte Qualität der Geräte hinsichtlich spezieller Radfahrerfunktionalitäten würde sicherlich die Kaufbereitschaft bei den Kunden vergrößern. Ein entsprechender Markt dafür – preisgünstigere Angebote der Systeme vorausgesetzt – ist aufgrund des zunehmenden Trends zur stärkeren Fahrradnutzung vorhanden. Neben den hohen Produktionskosten bzw. geringen Absatzzahlen sind aber auch eine

Vielzahl technischer und funktionaler Gründe dafür verantwortlich, dass auf Radfahrer ausgerichtete Navigationslösungen fehlen.

Obwohl die auf dem Markt verfügbaren Navigationssysteme für den Freizeitverkehr im Wesentlichen aus der Kfz-Nutzung abgeleitet sind, sind die eigentlichen Kernaufgaben dieser Systeme – die Standortbestimmung und das Routing – prinzipiell auch von Radfahrern nutzbar. Aufgrund des Aktionsradius und des Bewegungsmusters von Radfahrern, denen ein feinmaschigeres Wegenetz zur Verfügung steht und die aufgrund der höheren Umwegempfindlichkeit auf eine eindeutige und zuverlässige Standortbestimmung und Zielführung angewiesen sind, muss eine Ortung für Radfahrer aber einen deutlich höheren Genauigkeitsgrad aufweisen als für Kraftfahrzeuge. Tatsächlich ist sie jedoch ungenauer, weil die am Fahrrad verfügbaren technischen Hilfsmittel der Ortung gegenüber denen beim Pkw eingeschränkt sind. Im Wesentlichen lassen sich die Mängel der Standortbestimmung nach

- Ungenauigkeiten der Ortung sowie
 - Ausfällen der Ortung
- differenzieren.

Ungenauigkeiten werden von den Nutzern häufig gar nicht bemerkt, insbesondere weil sie sich meist nur bei erforderlichen Abbiegevorgängen der Hilfe der Satellitennavigation bedienen. Von Relevanz sind Ungenauigkeiten aber besonders in Radwegenetzen hoher Dichte, wie sie beispielsweise im Bereich von Serpentina in topografisch bewegten Bereichen oder bei nahe beieinanderliegenden Knotenpunkten in Großstädten vorzufinden sind. Eine Ungenauigkeit der Ortung führt hierbei unter Umständen zu einer völligen Fehlinterpretation des Standortes, woraus sich Abbiegefehlentscheidungen und Umwege des Radfahrers ergeben können.

GPS-Ausfälle werden vom Nutzer i. d. R. eher bemerkt als Ungenauigkeiten, sofern das Gerät den Ausfall signalisiert oder der Nutzer die möglicherweise fehlerhafte Positionierung seines Standortes im System erkennt. Setzt der Nutzer seine Fahrt bei GPS-Ausfall fort, ist er – wie bei der herkömmlichen Tour mit einer Papierkarte – ausschließlich auf die Kartendarstellung angewiesen. Aufgrund der zumeist ungenügenden Darstellungsqualität von Kartenausschnitten auf den Displays der Navigationssysteme bzw. dem erschwerten Handling im Gegensatz zu konventionellen Karten sieht sich der Nutzer früher oder später dem Risiko ausgesetzt, die geplante Tour fehlerhaft fortzusetzen, weil eine falsche Abbiegeentscheidung am Knoten getroffen wird.

1.3 Ziel der Arbeit

Die aus den dargestellten Mängeln abgeleitete Zielsetzung dieser Arbeit ist es, ein möglichst einfaches, praktikables Verfahren zur Optimierung der Standortbestimmung bei Radfahrravigationssystemen zu entwickeln, das insbesondere Zeitbereiche mit GPS-Ausfall überbrückt. Die Standortoptimierung soll möglichst leistungsfähig sein, sich einfach in Anwendungen integrieren lassen, wenig störanfällig sein und möglichst geringe Kosten auf der Hardwareseite verursachen. Damit scheidet Systeme, die auf Installationen im Bereich der Infrastruktur angewiesen sind, als Lösungsansätze aus. Zu solchen Systemen sind beispielsweise Ortungssysteme mittels ortsfester Baken zu zählen. Das Differential GPS (DGPS), bei dem die herkömmlichen GPS-Signale um Korrekturdaten von Referenzstationen ergänzt werden, ermöglicht eine gegenüber dem GPS genauere Ortungspräzision. DGPS ist aber in der gleichen Weise wie GPS vom Ausfall hinreichender Satellitensignale betroffen und zudem aufgrund der vergleichsweise hohen Kosten nicht für mobile Radfahrravigationssysteme geeignet.

Ausgehend von den Bedingungen, denen Radtouren unterworfen sind (Ablauf von Radtouren, Infrastruktur und Einsatzmöglichkeiten der Navigation) wird in

dieser Arbeit das Verhalten von Radfahrern im Netz analysiert. Es wurden unter anderem Nutzer nach ihren Wünschen und Anforderungen an Komponenten eines Radfahrernavigationssystems bzw. nach ihren Auswahlkriterien von Wegen und Routen befragt. Anhand der daraus gewonnenen Ergebnisse wurde die Notwendigkeit der Unterstützung von Radfahrern durch eine verbesserte Positionsbestimmung deutlich. Diese ergibt sich nicht nur seitens der Ansprüche derjenigen Radfahrer, die bisher ohne Ortung unterwegs waren, sondern auch aufgrund der beobachteten Ungenauigkeiten und Ausfallraten existierender Navigationssysteme.

In diesem Sinne werden Lösungsansätze erarbeitet, die prinzipiell für eine optimierte Positionsbestimmung denkbar sind. Nach Auswahl des am besten geeignet erscheinenden Ansatzes wird zu diesem ein Algorithmus entwickelt und simulativ erprobt. Anschließend wird anhand geeigneter Kriterien das Optimierungspotenzial des Algorithmus bestimmt.

1.4 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit folgt den vorgestellten Ansätzen:

Im zweiten Kapitel wird zunächst einmal eine Differenzierung des Radverkehrs nach diversen Kriterien vorgenommen und der Ablauf von Radtouren untersucht. Dazu werden die Komponenten von Radtouren analysiert, indem die infrastrukturellen Einrichtungen für den Radverkehr betrachtet werden, zu denen neben dem Radwegenetz statische und dynamische Zielführungselemente zu zählen sind. Auf der Grundlage von Nutzerbefragungen werden die Kriterien untersucht, die Radfahrern während der Tourvorbereitung und -durchführung wichtig erscheinen.

Der Abschnitt „Ausgestaltung von Radtouren“ stützt sich auf die konventionell durchgeführte Tour per Karte, bevor Radtouren mittels Einsatz von Navigationslösungen vorgestellt werden.

Das dritte Kapitel befasst sich mit der Problematik der Standortbestimmung beim Einsatz von Navigationslösungen. Es wird die Notwendigkeit einer Optimierung aufgezeigt, indem die erzielbare Genauigkeit bzw. die verfügbare Abdeckung durch das GPS während verschiedener Touren dargestellt wird.

Kapitel vier beschäftigt sich mit der Frage, welche Auswirkungen eine fehlerbehaftete Standortbestimmung auf die Fahrt des Radfahrers hat. Dazu werden einerseits Fahrten von Radfahrern ohne Navigationsunterstützung analysiert, indem die Fahrtverläufe aufgezeichnet und die Fahrer befragt werden. Andererseits werden Touren von Fahrten mit fehlerbehaftetem GPS simuliert. Durch die Simulation können Fehler bzw. Ausfälle des GPS-Signals deterministisch vorherbestimmt werden und willkürliche Verhaltensweisen der Nutzer ausgeschlossen werden. Diese sind bei Fahrten realer Nutzer beispielsweise dann zu beobachten, wenn Wegeentscheidungen unter Unsicherheit in Abhängigkeit von vermeintlich vorteilhaften Kriterien (z. B. abschüssiger Weg) getroffen werden.

Abschließend werden die Auswirkungen einer fehlerhaften Standortbestimmung analysiert, indem für verschiedene Netzkonstellationen geprüft wird, in welchen Fällen die beobachteten Ungenauigkeiten zu Standortfehlinterpretationen führen würden.

Das fünfte Kapitel stellt Lösungsansätze dar, um GPS-Ausfälle oder -Ungenauigkeiten zu kompensieren. Es werden die Möglichkeiten und Einsatzgrenzen der technischen Umsetzbarkeit aufgezeigt.

Die verschiedenen Lösungsansätze werden im sechsten Kapitel miteinander verglichen und das am besten geeignete Verfahren ausgewählt. Ein konkreter Lösungsalgorithmus wird entwickelt und hinsichtlich seines Verbesserungspotenzials und seiner Einsatzgrenzen beurteilt. Dazu werden Simulationen durch-

geführt und die Ergebnisse analysiert. Um die Qualität bzw. das Verbesserungspotenzial des erarbeiteten Algorithmus zu bestimmen, wird sein Potenzial in drei Stufen ermittelt:

Die erste Stufe besteht in der Auswertung des Verhaltens von Personen bei Radtouren ohne den Einsatz von Navigationslösungen. In der zweiten Stufe wird das Verhalten von Nutzern mit fehlerhaftem GPS simulativ abgebildet. Die dritte Stufe beinhaltet die Abschätzung der Genauigkeit der Standortbestimmung durch Einsatz des Algorithmus. Dazu werden Ausfälle auf der Grundlage von Aufzeichnungsdaten simuliert.

Um den Wirkungsgrad des entwickelten Algorithmus zu beurteilen, werden Indikatoren diskutiert, die geeignet sind, diesen zu beschreiben. Anhand der ausgewählten Kennwerte wird schließlich der Optimierungsgrad bestimmt. Dazu werden Radtouren mit Karte, solche mit unkorrigiertem GPS und solche mit korrigiertem GPS miteinander verglichen.

Abschließend wird in Kapitel sieben eine Zusammenfassung der Ergebnisse gegeben. In einem Ausblick werden die Chancen und Bedingungen für eine Umsetzung einer optimierten Radfahre Navigationslösung aufgeführt und der weitere Forschungsbedarf wird diskutiert.

2 Zur Gestaltung von Radtouren

Um Lösungsansätze zur Optimierung der Standortbestimmung von Radfahrern beim Einsatz von Navigationssystemen entwickeln zu können, werden zunächst die Komponenten einer Radtour, die dem Radfahrer bei der Tourenplanung und -durchführung – sei es konventionell per Karte oder modern per Navigationsgerät – begegnen, beleuchtet.

Dazu wird zunächst die Infrastruktur für Radfahrer untersucht, dann die herkömmliche, konventionelle Tourenplanung skizziert und anschließend werden die Einsatzmöglichkeiten von satellitengestützten Navigationssystemen für Radfahrer diskutiert.

Die Vorlieben von Radfahrern im Bereich von Radtouren bzw. die Anforderungen an Funktionalitäten von Radfahrernavigationssystemen wurden anhand bestehender Untersuchungen, Erfahrungen im Rahmen der Entwicklung eines Prototypen eines Radfahrernavigationssystems und anhand eigener Befragungen ermittelt.

2.1 Infrastruktur des Radverkehrs

Die Infrastruktur für Radfahrer lässt sich untergliedern in das Radwegenetz und die Zielführungskomponenten. Die Zielführung besteht einerseits aus statischen Elementen (Beschilderung) und andererseits aus dynamischen Elementen (Zielführung im engeren Sinne).

Die weitere Infrastruktur, wie beispielsweise die des ruhenden Radverkehrs, wie Abstellanlagen oder Fahrradparkhäuser, ist für die Arbeit nicht relevant.

2.1.1 Radwegenetze

Ein bundes- oder landesweit einheitliches Radwegenetz existiert nicht. Die Gestaltung des Radwegenetzes obliegt zumeist den Kommunen. Die Netzdichte ist abhängig von der Stellung des Radverkehrs in der jeweiligen Gemeinde

und insbesondere auch abhängig von der Topografie, dem städtebaulichen Profil und der Ausgestaltung von Wegebeziehungen. Eine einheitliche Gestaltung eines Radwegenetzes wird durch die unterschiedliche Führung von Radwegen erschwert: Neben eigenständigen Wegen für Radfahrer (straßenbegleitender Radweg, Radfahrstreifen) teilen sich Radfahrer den Verkehrsraum häufig mit anderen Verkehrsteilnehmern, wie Kraftfahrzeugen (Angebotsstreifen bzw. Schutzstreifen) oder Fußgängern (kombinierter Geh-/Radweg, Freizeitwege).

Die Richtlinien für die integrierte Netzgestaltung (RIN), die als Regelwerk für Planungen von Verkehrsnetzen dienen, unterscheiden in Radwege der Kategoriengruppe AR, die vorwiegend außerhalb bebauter Gebiete liegen und vorrangig dem touristischen Radverkehr dienen, und in Radwege der Kategoriengruppen CR (Verbindungsfunktion) und DR (Erschließungsfunktion), die als innerhalb bebauter Gebiete liegende Radwege dem alltäglichen Radverkehr vorbehalten sind.¹³

Netzabdeckung

Für den Fahrradfahrer ist der Abdeckungsgrad des verwendeten Netzes relevant. Darunter versteht man, wie vollständig das abgebildete Netz das tatsächliche Wegenetz wiedergibt. Das Netzmodell wird vom Nutzer in Form von – gedruckten oder digitalen – Karten verwendet. Da das Netz ein Modell ist, wird die Realität i. d. R. nicht vollständig, sondern ungenau wiedergegeben. Gegenüber der Realität fehlen im Modellnetz also Strecken, sind nicht lagegerecht verzeichnet oder es sind Strecken dargestellt, die realiter nicht existieren. Eine hohe Abbildungsgenauigkeit zeigt sich darin, dass die Linienführung der Strecken im Modell detailgetreu wiedergegeben wird. Für den Radfahrer stellt das unvollständige Netz das größte Problem dar, weil damit

- seine Orientierung erschwert wird,

¹³ FGSV: RIN 2007, S. 28.

- die Qualität des Routings bei Verwendung eines Radfahrernavigations-systems herabgesetzt wird und
- das System Standorte außerhalb von Kanten darstellt. Dies ruft beim Nutzer Unsicherheit hervor, ob die GPS-Ortung fehlerfrei ist.

Am Beispiel der speziell für Radrouten ausgelegten Fahrradkarte von Essen ist erkennbar, dass das Radwegenetz zahlreiche Lücken aufweist (siehe Abbildung 2-1). Aber auch in geschlossenen Netzbereichen sind die angebotenen Wege nicht immer optimal für Radfahrer nutzbar, weil beispielsweise die Radwege schlecht befestigt sind.

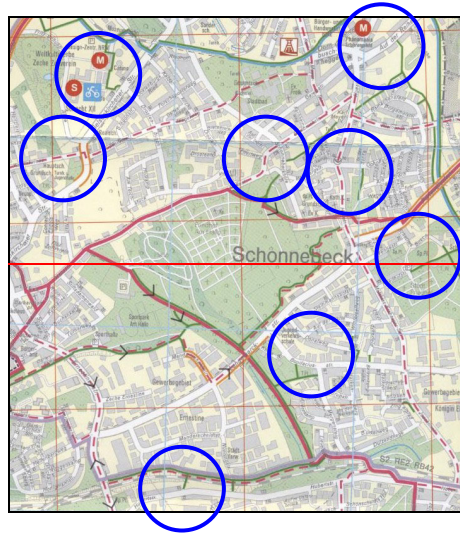


Abbildung 2-1: Beispiele für Lücken im Essener Radwegenetz¹⁴

Um die Bedeutung der Wahl geeigneter Wegenetze für die Führung bzw. Orientierung von Radfahrern zu untersuchen, wurde ein Vergleich vier verschiedener Netze im städtischen Bereich Essen-Überruhr vorgenommen. Dazu wurden vier

¹⁴ Stadt Essen: Amtliche Fahrradkarte Essen.

Freizeitkarten (Raster- und Vektornetze) in einem jeweils identischen Bereich hinsichtlich der Übereinstimmung der Netzkanten ausgewertet.

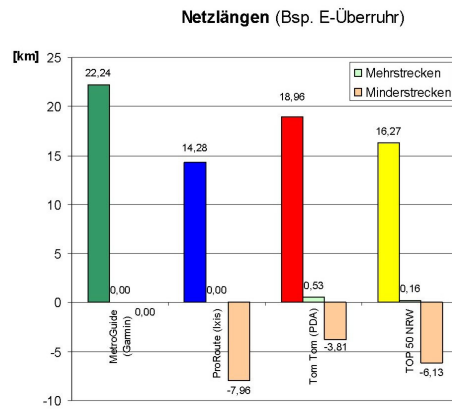


Abbildung 2-2: Vergleich der Vollständigkeit verschiedener Freizeitwegenetze

Die Auswertung beim Vergleich der Netze untereinander zeigt, dass die Netzabdeckung bei den verschiedenen Anbietern relativ heterogen ist. Anhand der Abbildung 2-2 lässt sich erkennen, dass bei einzelnen verwendeten Netzen bis zu ein Drittel der Wege im Vergleich zum optimalen Netzanbieter fehlen (Minderstrecken). Dabei sind alle Wege berücksichtigt, die von Fußgängern und Radfahrern genutzt werden können. Die Diskrepanz zwischen Netzdicke im Datenmodell und in der Realität wird im Bereich des Fußgängeretzes sicher weitaus größer, im Bereich des Straßennetzes für den motorisierten Verkehr dagegen aller Voraussicht nach deutlich kleiner ausfallen.

Das Beispiel zeigt die Relevanz eines vollständigen Wegenetzes für die Zielgruppe „Radfahrer“, die hinsichtlich Art und Umfang des Netzes eher mit den Fußgängern als mit dem motorisierten Verkehr verglichen werden kann.

Die Netzabdeckung ist für die vorliegende Arbeit bedeutsam, da die Genauigkeit der Standortbestimmung sowie die Eignung möglicher Lösungsansätze von der verfügbaren Netzdichte abhängig sind.

Entwurf von Radwegen

Empfehlungen für die Gestaltung des Radverkehrsnetzes finden sich in entsprechenden nationalen Richtlinien und Regelwerken.

Die Empfehlungen für Radverkehrsanlagen (ERA)¹⁵, die als entwurfstechnisches Standardwerk für Radverkehrsanlagen gelten, weisen ausdrücklich auf die Umwegempfindlichkeit von Radfahrern hin und empfehlen die Einschränkung von Zeitverlusten. Für den Aufbau eines entsprechend dichten Radverkehrsnetzes wird eine Maschenweite von 500 bis 1.000 Metern im Hauptverbindungsnetz und von 200 bis 500 Metern für untergeordnete Verbindungen angegeben. Weiterhin werden geradlinige Netze beim Entwurf von Radverkehrsanlagen nahegelegt. Im Gegensatz zum ländlichen Bereich ist insbesondere in Stadtgebieten eine Bündelung räumlich nahe beieinander liegender Wege anzustreben, was zu einem flächendeckenden, alle Quellen und Ziele anbindenden Netz führt. Besonderes Augenmerk ist gemäß den ERA bei der Netzgestaltung auf einen hohen Komfort und einen geringen Fahrzeitwiderstand, daneben aber insbesondere auch auf geringe Verkehrsbelastung und Unfallhäufigkeit auf den Strecken zu richten.

Berücksichtigung in den ERA findet auch der Modal Split. Hinsichtlich der Verknüpfung mit anderen Verkehrsträgern wird die Einrichtung von Angeboten zur Fahrradmitnahme in öffentlichen Verkehrsmitteln, insbesondere zur Entlastung der Radfahrer an ausgeprägten Steigungsstrecken, angeregt¹⁶.

¹⁵ FGSV: ERA 1995.

¹⁶ Vgl. FGSV: ERA 1995.

2.1.2 Statische Zielführung

In der Regel orientieren sich Radfahrer nach ihrer persönlichen Ortskenntnis. Außerhalb der eigenen Stadt, also z. B. auf Urlaubsreisen, spielt dagegen die Wegweisung für Radfahrer eine besondere Rolle. Der Grund dafür ist die bereits genannte Umwegempfindlichkeit sowie die Vermeidung von Zeitverlusten an Knotenpunkten, die – wenngleich schwächer ausgeprägt als im berufsbedingten Radverkehr – auch auf radgenutzten Urlaubsfahrten relevant ist. Die ERA geben hierzu detaillierte Empfehlungen für die Einrichtung einer übersichtlichen, redundanten, auch ohne Vorbereitung leicht begreifbaren Wegweisung. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die Zuverlässigkeit und Fehlerfreiheit der Routenempfehlung zu richten. Eine Wegweisung für Fahrräder gilt allerdings nicht als amtliche Wegweisung, was oftmals eine Kontinuität der Beschilderung vermissen lässt. Die ERA gibt Hinweise für die Ausführung und die Materialgestaltung bei Planung und Aufbau eines Wegweisungssystems für Radfahrer. Bezüglich der technischen Regelungen wird auf die Richtlinien für wegweisende Beschilderung außerhalb von Autobahnen¹⁷ und die Straßenverkehrsordnung¹⁸ verwiesen.¹⁹

2.1.3 Dynamische Zielführung

Bei der dynamischen Zielführung wird die Abbiegeentscheidung im Bereich der Knotenpunkte durch entsprechende visuelle und / oder akustische Hinweise ersetzt. Voraussetzung für die dynamische Zielführung ist zunächst einmal die Ortung des eigenen Standortes mittels GPS (siehe hierzu Abschnitt 2.3.1). Außerdem müssen die Abbiegepunkte und die Netzknoten in das System eingepflegt sein. Die für die Abbiegehinweise erforderliche Routeninformation wird entweder mittels Routing vom System ermittelt oder über eine geplante Route

¹⁷ Vgl. FGSV: RWB 2000.

¹⁸ Bundesministerium der Justiz: StVO 2008.

¹⁹ Vgl. FGSV: ERA 1995.

vom Nutzer vorgegeben (siehe Abschnitt 2.3.4). Damit können über entsprechende Algorithmen Abbiegehinweise gegeben werden, sobald sich der Nutzer dem Knoten bis auf eine bestimmte Entfernung genähert hat (vgl. Abschnitt 2.3.4). Die Generierung der akustischen oder visuellen Hinweise kann

- beim Erreichen des Knotens auf dem Gerät,
- vorab anhand der ausgewählten Route oder
- vorab für jede mögliche Kombination aus Knoten und zuführender Kante ermittelt werden.

Bei sehr einfachen Systemen²⁰ können die Abbiegehinweise auch ausschließlich in Abhängigkeit von der zurückgelegten Wegstrecke – also ohne GPS-Unterstützung – bestimmt werden, was sich allerdings als ungenaue und unpraktikable Lösung erwiesen hat.

2.2 Ausgestaltung von Radtouren

Der Ablauf von Radtouren bei Einsatz eines Navigationssystems unterscheidet sich in vielen Punkten nicht relevant von der herkömmlichen Tourenplanung. Nach einer Differenzierung der Arten von Radtouren wird dargestellt, wie sich der Ablauf der Tourvorbereitung (Planung) und der Tourdurchführung (Fahrt) gestaltet und welche Kriterien hierbei Berücksichtigung finden.

2.2.1 Differenzierung von Radtouren

Im Hinblick auf die Gründe für das Zurücklegen von Wegen kann differenziert werden nach Wegen, die unmittelbar oder mittelbar beruflichen Zwecken dienen, also dem Weg zur oder von der Arbeitsstätte sowie Dienstgängen oder Dienstfahrten. Von größerem Interesse, weil die Wegebeziehungen sowohl räumlich als auch zeitlich heterogener ausfallen und der Fahrer im Bereich der

²⁰ Ein Beispiel dafür ist das Gerät „ProRoute“ der Firma Ixis.

befahrenen Strecken wenig Ortskenntnis aufweist, sind die Fahrten, die Radfahrer in ihrer Freizeit zurücklegen (vgl. auch Abschnitt 1.1). Eine entsprechende Differenzierung hinsichtlich der Funktionen von Radwegen arbeiten auch die RIN heraus. Sie unterscheiden in „Berufs-/Ausbildungs-/Wirtschafts- und zielgerichteten Freizeit-/Einkaufsverkehr“ auf der einen Seite sowie „touristischen Freizeitverkehr, wie etwa dem Radwandern“, auf der anderen Seite.²¹

Im Bereich der Freizeit treten verschiedene Wegezwecke auf: Neben Wegen, die zurückgelegt werden, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen, gibt es Wege, die nicht vordringlich zur Zielerreichung absolviert, sondern vielmehr um ihrer selbst willen zurückgelegt werden. Bei den erstgenannten Wegen handelt es sich quasi um Zweckwege, die in der Regel mit einem möglichst kurzen Zeitaufwand zurückgelegt werden sollen. Bei letzteren steht der Zeitbedarf dagegen nicht im Vordergrund, vielmehr geht es um die Umgebung des Weges. Es kann sich hierbei um Wege handeln, die im Rahmen von radgebundenen Freizeitaktivitäten selbst (Radsporttour eines Rennradvereins) oder in Verbindung mit sonstigen Freizeitaktivitäten (Radtour zum Freizeitpark, mehrtägige Radwandertour) zurückgelegt werden.

Die Anspruchskriterien von Radwanderern im Vorfeld einer Radtour und auch während einer Tour selbst sind vielfältig. Neben den Zielgebieten, der Tourlänge und der Tourart unterscheiden sich auch die Anforderungen an die Wegernetze, nicht zuletzt in Bezug auf den Schwierigkeitsgrad.

Radtouren lassen sich im Wesentlichen hinsichtlich ihrer Quell-Ziel-Beziehung nach vier Arten differenzieren:

- Hin-Tour (einfache Tour),
- Hin-Rück-Tour,
- Tagestour (Etappe) und
- Rundtour.

²¹ FGSV: RIN 2007, S. 27.

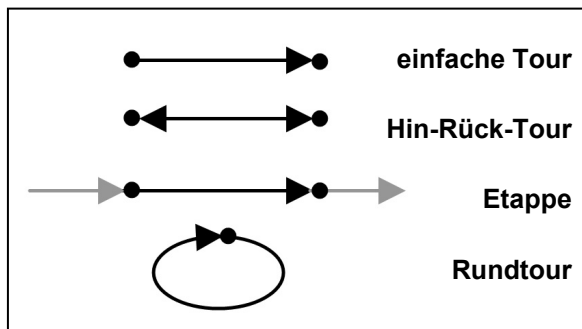


Abbildung 2-3: Tourarten

Eine Unterscheidung der verschiedenen Tourformen ist erforderlich, weil die Art der Tour von Relevanz für das Verhalten des Radwanderers bei unvorhergesehenen Störungen ist. Abweichungen vom geplanten Tourverlauf können beispielsweise oftmals bei Rundtouren und Hin-/Rücktouren kompensiert werden, während dies bei Etappen nicht möglich ist.

Die einfachen Touren werden in der Regel durch Verbindung mit einer ÖPNV-Komponente zu einer kombinierten Tour ergänzt; der Nutzer legt also einen Teil der Strecke mit dem Rad, einen weiteren Streckenteil mit dem ÖPNV (beispielsweise mit dem Schiff mit Beförderung des Fahrrads) zurück.

Bei der Hin-Rück-Tour wird dieselbe Strecke zweimal befahren. Hintergrund dafür ist i. d. R. eine fehlende alternative Parallelstrecke, wie z. B. entlang fließender Gewässer.

Eine Rundtour weist – wie die Hin-Rück-Tour – ebenfalls einen gemeinsamen Start- und Zielpunkt, aber einen Streckenverlauf mit nicht identischen Kanten auf.

Eine Etappe stellt eine einfache Tour als Bestandteil einer längeren Gesamttour dar. Diese ergibt sich als Abfolge mehrerer zeitlich und räumlich hintereinander liegender einfacher Touren, bei der Start- und Zielpunkt differenzieren oder zusammenfallen können.

Im Verlauf der weiteren Arbeit werden Rundtouren und einfache Touren – die allerdings als „Etappe“ bezeichnet werden, für die Untersuchungen zugrunde gelegt.

Die Streckenlänge der Radtouren variiert abhängig von den verschiedensten Parametern, wie z. B. der verfügbaren Zeit, dem Umfeld, der Leistungsfähigkeit usw. Zur Vorbereitung von Touren kann man auf klassische Weise in der Literatur oder im Internet fertig ausgearbeitete Touren mit Beschreibung beziehen. Außerdem ist es seit einiger Zeit möglich, sich über Radroutenplaner im Internet anhand diverser Kriterien Routen ermitteln und ausgeben zu lassen.

Eine Auswertung von insgesamt 89 Radtouren ergab hinsichtlich der Verteilung der Streckenlänge das folgende Bild:

	Radtour
Stichprobenumfang	89
Mittelwert	45,4 km
Standardabweichung	13,8 km
Minimum	7,0 km
Maximum	90,0 km

Tabelle 2-1: Auswertung der Verteilung von Radtour-Streckenlängen

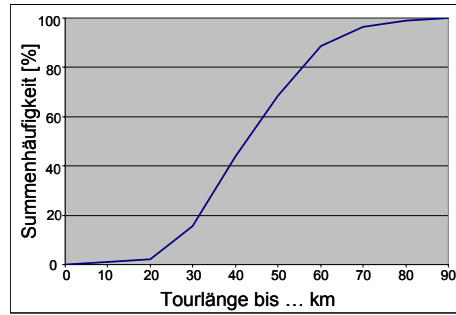


Abbildung 2-4: Vergleich von Tourlängen von 89 Fahrradtouren in Deutschland²²

Die Berücksichtigung dieser Kriterien macht zunächst einmal deutlich, dass innerhalb der Gruppe der Radwanderer zahlreiche Differenzierungen berücksichtigt werden müssen. Dies betrifft sowohl den Bereich der Tourvorbereitung als auch das Absolvieren der Tour selbst. Dennoch lassen sich bei genauerer Betrachtung viele Ansprüche herausstellen und in Befragungen auch manifestieren, die mehr oder weniger für alle Gruppen von Interesse sind.

Die Konzeptionierung von Radtouren lässt sich in drei Phasen untergliedern: die Vorbereitung der Fahrt, die Durchführung der Fahrt und die Nachbereitung der Fahrt. HOFFMANN und KEUL differenzieren die erste, vorbereitende Phase in die Teilphasen „Attention“ (passive Informationsbeschaffung), „Interest and Desire“ (aktive Informationsbeschaffung) sowie „Action“ (Reiseentscheidung).²³ Die Erfahrungen, die vom Nutzer in den Phasen der Vorbereitung und der Durchführung gemacht werden, sind grundlegend für die Attraktivität und den Erholungswert einer Tour. Treten an diesen Stellen Hindernisse auf, wird sich der Nutzer einem anderen Medium zur Informationsgewinnung oder sogar einer anderen Aktivität als der geplanten Radtour zuwenden.

²² Vgl. Naumann u. Göbel: Rad- und Wanderführer Deutschland.

²³ Hoffmann, T.; Keul, M.: Internetportale für den Fahrradtourismus. In: Monheim: Fahrradförderung mit System, S. 235.

In den beiden folgenden Abschnitten werden die beiden Phasen „Vorbereitung“ und „Durchführung“ hinsichtlich ihres Ablaufs und der möglichen Unterstützung durch ein Radfahreravigationssystem untersucht. Im Anschluss daran werden gesondert die Kriterien ausgewiesen, die Radfahrer bei der Wegewahl zugrunde legen.

2.2.2 Analyse der Planung einer Tour

Die Tourenplanung erfolgt abhängig von der Erfahrung des Nutzers, dem Umfang und dem Umfeld der geplanten Tour auf verschiedene Art und Weise: Zwar stellt die Karte nach wie vor die Basis der Tourenplanung dar, allerdings kann hinsichtlich des verwendeten Mediums unterschieden werden in die herkömmliche Tourenplanung mit gedruckter Karte sowie die digitale Planung mit entsprechender Software. Bei beiden Arten kann weiter differenziert werden nach

- der Auswahl aus vorhandenen Routenvorschlägen, z. B. in Radwanderführern^{24 25} oder auf Internetseiten²⁶ sowie
- der Erstellung eigener Touren.

Bei der Vorbereitung von Touren mittels gedruckter Medien ergeben sich für den Planer die folgenden Schwierigkeiten:

- Identifizierung geeigneten Kartenmaterials,
- Selektion geeigneter Wege innerhalb der Karte,
- Erstellung einer geeigneten Tour anhand bestimmter Anforderungskriterien,
- Speicherung bzw. Aufbereitung der Tour für die spätere Verwendung während der Fahrt.

²⁴ Kommunalverband Ruhrgebiet: Radtour (Mittleres Ruhrgebiet).

²⁵ Süsselbeck, E.: Mit dem Fahrrad durch das westliche Ruhrgebiet.

²⁶ Siehe z. B. <http://www.radrouten-nrw.de>.

Die Identifizierung einer geeigneten Karte gestaltet sich nicht immer leicht, weil für viele Gebiete keine oder nur nutzungs fremde Karten zur Verfügung stehen oder die Karten nicht aktuell sind.

Ist eine passende Kartengrundlage, zum Beispiel eine Wanderkarte auf der Grundlage der von den Landesvermessungsämtern herausgegebenen Amtlichen Topografischen Karten im Maßstab 1:25.000, gefunden, muss auf der Basis dieser Karte eine für den Nutzer geeignete Route gefunden werden, – was selbst bei Verwendung einer geeigneten Karte – z. B. mit Verzeichnis spezieller Wanderrouten – oft nur unter Zuhilfenahme entsprechender Freizeitführer erfolgen kann, in denen bereits fertige Touren²⁷ aufbereitet wurden.

Nach einer Befragung von HOFFMANN und KEUL gibt ein großer Teil der Nutzer an, im Internet nur „sehr wenige Informationen“ (29 %) zu finden bzw. im Internet gar nicht erst zu suchen (22 %). In ihrer Untersuchung zur Konzeption eines geeigneten Internetportals kritisieren sie insbesondere die mangelnde Verfügbarkeit überregionaler Internetportale für Radfahrer und das Fehlen geeigneter Elemente in bestehenden Portalen. Zu diesen Elementen zählen im Wesentlichen interaktive Karten, Fahrradrouten mit der zugehörigen Infrastruktur (Points of Interest, kurz: POIs) und Höhenprofile.²⁸ Eines der wenigen Internetportale, in dem digitalisierte Fahrradrouten eingestellt und heruntergeladen werden können, ist die private Seite „GPS-Routen“.²⁹ Auch in diesem Portal fehlen aber

²⁷ Wenngleich sich die Fachbegriffe „Tour“ und „Route“ inhaltlich voneinander unterscheiden, werden im Verlauf dieser Arbeit beide Begriffe synonym nebeneinander verwendet, wenn von einer festgelegten Abfolge von Kanten mit einem Anfangs- und einem Zielknoten zum Zwecke des Befahrens mit dem Fahrrad gesprochen wird.

²⁸ Hoffmann, T.; Keul, M.: Internetportale für den Fahrradtourismus. In: Monheim: Fahrradförderung mit System, S. 229-240.

²⁹ <http://www.gps-world.de>.

weitgehend die für eine zielgerichtete Suche bzw. Verwaltung von Radtouren entsprechenden Kriterien.

2.2.3 Analyse der Durchführung einer Tour

Die klassische Tourdurchführung erfolgt kartengestützt. Der (Rad-)Wanderer sieht sich infolgedessen unterwegs ständig der Situation ausgesetzt,

- seinen Standpunkt ermitteln zu müssen,
- diesen Standpunkt auf einer Karte referenzieren zu müssen,
- insbesondere an Wegabzweigungen die richtige Abbiegeentscheidung zu treffen,
- die die Tour begleitenden Sehenswürdigkeiten in einem separaten Schrift- bzw. Kartenwerk nachschlagen zu müssen.

Das durchschnittliche Geschwindigkeitsniveau von Radfahrern bewegt sich während der Fahrt bei etwa 12 bis 20 km/h, die ermittelten Reisegeschwindigkeiten liegen zum Teil deutlich niedriger. Die angenommenen Werte sind abhängig vom Wegezweck, dem eingesetzten Fahrradtyp und der Fitness des Aktiven. Als umgebungsabhängige Einflussvariablen sind insbesondere die Wind- und Wetterverhältnisse, die Längsneigungen der Streckenabschnitte, die Radwegbreite und die -oberfläche anzusehen.

Die Ansätze für die Optimierung der Radfahreravigation bzw. der Standortgenauigkeit betreffen insbesondere das Verhalten von Radfahrern im Bereich von Kreuzungen bzw. Knotenpunkten. Als Knotenpunkte sind diejenigen Elemente des Wegenetzes zu verstehen, bei denen sich für den Verkehrsteilnehmer die Notwendigkeit ergibt, eine Entscheidung bezüglich der Fortführung seines Weges zu treffen, bei dem also mindestens drei Wege – genauer: Netzkanten – aufeinander treffen.

Anforderungen an die Darstellung von Karten und deren Handhabbarkeit

Der Einsatz eines mobilen Navigationsgerätes soll die auf Papier gedruckten Karten und Wegbeschreibungen ersetzen. Es muss als unterste Anforderung die Funktionalitäten konventioneller Radwandertouren anbieten. Dies bedeutet, dass es vergleichbare, detailreiche Karten hoher Qualität liefern muss, in denen vor allem das Wegenetz vollständig abgebildet wird.

In den gedruckten Karten sind konventionell entweder Tourenvorschläge eingetragen (Abbildung 2-5) oder es wird das bezeichnete Radwegenetz mit örtlicher Wegweisung (Abbildung 2-6) hervorgehoben. Beide Arten von Informationen werden aus Gründen der Übersichtlichkeit meist nicht in derselben Karte dargestellt.

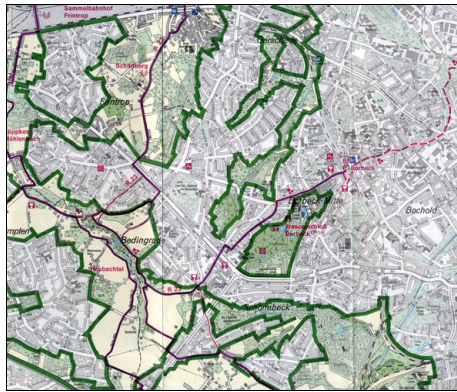


Abbildung 2-5: Beispiel für eine Karte mit Tourenvorschlag³⁰

³⁰ Kommunalverband Ruhrgebiet: Radtouren durch den Regionalen Grünzug E.

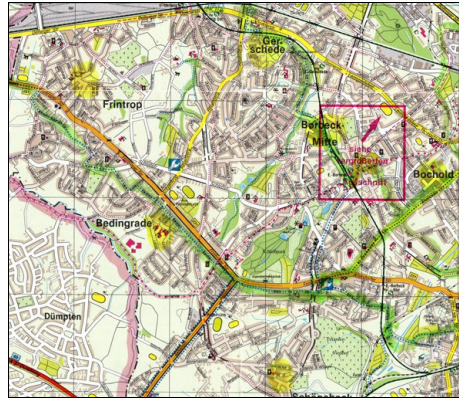


Abbildung 2-6: Beispiel für eine Karte mit Darstellung des mit Wegweisung versehenen Radwegenetzes³¹

Ein mobiles Navigationsgerät sollte möglichst beide Versionen, nämlich wahlweise das Radwegenetz auf einer Hintergrundkarte oder die vorgesehene Tour darstellen können.

Explizite Untersuchungen hinsichtlich der Ansprüche an die Tourengestaltung sind dem Autor nicht bekannt. Nach den durchgeführten Untersuchungen lassen sich aber drei unterschiedliche Nutzergruppen differenzieren:

Die eine Gruppe von Radwanderern möchte neben vorgeschlagenen Touren auch eigene Touren vor Antritt einer Fahrt definieren können. Sie erwartet, dass der Planungskomfort beim Einsatz eines Navigationsgeräts besser sein sollte als beim konventionellen Vorgehen.

Einer zweiten Gruppe reicht die Bereitstellung fertiger Touren aus. Diese sollten möglichst am heimischen PC ausgewählt und auf ein Radfahrernavigationssystem übertragen werden.

Die dritte Gruppe benötigt keine vorgefertigten Touren. Sie wählt die Routen spontan z. B. anhand der Karte aus.

³¹ Stadt Essen: Amtliche Fahrradkarte Essen.

Alle drei Gruppen erwarten vom Navigationsgerät, dass ihnen während der Tour die aktuelle Position auf einer Karte im Display des Geräts dargestellt wird. Diese Standortanzeige sollte möglichst genau und ständig verfügbar sein.

Um während der Fahrt nicht permanent auf die Karte schauen zu müssen, sind Abbiegehinweise von Bedeutung. Sie können prinzipiell akustisch oder visuell gegeben werden. Andere Lösungen (z. B. Vibrieren des Lenkers) sind in aktuellen Radfahrernavigationslösungen nicht vorhanden.

Ausrichtung der Karte auf dem Display

Von Relevanz ist die Fragestellung nach der Ausrichtung der Karte beim Einsatz von Navigationssystemen. Gängige Darstellungsformen sind

- Karte genordet und
- Karte in Fahrtrichtung.

Die meisten Navigationssysteme erlauben den Wechsel zwischen beiden Darstellungsarten.

Die Darstellung der genordeten Karte ist ohne rechentechnischen Mehraufwand umsetzbar. Der Nutzer kann sich auf die Position der Karte einstellen, die statisch abgebildet wird. Nachteilig ist die erschwerte Orientierung auf der Karte, insbesondere bei erforderlichen Abbiegevorgängen, wenn sie vom System nicht explizit dargestellt werden. Der Großteil der befragten Nutzer hat die Ausrichtung der Karte in Fahrtrichtung bevorzugt.

Für die Darstellung der Karte in Fahrtrichtung ist die ständige Neuberechnung der Kartendarstellung erforderlich. Besonders Organizer verfügen i. d. R. nicht über ausreichend Prozessor- und Speicherressourcen, um eine sich permanent ändernde Anzeige aufzubauen. Hinzu kommt, dass die sich in Abhängigkeit von der Fahrtrichtung ständig drehende Karte zu einer ungünstigen Ablesbarkeit führt. Da die eingesetzten Geräte die Fahrtrichtung ausschließlich über die infi-

minimale Differenzen der GPS-Positionen ermitteln, führt die Ungenauigkeit der GPS-Signale zu ständigen Winkeländerungen der Fahrtrichtung und demzufolge zu einem permanenten Neuaufbau der Darstellung auf dem Display.

Moderne Navigationssysteme arbeiten mittlerweile häufig mit einer so genannten – relativ rechenintensiven – $2^{1/2}$ D-Darstellung. Dabei wird der Blick in Fahrtrichtung von schräg oben auf die Position des Fahrzeugs geworfen. In Verbindung mit der Darstellung von Rasterkarten ist die Methodik wenig brauchbar, weil bei der für die perspektivische Darstellung notwendigen Skalierung der Rasterkarte Bildinformationen verloren gehen, Verzerrungen auftreten und die Berechnungen sehr prozessorintensiv sind. Die $2^{1/2}$ D-Darstellung wird daher nur in Verbindung mit den in der Kfz-Navigation verwendeten Vektorkarten eingesetzt.

2.2.4 Kriterien bei der Wegewahl

Die bestehenden Untersuchungen zu Ansprüchen von Radfahrern an das Wegenetz betreffen i. d. R. den Radverkehr innerhalb von Städten.³² Dies liegt zum einen daran, dass die Ansprüche im Stadtbereich größer sind als in ländlichen Räumen, da in der Stadt erfahrungsgemäß der Anteil der Freizeitfahrten geringer ist als im schwächer besiedelten Umfeld, zum anderen aber auch daran, dass eine Konfliktfreiheit von Radwegen in Städten nur selten gewährleistet werden kann. Konflikte resultieren aus dem städtebaulichen Umfeld, also dem knappen Platzbedarf für die verschiedensten Nutzungen, aber auch aus dem Nebeneinander der verschiedenen Verkehrsträger. Da einerseits keine konkreten Untersuchungen zu Anspruchskriterien der Wegewahl in ländlichen Räumen bestehen, und andererseits zu erwarten ist, dass die Aspekte der Wegewahl in Städten ebenso auf ländliche Räume – wenn auch nicht unbedingt in derselben Gewichtung – übertragbar sind, werden zunächst einmal die Kriterien

³² Vgl. Hagemeister, C.; Schmidt, A.: Wie wichtig sind welche Kriterien für die Routenwahl von Alltagsradfahrern?

der Radfahrer im Stadtbereich untersucht, bevor ihre Übertragbarkeit auf Radtouren im ländlichen Raum geprüft wird.

Bei Befragungen von Radfahrern in der Stadt ermittelten HAGEMEISTER und SCHMIDT eine Reihe von Kriterien, die einen Anreiz für die Nutzung von Fahrrädern anstatt des Pkws oder des ÖPNV darstellen.³³ Diese teilen sich auf in

- die unmittelbar dem Verkehrsträger zuzuschreibenden Eigenschaften,
- Kriterien des Verkehrsnetzes und
- umfeldabhängige Kriterien,

wobei letztere in verhaltensbezogene und sachbezogene Eigenschaften untergliedert werden können. Die unmittelbar dem Verkehrsträger zuzuordnenden Eigenschaften lassen sich im Wesentlichen unterscheiden in die Punkte Radwegbreite, Belag, Führung, Art, Markierung; die Elemente des Netzes in Verbindungen, Umwegigkeit, Anzahl und Wartezeiten an Lichtsignalanlagen. Nicht explizit erwähnt wird von HAGEMEISTER und SCHMIDT die Längsneigung, also insbesondere die Steigung, die Radfahrer zu überwinden haben. Diese ist nicht nur innerhalb von Städten ein bedeutsames Wegewahlkriterium, sondern insbesondere bei der Routenplanung in ländlichen Bereichen. Indirekt wird dieses Argument bei HAGEMEISTER und SCHMIDT aber über die Anforderung, „das Befahren der Route strengt körperlich an“³⁴ erfasst. Daneben wird noch das Kriterium der Seitenwindempfindlichkeit angeführt.

Zu den verhaltensbezogenen Kriterien des Umfeldes lassen sich Erkennbarkeit durch andere, Verhalten anderer Personen (Überholweiten usw.) zählen, zu den entsprechenden nicht-verhaltensbezogenen Punkten Infrastruktur (Beleuchtung), Windgeschütztheit, Umgebungslautstärke usw. Die einzelnen Krite-

³³ Vgl. Hagemeister, C.; Schmidt, A.: Wie wichtig sind welche Kriterien für die Routenwahl von Alltagsradfahrern?

³⁴ Hagemeister, C.; Schmidt, A.: Wie wichtig sind welche Kriterien für die Routenwahl von Alltagsradfahrern?, S. 318.

rien sind in der nachfolgenden Tabelle nach der vorgenommenen Klassifizierung aufgeführt:

Verkehrsträger	Verkehrsnetz	Umfeld, verhaltensbezogen	Umfeld, sachbezogen
++ Fahrbahnelag	+ getrennte Führung Radfahrer /Fußgänger	++ Verkehrsdichte, Kraftfahrzeuge	++ Windgeschütztheit
++ Radwegbreite	keine Umwege	++ Geschwindigkeit Kraftfahrzeuge	+ Umfeldlautstärke
+ direkte Radverkehrs führung	direkte Verbindung	+ Nichtbeachtung durch andere Verkehrsteilnehmer	Sichtbarkeit
abgesenkte Bordsteine	geringe Wartezeit an LSA	+ Überholabstand Kraftfahrzeuge	Sicht an Kreuzungen
Hindernisfreiheit	vorhandene Infrastruktur	soziale Sicherheit	separater Radweg
Markierungen		Beleuchtung	
		Verkehrsdichte, Radfahrer	

++/+ : Kriterium von sehr hoher/hocher Relevanz für das Wegewahlverhalten in ländlichen Bereichen (eigene Bewertung)

Tabelle 2-2: Anspruchskriterien von Radfahrern im Stadtbereich³⁵

Fraglich ist in diesem Zusammenhang zunächst einmal die Relevanz der einzelnen Kriterien für das Verkehrsmittelwahlverhalten bzw. die Attraktivität von Radwegen im ländlichen Raum für Freizeitradfahrer. Prinzipiell sind alle Aspekte auch im ländlichen Raum vorstellbar, wenngleich auch unterschiedlich stark ausgeprägt.

Die in der vorstehenden Tabelle mit „++“ bzw. „+“ versehenen Kriterien erscheinen nach einer ersten Analyse als sehr relevant bzw. relevant für das unter-

³⁵ Angelehnt an Hagemeyer, C.; Schmidt, A.: Wie wichtig sind welche Kriterien für die Routenwahl von Alltagsradfahrern?

suchte Wegewahlverhalten in ländlichen Bereichen. Eine solche Analyse ist aus der Nutzerbefragung zur Entwicklung des MobiGuide^{36 37}, aus Expertengesprächen³⁸ und nach eigener Einschätzung vorgenommen worden.

Darüber hinaus gibt es aber offensichtlich weitere Kriterien, die im Rahmen der bisherigen Untersuchungen nicht herausgestellt worden sind, die aber von besonderer Relevanz für das Wegewahlverhalten von Freizeitradfahrern sind. Hierzu zählen insbesondere die bereits genannten Steigungsverhältnisse des Weges, und zwar differenziert nach maximal vorhandener Steigung bzw. Gefälle sowie durchschnittlicher Steigung und Gefälle. Nennenswert ist vor allem auch die Attraktivität des Umfeldes. Dazu zählen die Vielfalt der Umgebung hinsichtlich Pflanzen- und Tierreichtum, Aussicht, Sehenswürdigkeiten usw., oder aber der Abwechslungsreichtum des Wegeverlaufes (Kurvigkeit, Topografie, etc.). Eine Vielzahl dieser Kriterien wird sicherlich durch die Ausweisung spezieller (Rad-)Wanderwege abgedeckt, so dass auch die explizite Beschilderung eines Weges als Kriterium angesehen werden muss.

Die RIN führen als Gestaltungsvorgabe für Radwege der Kategorien AR (vgl. Abschnitt 2.1.1) die Erreichbarkeit von Naherholungsgebieten, die landschaftliche Schönheit des Umfeldes, die Verbindung von freizeitbezogenen Attraktivitätsschwerpunkten und eine möglichst geringe Belästigung durch den übrigen Verkehr an.³⁹ Darüber hinaus wird empfohlen, auf lange, steigungsreiche Abschnitte zu verzichten.

³⁶ Der MobiGuide ist ein im Verbundprojekt ArMont entwickelter, auf einem PDA basierender Prototyp eines Radfahernavigationssystems.

³⁷ Schönharting, J.; Tetzner, S.; Brandt, T.: Schlussbericht zum Verbundprojekt ArMont. Teil B: Konzept MobiGuide, S. 5 ff.

³⁸ Schönharting, J.; Tetzner, S.; Brandt, T.: Schlussbericht zum Verbundprojekt ArMont. Teil B: Konzept MobiGuide, S. 7 ff.

³⁹ FGSV: RIN 2007, S. 53.

Für die Bewertung von Netzabschnitten führt ROSINAK⁴⁰ für die verschiedenen Streckentypen Bewertungsfaktoren ein. Demnach wird ein getrennt trassierter Radweg bei der Widerstandsberechnung gemäß dem Gravitationsansatz⁴¹ nicht abgemindert, während zum Beispiel Radstreifen durch den Faktor 0,6 abgemindert werden. Eine vergleichende Bewertung für die Attraktivität von Radverkehrsanlagen wird von ihm auch hinsichtlich der Lärmimmission der Netzkanten vorgenommen: Tagsüber mit weniger als 50 dB (A) belastete Strecken gelten als attraktiv und werden nicht abgemindert, während Strecken, die Lärmimmissionsquellen lauter als 75 dB (A) aufweisen, mit dem Faktor 0,2 abgemindert werden.

Die Bedeutung der Streckenlängsneigung für die Attraktivität einer Strecke im Radverkehr gibt das nachfolgende Diagramm wieder. Demnach sinkt das Geschwindigkeitsband in der Ebene von 16 bis 30 km/h – abhängig vom Fahrradtyp – bereits bei einer zweiprozentigen Steigung auf neun bis 20 km/h ab. Dagegen ist bei Strecken mit einem Gefälle ab etwa einem halben Prozent eine Kraftanstrengung durch Rollenlassen vermeidbar, so dass im Extremfall Geschwindigkeiten von 50 km/h und mehr (über 12 % Gefälle) erreicht werden können.

⁴⁰ Rosinak, W.: Ein Bewertungsverfahren für Radwegenetze, S. 307.

⁴¹ Wermuth, M.: Verfahrensschritte der Verkehrsplanung, S. 179.

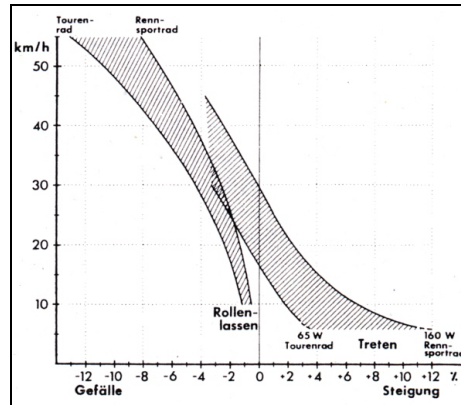


Abbildung 2-7: Fahrgeschwindigkeit von Radfahrern bei verschiedenen Längsneigungen⁴²

Die Erkenntnis der für Radfahrer relevanten Streckenattribute alleine reicht aber nicht aus, um diesen von Nutzen zu sein. Erforderlich ist der Einbezug der entsprechenden Daten in das passende Kartenmaterial bzw. in die entsprechenden digitalen Karten auf Servern oder digitalen Endgeräten. Um ein solches Grafisches Informationssystem (GIS) installieren zu können, sind Aufbau und Pflege einer entsprechenden Datenbank erforderlich.

Ergebnisse der eigenen Nutzerbefragung

Aufgrund der besonderen Bedeutung der Anspruchskriterien von Radfahrern an die Wegewahl wurden in einer nicht repräsentativen Befragung 42 Probanden die Frage nach ihrer Einschätzung von relevanten Faktoren der Wegewahl gestellt.⁴³

⁴² Alrutz, F., Krause, J.: Dokumentation zur Sicherung des Fahrradverkehrs, S. 27.

⁴³ Die Befragung ist nicht als repräsentativ anzusehen. Es wurden 26 männliche und 16 weibliche Probanden mit einem Durchschnittsalter von 36,9 Jahren mit Hilfe eines Fragebogens befragt.

Es wurden Streckenattribute, die in der Literatur als bedeutsam für die Wegewahl im Stadtverkehr herausgearbeitet wurden, um eigene als für relevant erachtete Attribute ergänzt und die Nutzer gebeten, die für sie wesentlichen Eigenschaften nach Wichtigkeit zu ordnen. Mit Streckenattributen werden dabei die Kriterien, die die einzelnen Wegabschnitte bzw. den Routenverlauf charakterisieren, bezeichnet. Die Art der gewünschten Streckenattribute ist neben der Routenwahl auch von Bedeutung für die Auswahl des Kartenmaterials (siehe Abschnitt 2.3.5).

Allen Befragten war ein Weg durch reizvolle Natur wichtig. Die Möglichkeit, verkehrsarme Wege befahren zu können, stand bei den Auswahlkriterien an zweiter Stelle. Alle genannten Kriterien in der Reihenfolge ihrer Bedeutung sind in Tabelle 2-3 dargestellt.

1. reizvolle Natur
2. verkehrsarme Strecke
3. Tour reich an POIs/Ausflugsziele
4. beschilderte Strecke
5. steigungsarmer Streckenverlauf
6. Barrierefreiheit (Treppen u. ä.)
7. keine Fußgänger
8. komfortable Oberfläche
9. Schattigkeit
10. breite Wege
11. wegekürzest
12. steigungskürzest

Tabelle 2-3: Beurteilung der Relevanz von Streckenattributen durch die Nutzer

Die Anforderungen an steigungs- und wegekürzeste Strecken, die im Alltags- bzw. Berufsverkehr an vorderster Stelle stehen würden, sind im Freizeit- bzw.

Urlaubsverkehr nur von nachgeordneter Bedeutung. Dagegen zeigt der Wunsch nach einem steigungsarmen Streckenverlauf und komfortabler Oberfläche den Handlungsbedarf für das Angebot entsprechender vorgefertigter Routen oder Routenplaner für diesen Bereich. Bei nahezu allen Routenplanern sind die Kriterien „kürzeste Strecke“ und „schnellste Strecke“, die für den Weg zur Arbeit von Relevanz sind, die einzigen Optimierungsparameter. Ein Routing nach für Radfahrer so wichtigen Kriterien wie Oberfläche oder Steigungsminimierung ist dagegen nicht oder nur selten verfügbar. Der Grund dafür liegt zunächst einmal an dem nicht vorhandenen Datenmaterial.

Die Einschätzung der relevanten Streckenattribute ist u. a. abhängig vom befragten Typus des Radfahrers. Eine entsprechende Einteilung soll aber an dieser Stelle nicht vorgenommen werden; nach Kenntnis des Autors existiert eine einheitliche Typologie auch nicht. Für die vorliegende Arbeit liegt der Fokus auf den Fahrten von Freizeitradfahrern, da dieser Gruppe die zurückgelegte Wegstrecke zumeist nicht bekannt ist und die Priorität nicht auf der schnellen Zielerreichung, sondern dem Erholungscharakter liegt.

Durchweg alle Nutzer sprechen sich für beschilderte Strecken aus. Der Wunsch nach einer beschilderten Strecke spiegelt sich auch in den Antworten auf die Frage wider, wie oft die Befragten sich in der Vergangenheit während einer Tour verfahren hatten (siehe Abbildung 2-8).

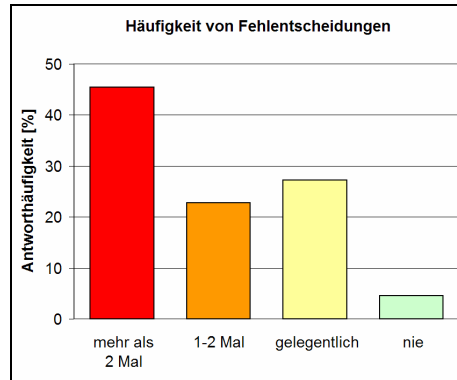


Abbildung 2-8: Häufigkeiten von Fehlentscheidungen bei der Tour⁴⁴

Fast jeder zweite antwortete mit „mehr als 2 Mal“, nahezu jeder vierte noch „1-2 Mal“. Die Gründe für das Verfehlen des korrekten Weges waren vielfältig; am häufigsten genannt wurde eine veraltete Karte, gefolgt von „keine Karte vorhanden“ und „Standort nicht gefunden“. Die Aussagen zeigen, von welcher Bedeutung eine mobile Radfahrernavigation ist, aber auch, welcher Wert auf die regelmäßige Datenpflege zu legen ist, um dem Nutzer ein aktuelles, fehlerfreies Netz anbieten zu können.

2.3 Einsatz von Navigationslösungen bei Radtouren

Eine moderne und in gewissen Bereichen komfortablere Art der Routenplanung ist der Einsatz einer Telematiklösung bzw. eines Navigationssystems. Zur genaueren Einschätzung der Leistungsfähigkeit entsprechender Systeme sind zunächst einmal die Begriffe „Navigation“ bzw. „Telematik“ zu bestimmen:

Die Navigation (von lat. navigare; deutsch: segeln, steuern) besteht aus drei Komponenten

⁴⁴ Statistische Kennwerte siehe Fußnote 43.

- Positionsbestimmung,
- Wegberechnung zum Ziel und
- Führung zum Ziel unter Ermittlung eines optimalen Weges.

Verkehrstelematik definieren LECHNER und BAUMANN als „Erfassung, Übermittlung und Auswertung von verkehrsbezogenen Daten“⁴⁵. In der Praxis ist mit den fortschreitenden technischen Möglichkeiten auf dem Gebiet der Verkehrstelematik eine Vielzahl von Anwendungen entstanden, die Verkehrsteilnehmer während der eigentlichen Fahrt, teilweise aber auch im Vor- oder Nachlauf dazu unterstützen sollen.

Mit dem Einsatz von Zielführungsgeräten wird das Bedürfnis von Radfahrern nach

- einer schnellen Bestimmung des eigenen Standortes,
- dem Angebot von vorgefertigten Radtouren,
- einer Zielführung in Form von Abbiegehinweisen an Knotenpunkten,
- der Ermittlung eines optimalen Fahrtverlaufs von einem Start- oder Standpunkt zu einem Zielpunkt,
- Informationen über das Standortumfeld,
- einer besonderen Form des Radwanderns und der Abgrenzung von herkömmlichen Radtouren durch den Einsatz moderner Technologien

befriedigt. Die untersuchten Systeme, die Funktionsweise von GPS-Empfängern und die Funktionalitäten von Navigationsgeräten werden im Folgenden vorgestellt.

⁴⁵ Lechner, W.; Baumann, S.: Grundlagen der Verkehrstelematik, S. 1.

Analyse der angebotenen Systeme

Die auf dem Markt vorzufindenden Navigationssysteme für Radfahrer zeichnen sich im Wesentlichen durch eine Fokussierung auf einige wenige Schwerpunkte, wie z. B. die Robustheit des Gehäuses für den Outdoor-Einsatz oder eine – nicht unbedingt praxisgerechte – Trackback-Funktion⁴⁶, aus. Eine auf die Einsatzbereiche und Ziele von Radfahrern abgestimmte Lösung wurde aus den eingangs erwähnten Gründen bislang nicht angeboten.

Im Verlauf des vorliegenden Abschnitts sind

- Systeme für die pretrip-Navigation und
 - Anwendungen für die ontrip-Navigation
- untersucht worden.

Bei den **pretrip-Navigtionen** kann differenziert werden zwischen

- internetbasierten Dienstleistungen und
- stationären Anwendungen.

Internetbasierte Tools stellen Webanwendungen dar, die interaktiv über eine Webseite bedient werden können. Stationäre Lösungen werden in der Regel auf einem Datenträger (DVD, CD, Diskette) erworben und auf dem heimischen PC installiert.

Im Folgenden wird der Fokus ausschließlich auf die Anwendungen im World Wide Web gerichtet, weil diese gegenüber den auf dem Heim-PC installierten Programmen die Unterstützung ontrip – also während einer Tour – zum Beispiel mittels UMTS oder GPRS zumindest potenziell ermöglichen, während bei den PC-Anwendungen – sofern diese nicht auf einem mitgeführten Laptop ausgeführt werden – die Auswahl auf die Tourenvorbereitung beschränkt bleibt. Eine

⁴⁶ Eine Trackback-Funktion (engl. to track back: zurückverfolgen) erlaubt dem Nutzer, seine zurückgelegte Strecke zu protokollieren, um so später denselben Weg für den Rückweg zu nutzen.

Verknüpfung zwischen den beiden Elementen Internetportal (Server) und PC-Anwendung (Client) ist in den wenigsten Fällen zu finden, ein aufeinander abgestimmtes, einheitliches Konzept existiert nicht.

Im Bereich der **ontrip-Navigtionen** lassen sich die Systeme über die Systemeigenschaft „Systemmobilität“ in zwei nutzerbezogene Klassen unterteilen: Ein stationäres System zeichnet sich dadurch aus, dass es fest im Fahrzeug bzw. am Fahrrad montiert ist und nicht anderweitig eingesetzt werden kann. Ein mobiles System kann dagegen vielseitig und zum Teil fahrzeugübergreifend, teils auch verkehrsträgerübergreifend genutzt werden.

Es wurden eine Vielzahl von Navigationsgeräten untersucht, die für den Einsatz im Fahrradbereich auf dem Markt angeboten werden. Dabei handelt es sich um GPS-Empfänger für verschiedene Nutzergruppen, die auf diversen Systemen (PC, PDA) oder eigenständig eingesetzt werden. Die entsprechenden Funktionalitäten und Systemeigenschaften dieser Lösungen wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit berücksichtigt.

Die Analyse des Funktions- und Leistungsumfangs von Geräten letzter Bauart (z. B. Medion GoPal 470⁴⁷ oder die Serie Garmin GPSMap 76⁴⁸) bzw. von Anwendungen und Portalen neuesten Standes (z. B. eine Seite mit Touren speziell für Mountainbiker⁴⁹ oder der Radroutenplaner des Landes Nordrhein-Westfalen⁵⁰) ergab, dass die speziell für Radfahrer erforderlichen Funktionen nach wie vor nicht integriert sind. Die wesentlichen Aspekte, durch die sich moderne Navigationsgeräte gegenüber den in der Marktanalyse betrachteten unterscheiden, sind:

- schnellerer Prozessor bzw. schnellerer Seitenzugriff und -aufbau,

⁴⁷ <http://www.medion.de>.

⁴⁸ <http://www.garmin.de>.

⁴⁹ <http://www.mountainbike-gps.de>.

⁵⁰ <http://www.radrouten.nrw.de>.

- höherer Speicherplatz, insbesondere durch Speichermedien mit größerer Kapazität,
- verbesserte Grafik, z. B. 2¹/₂D-Grafiken.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die wesentlichen Elemente von Navigationssystemen dargestellt.

2.3.1 Funktionsweise der Satellitennavigation

Zu den Komponenten eines Navigationsgerätes zählen der Satellitenempfänger, die Stromversorgung, sowie das Gehäuse mit Display, Eingabebereich und Befestigungsmöglichkeit.

Für die Navigation von bewegten Objekten, wie Fahrzeugen oder Personen, ist eine ständige Neubestimmung der aktuellen Position erforderlich. Der Empfang erfolgt über die Auswertung von Satellitensignalen von bis zu 28 GPS-Satelliten, die in einer Höhe von 20.000 km über der Erde positioniert sind. Die Satelliten sind nicht geostationär ausgerichtet; durch die Anordnung der Satelliten zueinander ist aber der ständige Empfang von vier Satellitensignalen gewährleistet (siehe Abbildung 2-9).

Die Satelliten sind mit je zwei leistungsstarken Sendern ausgestattet, zwei Cäsium-Atomuhren und zwei Rubidium-Atomuhren. Der durch die Brechung der Funksignale an der Ionosphäre auftretende Fehler wird durch Ausstrahlung von Signalen auf unterschiedlichen Frequenzen ausgeglichen. Messfehler werden durch den Einsatz mehrerer Uhren verringert.

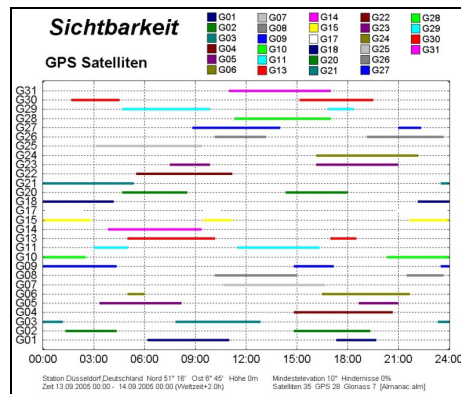


Abbildung 2-9: Anzahl der sichtbaren Satelliten am 10.11.2005 an der Station Düsseldorf⁵¹

Die Satelliten senden auf zwei Frequenzen (L1 = 1575,42 MHz und L2 = 1227,60 MHz) Informationen über ihre Identifikation, Status, Entfernungsdaten, Zeitdaten und Korrekturen ihrer Ephemeridendaten.⁵² Die über die L1-Frequenz übertragenen Daten können von jedem herkömmlichen GPS-Empfänger genutzt werden. Zur Berechnung der eigenen Position wird die Laufzeit des Signals vom Satelliten zum Empfänger gemessen. Aus dieser Laufzeit ergibt sich die Entfernung zum Satelliten.

⁵¹ Trimble Planning 2.7, Trimble Navigation Limited, 2001-2002.

⁵² Schrat, M.: Umgebungserfassung auf Basis lernender Digitaler Karten zur vorausschauenden Konditionierung von Fahrerassistenzsystemen.

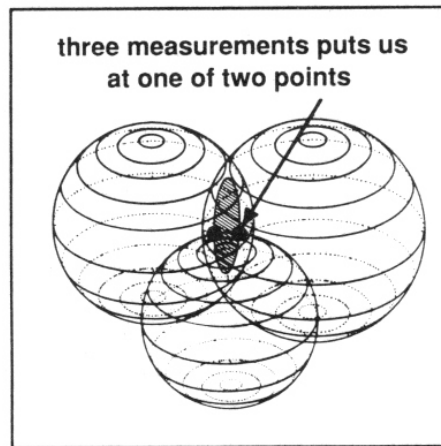


Abbildung 2-10: Prinzip der Positionsbestimmung mit GPS, 3-dimensionale Darstellung⁵³

Für die Bestimmung der Position mit einem GPS-Empfänger sind die Signale von mindestens drei Satelliten erforderlich (siehe Abbildung 2-10). Prinzipiell ist mit den Signalen von drei Satelliten auch die Höhe, also die z-Koordinate des Standortes ermittelbar (siehe auch Abschnitt 5.3).

NMEA-0183-Standard

Für die Protokollierung der GPS-Daten wurde von der National Marine Electronics Association (NMEA; dt.: Nationale Vereinigung für Marineelektronik) der Standard NMEA-1083 definiert. Mit Hilfe dieses Protokolls wurde ein einheitlich festgelegter Datenaustausch zwischen verschiedenen Geräten der Marineelektronik ermöglicht. Dieser Standard wird mittlerweile von fast allen GPS-Geräten bzw. Navigations- und Kartenprogrammen unterstützt. In der Regel kommunizieren auch GPS-Mäuse (GPS-Empfänger ohne Display, die mit PCs oder PDAs verbunden werden) via NMEA-Standard mit den Peripheriegeräten. Die

⁵³ Hurn, J.: GPS – A Guide to the Next Utility, S. 37.

NMEA-Protokolle sind im ASCII-Format (American Standard Code for Information Interchange) aufgebaut.

2.3.2 Kartenbezugssysteme

Für die Auswertung der von den GPS-Geräten übermittelten Daten ist eine korrekte Zuordnung der Daten zum verwendeten Kartenbezugssystem vorzunehmen. Die übermittelten Rohdaten werden im World Geodetic System 84 (WGS 84)-Format ausgegeben. Dagegen findet für die interne Nutzung der Daten im Navigationsgerät i. d. R. das Gauß-Krüger-Format Anwendung. Während die Notierung beim WGS 84-Format in Winkeln angegeben wird, verwendet das Gauß-Krüger-Format (ein rechtwinkliges Koordinatensystem, das durch Projektion der Kugelkoordinaten auf eine Ebene entstanden ist) als Einheit quasi Meter. Damit ist die unmittelbare Berechnung von Entfernungen möglich. Voraussetzung für die Projektion der Erdoberfläche auf eine Ebene ist, dass die Entfernungen klein genug sind, damit die Erdkrümmung vernachlässigt werden kann.

Für die Beschreibung der Erde als Ellipsoid (an den Polen abgeflachte Kugel) werden elliptische Modelle der Erde verwendet. Darin wird ein Ellipsoid über einen äquatorialen und einen polaren Radius definiert, die Erde also über den äquatorialen Radius (Hauptachse) und den polaren Radius (Nebenachse) aufgespannt. Damit ist eine Beschreibung der Erdoberfläche (bezogen auf eine geglättete Meeresoberfläche) bis auf hundert Meter Genauigkeit möglich. Durch Erweiterung des Ellipsoids um die tatsächliche Erdoberfläche erhält man ein Geoid (aus dem Griechischen, deutsch: erdförmig).

Das WGS 84, bei dem es sich um ein solches Geoid handelt, definiert Höhen für jeden Punkt der Erde. Durch Interpolation aus einem Geoidhöhenetz lässt sich für jede Position aus den nächstgelegenen Netzpunkten die Geoidhöhe berechnen. Damit können auch die im Speicherplatz begrenzten Navigationsgeräte relativ exakte Abbilder des Geoids erzeugen.

Grids

Da innerhalb der untersuchten Anwendungen mit Kartendaten bzw. Kartennetzen gearbeitet wird, wird im Folgenden auf Kartennetze im Allgemeinen und auf das deutsche Kartennetz „Gauß-Krüger-Netz“ im Besonderen eingegangen.

„Grids“ bzw. „Kartennetze“ stellen eine gegenüber dem Kartendatum alternative Schreibweise für die Längen- und Breitengrade einer Position auf der Erde dar. Ihre Verwendung bietet den Vorteil, dass für die gesamte Karte – im Gegensatz zur Nutzung von Koordinatensystemen – ein einheitlicher Maßstab Verwendung findet. Um Grids zu erzeugen, ist eine geeignete Projektion – beispielsweise die Mercatorprojektion⁵⁴ – anzuwenden, um die sich infolge der Krümmung der Erdoberfläche ergebenden Verzerrungen auszugleichen.

Die bei der Verwendung von Grids auftretenden rechtwinkligen Gitter erleichtern das Ausmessen und Eintragen von Positionen sowie das Bestimmen von Abständen auf der Karte. Eine solche Projektion kann allerdings nur für kleine Gebiete hinreichend genau vorgenommen werden, während die Verzerrung für größere Gebiete bei einer einfachen transversalen Mercatorprojektion zu groß wird. Um dieses Problem zu umgehen, wird der darzustellende Bereich in mehrere kleine Gebiete unterteilt.

German Grid (Gauß-Krüger-Netz)

Ein Beispiel für ein lokales Gitternetz ist das auf das Gauß-Krüger-Netz projizierte Gebiet von Deutschland: Die amtlichen topografischen Karten basieren auf einer vom Bessel-Ellipsoid ausgehenden Mercatorprojektion. Diese wird auf fünf etwa 200 km breite Streifen von jeweils 3° projiziert (siehe Abbildung 2-11).⁵⁵ Die sich ergebenden Koordinaten sind metrisch und werden als Rechts-

⁵⁴ Bei der Mercatorprojektion wird die Erdoberfläche quasi winkelgetreu auf einen über die Erde gestülpten Zylinder projiziert.

⁵⁵ Vgl. <http://www.kowoma.de/gps/Fehlerquellen.htm>.

wert (x-Koordinate) und als Hochwert (y-Koordinate) notiert. Der Hochwert stellt den nördlichen Abstand vom Äquator dar. Mit dem Rechtswert wird ein um 500.000 km gegenüber dem tatsächlichen Ost-West-Abstand vergrößerter Wert (um negative Werte zu vermeiden), dem der durch 3 dividierte Längengrad (entspricht der Streifennummer) vorangestellt wird, bezeichnet. Damit ergeben sich 6-stellige Werte für den Rechts- und 7-stellige Werte für den Hochwert, mit denen sich jede Position in Deutschland eindeutig darstellen lässt.

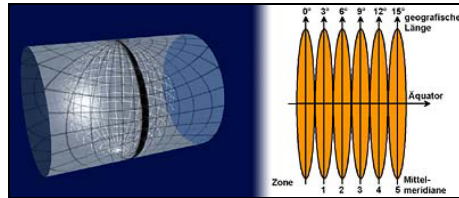


Abbildung 2-11: UTM-Grid, Projektion für das Gauß-Krüger oder German-Grid System⁵⁶

Bei allen Berechnungen, bei denen auf Koordinaten zurückgegriffen wurde, sind Gauß-Krüger-Koordinaten verwendet worden. Damit entfällt eine aufwendige Umrechnung und zusätzliche Rundungs- bzw. Umrechnungsfehler werden vermieden.

UTM-Grid

Abschließend wird die Darstellung der Gitter um das UTM-Grid ergänzt. Das UTM-Grid ist im Gegensatz zum Gauß-Krüger-Grid – mit Ausnahme der Polregionen – weltweit nutzbar und ebenfalls in Zonen unterteilt. Auf die rechtwinkligen Zonen wird ein rechtwinkliges Koordinatensystem projiziert. Die Zonen weisen horizontale Abstände von 6° auf. Damit entstehen 60 Streifen (Zonen) in vertikalen Abständen von jeweils 8° , die von 84° Nord bis 80° Süd reichen.

⁵⁶ <http://www.kowoma.de/gps/geo/Grids.htm>.

Den Zonen werden Kombinationen aus einer Zahl und einem Buchstaben zugewiesen. In horizontaler Richtung bildet der Nullmeridian (Greenwich) die Grenze zwischen der Zone 30 und 31. Die vertikalen Zonen (Nord-Süd-Richtung) werden mit Buchstaben nummeriert.

Das UTM-Grid verwendet nicht wie das Gauß-Krüger-Grid das Bessel-Ellipsoid, sondern das WGS84-Ellipsoid.⁵⁷

2.3.3 Routing

Das Routing, auch Routensuche oder Shortest-Path-Problem, bezeichnet die Suche eines optimalen Weges zwischen zwei Punkten in einem dem System bekannten Wegenetz, einem Graphen. Ein Graph ist vereinfacht eine Menge miteinander verbundener Knoten und Kanten. Sind die Kanten richtungsgebunden, also gerichtet, spricht man von einem Digraphen^{58 59}.

Das Routing wird üblicherweise vom Nutzer bei Fahrtbeginn angestoßen, indem dem System der Zielpunkt mitgeteilt wird und der aktuelle Standpunkt als Startpunkt interpretiert wird. Die Berechnung einer Route erfolgt mittels geeigneter Algorithmen auf einem bekannten Netz durch eine Bestwugsuche. Den einzelnen Kanten sind Kantenattribute zugeordnet, wie z. B. Anfangs- und Endknoten, Streckentyp und -länge, Steigung bzw. Gefälle. Diese Attribute können als Kantenwiderstände verstanden werden.⁶⁰ Sind die Kanten eines Graphen mit Widerständen belegt, spricht man von einem bewerteten Graphen. Im Bereich des Kfz-Routings gehen als Widerstände üblicherweise Streckenlängen ein, aus denen in Verbindung mit Verkehrsbelastungen und q-v-Diagrammen die abgeleiteten Größen Fahrzeiten, Kraftstoffverbrauch und Fahrtkosten berechnet werden können.

⁵⁷ Vgl. http://www.kowoma.de/gps/Praktische_Hinweise.htm.

⁵⁸ Von engl. „directed graph“.

⁵⁹ Vgl. Diestel, R.: Graphentheorie.

⁶⁰ Vgl. Güting, R.: Datenstrukturen und Algorithmen.

Während die genannten Widerstände in der Kfz-Navigation durchaus ihre Berechtigung haben, sind sie für das Radfahrerrouting nicht oder nur eingeschränkt geeignet.

Zur genaueren Visualisierung des Streckenverlaufs einer Kante kann diese um Stützpunkte ergänzt werden. Stützpunkte sind zweiarmige Knoten, die den Streckenverlauf nachbilden. Damit wird eine Zuordnung von Kanten (z. B. zu Karten) erleichtert und die Überschneidung von Kanten vermieden.

Eine Neuberechnung der Route während des Fahrtverlaufs wird als Re-Routing bezeichnet. Ein Re-Routing kann – unabhängig vom betrachteten Verkehrsmittel – aus folgenden Gründen notwendig werden:

- Der Nutzer möchte ein anderes Ziel als das ursprünglich gewählte ansteuern,
- der Nutzer hat sich trotz der Zielführung (Navigation) verfahren,
- bestimmte Kanten oder Strecken der berechneten Route sind nicht befahrbar (Stau, Steinschlag, umgestürzter Baum, Hochwasser, Baustelle)
- die Route soll über ein bestimmtes Zwischenziel führen,
- der Nutzer ist mit der vom System berechneten Routenführung nicht zufrieden.

Der örtliche Ablauf für ein Routing kann unterschieden werden nach

- dem ontrip-Routing und
- dem offtrip-Routing.

Beim ontrip-Routing erfolgt die Suche eines optimalen Weges auf dem Endgerät. Dies hat den Vorteil, dass der Nutzer an jedem Ort und zu jeder Zeit einen Routingvorgang anstoßen kann. Dies ist vor allem dann günstig, wenn sich das Ziel der Tour ändert oder wenn während der Fahrt zusätzliche Ziele angesteuert werden sollen. Aufgrund des begrenzten Speicherumfangs der mobilen Endge-

räte bedingt diese Art des Routings, dass das Datenvolumen gewissen Einschränkungen unterliegt. Der Datensatz des Wegenetzes muss relativ einfach strukturiert und räumlich beschränkt sein, damit die notwendigen Daten bereitgehalten werden können.

Beim offtrip-Routing erfolgt das Routing abseits des Navigationsgeräts. Dies kann beispielsweise der Tour zeitlich vorgelagert auf einem PC passieren, bei dem die Daten im Anschluss an den Routingvorgang auf das Endgerät übertragen werden. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass die Datenmenge nicht begrenzt ist, wodurch wesentlich mehr Informationen bereitgestellt werden können. Nachteilig ist jedoch, dass immer ein PC vorhanden sein muss, um einen Routingvorgang auszulösen. Das Routing kann also nur pretrip durchgeführt werden und erfordert eine detaillierte Vorausplanung.

Eine andere Möglichkeit des offtrip-Routings besteht in einem Routing auf einem Server. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass der Nutzer keine Daten auf dem mobilen Endgerät oder dem PC vorhalten muss. Benötigt wird lediglich eine Navigationssoftware für das Endgerät und eine Verbindung zum Datenserver. Zudem sind die Daten auf dem Server wesentlich einfacher zu aktualisieren als bei den anderen Varianten. Auch das Volumen der Wegenetz-Daten und der Informationsdaten unterliegt nur geringen Randbedingungen. Nachteilig ist jedoch, dass ein Routingvorgang nur dann angestoßen werden kann, wenn eine Verbindung zum Server besteht. Für Geräte ohne Kommunikationsmodul bedeutet dies, dass für die Kommunikation ein PC mit Internetzugang zwischengeschaltet werden muss. Sollten Geräte über ein Kommunikationsmodul verfügen, besteht eine starke Einschränkung im zu übertragenden Datenvolumen darin, dass der Datendurchsatz via GSM oder GPRS relativ gering ist, so dass ein erheblicher Zeitbedarf für die Kommunikation entsteht bzw. das Datenvolumen gering gehalten werden muss. Hier bestehen zukünftig möglicherweise Entwicklungsmöglichkeiten über den Einsatz von UMTS.

Semantische Routenplanung

Bezüglich des Fahrtzwecks von Radfahrern kann unterschieden werden in berufliche Wege und Freizeitfahrten (siehe auch Abschnitt 2.2.1: „Differenzierung von Radtouren“). Die freizeitbezogenen Fahrten können wiederum untergliedert werden in Fahrten mit Beförderungsabsicht und mit Erholcharakter. Bei den Fahrten mit Beförderungszweck dient das Fahrrad der Erreichung eines Zieles, z. B. einer Freizeitaktivität, und ist somit gewissermaßen Mittel zum Zweck. Bei Fahrten mit Erholcharakter steht dagegen nicht unbedingt die Zielerreichung im Vordergrund, sondern die Fahrt selbst. Ob der Erholcharakter der sportlichen, naturbezogenen, kommunikativen oder anderen Ebenen zuzuordnen ist, ist nutzerabhängig.

Bei der Routenplanung von Fahrradstrecken mit beruflichem Hintergrund als auch bei Fahrten mit vorrangigem Beförderungszweck steht in der Regel die schnelle Zielerreichung im Vordergrund. Es werden vorwiegend Routen ausgewählt, die sich durch minimierte Fahrtzeiten auszeichnen. Dies werden vornehmlich Wege sein, die durch wegstrecken kürzeste Entfernungen gekennzeichnet sind, sofern dem nicht verstärkt Streckenanteile mit deutlichen Steigungen entgegenstehen. In diesem Fall wird die Minimierung der Steigungssumme im Vordergrund stehen.

Im Bereich des erlebnisorientierten Routings werden dagegen Routen gewählt, die sich durch ausgeprägte Erholungscharakteristika auszeichnen. Eine rein zeit- bzw. streckenkürzeste Verbindung wird a priori nicht favorisiert. Vielmehr ziehen die Nutzer nicht nur andere Ausprägungen des Streckentyps bei der Routensuche heran, sondern oft auch eine Kombination verschiedener Attribute. Eine solche Art der Routenplanung wird als semantische Routenplanung verstanden. Es handelt sich hierbei um eine „Routengenerierung aufgrund vom

Anwender definierter Präferenzen⁶¹. Diese Art des Routings ist in der Vergangenheit weder hinsichtlich geeigneter Routingalgorithmen, noch im Hinblick auf die Anforderungen aus der Gruppe der Radfahrer hinreichend untersucht worden.

Eine der Präferenzen von Radfahrern ist die verkehrsarme Streckenführung der Tour. Zu den geeigneten Attributen für eine entsprechende Routensuche zählen der Streckentyp, das Verkehrsaufkommen, die maximale Kapazität q_C der Straße sowie ihr Lkw- bzw. Schwerverkehrsanteil SV. Eine solche Typologie wird u. a. im „Handbuch für die Bemessung von Straßen“⁶² (HBS 2001) oder den „Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Straßen“⁶³ (EWS `97) vorgenommen. Vorrangiges Ziel des Routings wird es allerdings sein, Radwege zu finden, die nicht für den motorisierten Verkehr freigegeben sind, oder, falls dies nicht zu vermeiden ist, zumindest Wege zu wählen, die eine niedrige Verbindungsfunktionsstufe bzw. Straßenkategorie aufweisen und somit durch motorisierten Verkehr wenig belastet sind, wobei gleichzeitig der Anteil an Lkw gering sein sollte. Zu diesen Wegen sind beispielsweise die Kanten der NavTech-Klassen 5 bis 7 zuzuordnen (siehe Tabelle 4-5).

Eine zweite Präferenz der Routenwahl von Radfahrern stellt die Ausprägung der Wegoberfläche dar. Radfahrer schätzen in der Regel befestigte Oberflächen, die einen geringen Rollwiderstand und damit einen hohen Fahrkomfort und wenige Reifendefekte versprechen und zudem einen guten Wasserabfluss gewährleisten.

⁶¹ Bär, W.: Konzeption und Entwicklung von Software-Komponenten für ein Routenplanungssystem mit mobilen Endgeräten, S. 4.

⁶² FGSV (Hrsg.): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen, S. 5-19.

⁶³ FGSV (Hrsg.): Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Straßen, S. 22-28, S. 39.

Während der sportlich orientierte Nutzer – bei den Radfahrern beispielsweise der Mountainbiker – die Herausforderung bergiger Strecken sucht, wird der vorwiegende Teil der Freizeitausflügler Strecken mit gering ausgeprägten Steigungs- und Gefälleanteilen bevorzugen. Das Höhenprofil einer Tour stellt somit ein drittes, wesentliches Routingkriterium für Radfahrer dar. Für die Berechnung eines Höhenprofils müssen die Kanten höhenattributiert sein. Dazu sind entweder die Steigungs- und Gefällemeter der Kanten oder die Höhen aller Knoten- und Stützpunkte der Kanten zu erfassen (siehe auch Abschnitt 5.3).

Weitere Kriterien für die Festlegung geeigneter Routen sind eine durchgängige Beschilderung der Wege, die Erreichbarkeit bestimmter touristischer Ziele, die naturbezogene Schönheit des Weges oder die landschaftliche Aussicht.

Karten mit den für Radfahrer relevanten Attributen sind nahezu nicht oder unzureichend vorhanden. Die Attributierung erstreckt sich in Einzelfällen auf

- Klassifizierung der Wegetypen bzw. der Baulasträger von Radwegen⁶⁴,
- Höheninformationen, die auch für ein Routing genutzt werden⁶⁵,
- Beschilderung (Markierung) von Radtouren⁶⁶.

Die Attribute „Oberfläche“, „Breite“, „Windgeschützttheit“, „Attraktivität des Umfeldes“ werden i. d. R. gar nicht, Attribute wie „max. Steigung“ oder „Verkehrsdichte“ nur eingeschränkt oder in modifizierter Form berücksichtigt.

Besonderes Augenmerk kommt der Entwicklung der Routingalgorithmen zu. Obwohl bereits existieren, die für Routinganwendungen stehen zwar leistungsfähige Algorithmen zur Verfügung, wie beispielsweise der Dijkstra-Algorithmus⁶⁷

⁶⁴ Beispielsweise Stadt Essen: Amtliche Fahrradkarte Essen.

⁶⁵ Zum Beispiel Mobinet München (URL).

⁶⁶ Vgl. beispielsweise <http://www.radroutenplaner.nrw.de>.

⁶⁷ Domschke, W.: Logistik: Transport, S. 101.

oder der A*-Algorithmus⁶⁸, diese nutzen aber für die Berechnung nur ein einziges Attribut. Zwar können mehrere Attribute zu einem aggregiert werden, es besteht aber die Notwendigkeit, die Gewichtung der verschiedenen Attribute untereinander festzulegen. Eine solche Gewichtung müsste in Abstimmung mit den Nutzern vorgenommen und erprobt werden, was bisher nicht der Fall ist.

Die Wegenetzdaten sind der zentrale Bestandteil der Navigationssysteme. Ihre Genauigkeit und Aktualität sind entscheidend für ihren Einsatzbereich und ihre Nutzbarkeit. Die Recherche der Wegenetzdaten der unterschiedlichen Navigationssysteme hat – im Gegensatz zur vergleichenden Untersuchung der Karten – ergeben, dass nur marginale Unterschiede in den Datenbeständen der beiden Anbieter TELEATLAS⁶⁹ und NAVIGATION TECHNOLOGIES CORPORATION (NavTech)⁷⁰ bestehen.⁷¹

Alle Wegenetzdaten enthalten fast ausschließlich die Wegenetze für den motorisierten Individualverkehr. Diese Netze sind weitgehend flächendeckend vorhanden und unterscheiden sich nur geringfügig in ihrem Umfang und ihrer Aktualität. Alle Wegenetzdaten beinhalten neben den für das Routing erforderlichen Informationen (Lage, Straßenkategorie, Geschwindigkeit, Länge, usw.) auch einzelne zusätzliche Netzelemente des Rad- und Gehwegenetzes. Diese sind jedoch keineswegs vollständig, sondern nur in sehr geringem Umfang in den Daten enthalten. Weil kein separates Wegenetz mit den entsprechenden Attributen bereitgestellt wird, ist ein Routing für Radfahrer oder Wanderer nur bedingt möglich. Während für das Routing im MIV die Attributierung der Kantenlänge und Fahrzeit, ggf. ergänzt um eine O-D-Matrix und die kantenspezifi-

⁶⁸ Hart, P.; Nilsson, N.; Raphael, B.: A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, S. 100-107.

⁶⁹ <http://www.navteq.com>.

⁷⁰ <http://www.teleatlas.com/Pub/Home>.

⁷¹ Die Firmen TeleAtlas und NavTech sind die einzigen Anbieter von flächendeckenden digitalisierten Straßennetzen.

schen q-v-Diagramme erforderlich ist⁷², benötigen Radfahrer – wie gezeigt wurde – andere bzw. ergänzende Kantenattribute für ein sinnvolles Routing. Keine der in den Navigationssystemen verwendeten Datenbasen weist eine Unterscheidung nutzergruppenspezifischer Attribute und Netzwidestände auf. Netze, die sämtliche Kriterien wie Wegeoberfläche, verkehrsarme Wege, Windgeschütztheit, Breite der Wege oder Umgebung der Wege (Aussicht, Naherholungspotenzial usw.) berücksichtigen, sind aber nicht vorhanden, hier entsteht Handlungsbedarf.⁷³

Bei Tests unterschiedlicher Geräte konnte außerdem festgestellt werden, dass Fußgänger und Radfahrer auf teilweise unsinnigen Strecken geführt wurden, obwohl real deutlich bessere Wegabschnitte vorhanden waren. Diese Strecken waren aber entweder nicht im Netz vorhanden oder es konnten aufgrund der Ausrichtung der Attribute auf den MIV keine sinnvollen Widerstände definiert werden. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Wegenetze für die Pkw-Navigation ausreichen, aber abgesehen von der (allerdings unvollständigen) Geometrie für andere Nutzergruppen nicht verwendbar sind.

2.3.4 Ortung und Zielführung

Zu den wesentlichen Komponenten einer Navigationsanwendung zählen die Ortung und die Zielführung.

Unter Ortung wird die Information des Nutzers über seinen Standort auf einem Kartenhintergrund verstanden. Für die Ortung ist ein ausreichender Empfang von GPS-Signalen erforderlich.

⁷² Vgl. Wermuth, M.: Verfahrensschritte der Verkehrsplanung, S. 186 ff.

⁷³ Vgl. Hagemeister, C.; Schmidt, A.: Wie wichtig sind welche Kriterien für die Routenwahl von Alltagsfahrern?

Die Zielführung bezeichnet die Informationen, die der Nutzer vom System über die erforderlichen Fahrtrichtungsentscheidungen erhält. Grundlage der Zielführung ist eine Ortung des Nutzers sowie ein durchgeführtes Routing. Die Zielführung kann in visueller oder akustischer Form erfolgen.

Alle untersuchten Systeme unterstützen die Navigation durch zusätzliche Hinweise auf Richtungsänderungen. Als sehr übersichtlich und leicht verständlich hat sich die möglichst große Darstellung des vorzunehmenden Richtungswechsels in Pfeilform erwiesen. Diese Art der Darstellung hat den Vorteil, dass sie schnell und einfach zu begreifen ist und den Nutzer nicht dazu zwingt, sich auf das Gerät zu konzentrieren, was eine erhöhte Unfallgefahr mit sich brächte. Fast alle Geräte unterstützen die Anzeige des Richtungswechsels durch akustische Signale. Diese reichen von einfachen Piep-Tönen bis hin zu umfangreicher Sprachausgabe.

In der Nutzerbefragung hat sich die Hälfte der befragten Radfahrer für akustische Abbiegehinweise ausgesprochen. Nahezu alle Befragten, die eine Aussage zur Frage nach der optimalen Zielführung abgegeben haben, haben sich zudem für die visuelle Darstellung der Zielführung beim Erreichen von Knotenpunkten ausgesprochen.

Für die Kartendarstellung wird die Forderung erhoben, dass die für eine zügige Fahrt notwendigen Informationen während der Fahrt leicht auf dem Display eines Zielführungsgeräts ablesbar sein sollen, ohne dass man dazu anhalten muss. Aufgrund des relativ hohen Abstandes zwischen Gerät und Auge des Nutzers und dem im Vergleich zu einer Karte relativ kleinen Anzeigedisplay müsste entweder die Karte sehr stark vergrößert werden oder es werden als Alternative Abbiegehinweise vor Verzweigungen in Form von gut lesbaren Pfeilen gegeben.

Abbiegehinweise in sprachlicher Form scheitern in der Praxis vor allem daran, dass beim Radfahren der Abstand zwischen Gerät und Kopf sowie die Windgeräusche der Fahrt das Verstehen erschweren.

Um eine möglichst genaue Angabe über bevorstehende Richtungsänderungen geben zu können, ist ein entsprechendes Wegenetz notwendig. Ein unvollständiges Wegenetz und / oder eine unzureichende Attributierung kann zu falschen Angaben bezüglich der Richtungsänderung führen und damit den Nutzer verwirren oder ein falsches Abbiegemanöver bewirken. Darüber hinaus ist es notwendig, den Nutzer früh genug auf eine Richtungsänderung hinzuweisen, damit er rechtzeitig reagieren und ggf. notwendige Manöver durchführen kann.

Neben dem vollständigen, gut attributierten Wegenetz ist eine präzise Ortung der aktuellen Position zwingend notwendig, damit die Abbiegehinweise rechtzeitig und möglichst genau generiert werden können. Alle getesteten Navigationssysteme stützen sich auf 12 Kanal-GPS-Empfänger, die entweder in die Hardware integriert sind oder als externe Empfänger angeschlossen werden. Wenn genügend Satelliten empfangen werden, kann eine relativ hohe Ortungsgenauigkeit erreicht werden. Eine Information des Nutzers über die Anzahl der empfangenen Satelliten und die voraussichtlich verfügbare Genauigkeit, wie sie in Abbildung 2-12 dargestellt wird, ist zweckmäßig, um dem Nutzer einen Anhaltspunkt für die Genauigkeit seiner Ortung zu geben.

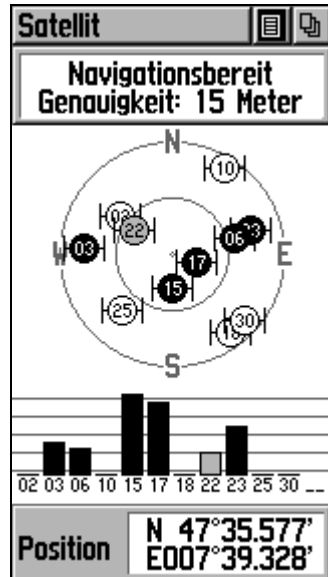


Abbildung 2-12: Anzeige sichtbarer Satelliten auf dem GPS-Empfänger⁷⁴

Werden jedoch zu wenige oder keine Satelliten empfangen, ist die aktuelle Position des Nutzers nur unzureichend oder überhaupt nicht zu berechnen; das System kann keine zuverlässigen Navigationsangaben ermitteln. Für den Fall, dass zu wenig Satelliten empfangen werden können und die Ortung dadurch sehr ungenau wird, ist es notwendig, einen Algorithmus zu implementieren, der eine Plausibilitätsprüfung der ermittelten Position durchführt, wodurch der relative Fehler reduziert werden kann. Hier setzt Kapitel 5 der vorliegenden Arbeit an, in dem mögliche Ansätze zur Positionsbestimmung bei fehlerhaftem oder fehlendem Signal entwickelt werden. Bei permanent unzureichender Ortung kann aber auch ein intelligenter Algorithmus alleine eine fehlerhafte Navigation nicht verhindern.

⁷⁴ eTrex Legend personal navigator; Benutzerhandbuch und Referenzen; 2001; Garmin Cooperation, S. 13.

Ist es dem System nicht möglich, eine Ortung vorzunehmen, fehlen der Software die Informationen für die Navigation. Dies bedeutet, dass der Nutzer keine Informationen über seine aktuelle Position und anstehende Richtungsänderungen bekommt. Er ist dann auf Textinformationen über die gesamte Route oder auf die Darstellung einer Übersichtskarte angewiesen.

Fast alle auf dem Markt erhältlichen Systeme stützen sich ausschließlich auf die Verfügbarkeit und die Genauigkeit des GPS. Einige wenige Geräte verfügen über eine zusätzliche Ortungskomponente. Bei dieser Komponente handelt es sich um einen – ähnlich einem Kompass funktionierenden – so genannten NorthFinder, der die Ausrichtung des Gerätes ermitteln kann. Diese Komponente kann jedoch nur als eine zusätzliche Information zur Orientierung dienen, da allein durch die Ausrichtung des Gerätes keine Informationen zur Position ermittelt werden können. Der Wert einer Information zur Ausrichtung des Gerätes ist aber hilfreich, sobald der Nutzer seine Richtung ändert, da das System dadurch schneller auf diese Richtungsänderung reagieren kann.

Bei den Einbaugeräten in der Pkw-Navigation wird versucht, durch die Ergänzung von Sensordaten und Algorithmen die Standortbestimmung zu verbessern. Zu den von den Sensoren übermittelten Daten zählen

- die Wegstreckenimpulse,
- die Radimpulse rechts- und linksseitig,
- der Gierwinkel des Fahrzeugs, vereinfacht ausgedrückt als der Drehwinkel eines Fahrzeugs um seine Hoch- bzw. z-Achse,
- die Erfassung der Rückwärtsfahrt des Fahrzeugs über einen getriebe- oder schaltungsseitigen Kontaktgeber,
- die – aus den Wegstreckenimpulsen abgeleitete – Geschwindigkeit des Fahrzeugs.

Zu den algorithmischen Ansätzen zählt in erster Linie das so genannte Map-Matching. Mit Map-Matching wird die Projektion des Fahrzeugstandortes auf die Netzkanten verstanden. Hintergrund des Ansatzes ist der Grundsatz, dass das Fahrzeug in der Regel auf dem Straßennetz verkehrt. Weitere Algorithmen dienen der Berechnung des Standortes beim Ausfall des GPS-Signals über die Radsensoren. Bei Navigationssystemen für Radfahrer erweist sich diese Art der unterstützenden Methoden jedoch als problematisch. Die Gründe dafür werden im Abschnitt 5.2 gezeigt.

Tracking

Mittels einer Trackingfunktion wird der zurückgelegte Wegeverlauf protokolliert. Damit ist es dem Nutzer möglich, seinen Weg zurückzuverfolgen – eine nützliche Funktion, wenn beispielsweise „Abstecher“ vom eigentlichen Tourverlauf gemacht werden –, oder die Tour für spätere Zwecke oder für andere Interessierte aufgezeichnet werden soll, beispielsweise um sie auf einer geeigneten Internetplattform zu veröffentlichen.

Die Umsetzung einer Trackingfunktion (bzw. Track-Back-Funktion), wie sie derzeit bereits einige Geräte – wenngleich auch nur in einer sehr einfachen Form – anbieten, wurde durchweg (von zwei Dritteln der Befragten) begrüßt.

Tourendarstellung

Die Tourendarstellung bezeichnet die Visualisierung einer vom Nutzer ausgewählten Tour auf dem Kartenhintergrund. Sie hat den Zweck, dem Nutzer den Fahrtverlauf zu verdeutlichen, Abweichungen zwischen tatsächlicher und geplanter Tour zu erkennen und die Orientierung bei GPS-Ausfall zu ermöglichen.

Die Darstellung der Tour bzw. Route erfolgt bei allen untersuchten Navigationsgeräten bis auf wenige Ausnahmen als Vektorgrafik mit dem dazugehörigen Wegenetz. Lediglich eines der untersuchten Systeme verzichtet auf eine grafische Darstellung der Tour und liefert rein textliche Informationen. Die Darstellung der Route auf dem Wegenetz erweist sich als sehr hilfreich bei der Orientierung und ist im Allgemeinen sehr übersichtlich realisiert. Bei Geräten, die nur über ein Graustufen-Display verfügen, werden die Routen durch eine ausgeprägte Strichstärke hervorgehoben.

Voraussetzung für eine Tourendarstellung ist die Unterstützung von Touren durch das Navigationsgerät. Dazu ist aber zunächst einmal eine Tourenverwaltung erforderlich. Hierzu zählt die Möglichkeit, Touren für das mobile Navigationssystem auswählen und editieren zu können.

Dabei kann unterschieden werden in vorbereitete Touren, halbautomatisiert erstellte Touren und manuell editierte Touren. Zu den vorbereiteten Touren zählen auch Touren, die durch andere Nutzer aufgezeichnet (getrackt) und in eine entsprechende Plattform eingestellt worden sind. Über eine solche Internetplattform können neben den Radtouren auch die entsprechenden Karten angeboten werden. Nachteilig wirken sich dabei die für einen Download unvorteilhaften großen Dateien aus, die aus Rasterbildern bestehen sollten. In der Regel können aus Platzgründen auch auf großvolumigen Speichermedien nicht Karten und Netze für alle verfügbaren Regionen mitgeführt werden.

2.3.5 Grafische Oberfläche und verwendete Karten

Die wesentliche Funktionalität von Radfahrradnavigationssystemen ist die Darstellung der Umgebung des Standortes in Form einer Karte. Mögliche Darstellungsformen sind Rasterkarten- und Vektorkartendarstellungen, die in ihren Ausprägungen weiter differieren. Die gewählte Kartendarstellung ist für die Begreifbarkeit und Erkennbarkeit des Umfeldes durch den Nutzer von Bedeutung. Damit das System Netzinformationen verarbeiten kann, ist eine systemimma-

nente Karten-Informationsgrundlage erforderlich, die mit der nutzerbezogenen Kartenbasis übereinstimmen, aber auch von dieser abweichen kann.

Karten als Hintergrund bzw. als Grundlage der Tourdarstellung sind nicht bei allen Navigationssystemen vorhanden. Einige Systeme verzichten ganz auf die Darstellung von Karten und bedienen sich der Navigation über Textinformationen und Abbiegehinweise in Pfeildarstellung. Andere Systeme nutzen nur das Wegenetz als Orientierungshilfe und verzichten auf die Darstellung detaillierter Karten. Weitere Systeme generieren aus den Wegenetzdaten Vektorkarten, in denen die Flächen nur schematisch (Wald, Bebauung, Wasser, usw.) ohne Detailinformationen dargestellt werden.

Jede dieser Darstellungsweisen bzw. der Verzicht auf Kartenmaterial hat verschiedene Vor- und Nachteile. Im Wesentlichen lassen sich die Eigenschaften der beiden Kartentypen wie folgt zusammenfassen:

Rasterkarten

Rasterkarten stellen Bildinformationen dar, die in einer Matrix zusammengesetzt sind. Jede Zelle dieser Matrix, die als Pixel bezeichnet wird, nimmt dabei eine Farbinformation auf. Der maximal verfügbare Farbumfang der Pixel stellt die Farbtiefe der Grafik dar. Je höher die Farbtiefe ist, umso farbgetreuer ist die Grafik, und umso größer ist der Speicherplatzbedarf.

Je mehr Zeilen bzw. Spalten der Matrix auf einer bestimmten Fläche untergebracht sind, desto höher ist die Auflösung der Grafik. Der Speicherplatzbedarf ist (quadratisch steigend) abhängig von der Auflösung. Um hoch aufgelöste Karten darstellen zu können, ist im Prinzip auch ein entsprechend hochauflösendes Display erforderlich.

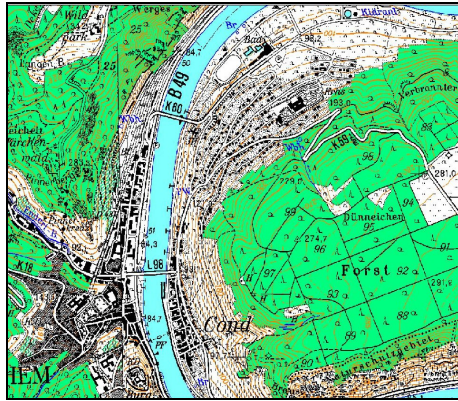


Abbildung 2-13: Beispiel für eine Rasterkarte im Maßstab 1:25.000 am Beispiel eines Ausschnitts aus Cochem-Zell⁷⁵

Zu den in der Geografie häufig eingesetzten Kartenwerken zählen neben Stadtplanwerken insbesondere die „Amtlichen Topografischen Karteninformationssysteme“ (ATKIS)⁷⁶ der Landesvermessungsämter, wie beispielsweise die Topografischen Karten in den Maßstäben 1:200.000, 1:50.000, 1:25.000 (siehe Abbildung 2-13) und 1:10.000. Diese Karten weisen – im Gegensatz zu den Vektorkarten – recht detaillierte Flächeninformationen auf, wie z. B. Wald- und Forstflächen, städtebauliche und landschaftliche Nutzungen, Flüsse und Seen usw.

Für topografische Karten ist in der Regel eine geringe Farbtiefe (z. B. 16 Farben, entspricht 4 bit) ausreichend. Durch die erforderliche Auflösung ist dennoch der Umfang der Grafiken beträchtlich. Kompressionsverfahren vermögen zwar die Größe der Karte auf dem Speichermedium zu reduzieren, für die Anzeige und Bearbeitung (z. B. Drehung) der Karten ist aber die unkomprimierte

⁷⁵ Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz: Topografische Karte im Maßstab 1:25.000, Blatt 5808.

⁷⁶ Vgl. Bill, R.: Grundlagen der Geo-Informationssysteme, Band 2, S. 220.

Größe relevant. Durch die feste Einteilung der Information sind Rasterkarten nur mit Informationsverlust skalierbar, also in der Größe veränderbar. Drehungen von Rasterkarten sind gegenüber Drehungen von Vektorkarten sehr rechenaufwändig. Für Berechnungen (beispielsweise Routing o. Ä.) des Systems sind Rasterkarten nur mittels komplexer Algorithmen auswertbar. Deshalb sind sie im Gegensatz zu Vektorkarten prinzipiell nicht für Operationen wie ein Routing oder die Generierung automatischer Abbiegehinweise geeignet.

Vektorkarten

Vektorkarten bestehen aus einer Vielzahl von vektorbasierten Informationen. Vektoren weisen verschiedene Informationen auf. Dazu zählen der Anfangspunkt, die Richtung (Orientierung), die Länge (Skalierung), die Farbe und ggf. Informationen zur Krümmung. Vektorkarten sind im Gegensatz zu Rasterkarten frei skalier- und drehbar und deutlich weniger speicherintensiv. Demgegenüber ist die Komplexität deutlich reduziert, was teilweise zwar die Übersichtlichkeit für den Nutzer erhöht, in der Regel aber auch die Orientierungsmöglichkeit innerhalb der Karte erschwert, weil z. B. Orientierungsmerkmale fehlen.

Der Verzicht auf einen vollflächigen, gerasterten Kartenhintergrund kann durchaus sinnvoll sein. Während der Fahrt benötigt der Nutzer nur sehr wenige Informationen. Die wesentlichen Informationen bestehen lediglich darin, zu wissen, ob sich der Nutzer auf dem richtigen Weg befindet und wie er sich am nächsten Verzweigungspunkt zu verhalten hat. Dazu benötigt der Nutzer einfache Informationen, beispielsweise einen Richtungspfeil und eine Entfernungsangabe. Während der Fahrt ist es sinnvoll, dem Nutzer nur diese wesentlichen Informationen bereitzustellen, um ihn nicht mit Details zu überfordern und die Navigationsanzeige zu unübersichtlich zu gestalten.

Bei herkömmlichen Navigationslösungen kommen in der Regel Vektorkarten zum Einsatz. Die Gründe dafür sind vielfältig: Die ursprünglich für den Kfz-Bereich entwickelten Anwendungen benötigen vektorisierte Karten, um ein Routing zu ermöglichen. Gleichzeitig ist mit diesen ein enormes Einsparpotenzial an Speicherplatz verbunden, da Vektorkarten die für ein Routing relevanten Informationen – Knoten und Kanten – deutlich kompakter speichern können. Das Vektornetz ist zudem stufenfrei zoombar, außerdem steht mit den deutschland- bzw. europaweiten Netzen der beiden Anbieter TELEATLAS und NAVTECH ein nahezu vollständiges Netz zur Verfügung, das mit Straßenbezeichnungen versehen ist und laufend aktualisiert wird.

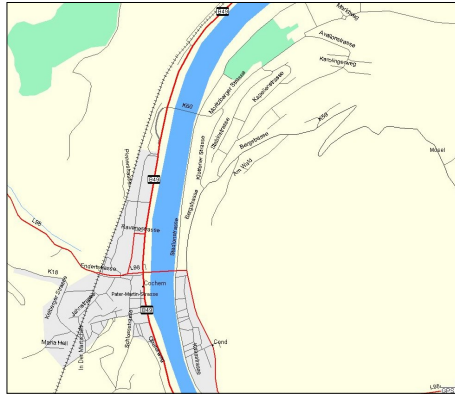


Abbildung 2-14: Beispiel für eine Vektorkarte im Maßstab 1:25.000 am Beispiel eines Ausschnitts aus Cochem-Zell⁷⁷

Es zeigt sich aber, dass der Einsatz von vektorisierten Karten (als Beispiel siehe Abbildung 2-14) für Navigationslösungen im Freizeitbereich nur unzulänglich oder in vielen Fällen sogar überhaupt nicht geeignet ist. Hauptgründe sind zunächst einmal die schlechte Orientierungsmöglichkeit in der Karte. Da die Bewegungsgeschwindigkeit von nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmern bedeu-

⁷⁷ NavTech: Basisnetz.

tend langsamer ist als die von Kraftfahrzeugen, und zudem ein zumeist völlig anderes Wegenetz genutzt wird, ist eine Erkennung des Standpunktes für einen Radfahrer insbesondere innerhalb einer großmaßstäblichen Karte in der Regel nicht möglich. Es fehlen detaillierte topografische Informationen, wie beispielsweise POIs, Höhenlinien, kleine Flüsse, Pfade und Waldwege sowie Flächeninformationen über die Nutzungen der räumlichen Bereiche.

Ein Verzicht auf einen detaillierten Kartenhintergrund erweist sich besonders dann als problematisch, wenn die Positionsbestimmung ungenau wird oder ganz ausfällt. In diesem Fall wäre der Nutzer ohne jegliche Orientierungshilfe und müsste sich anhand der Beschilderung zurechtfinden.

POIs in Vektor- und Rasterkarten

Ein Unterschied hinsichtlich der Vollständigkeit der im Kartenmaterial enthaltenen POIs zwischen Vektor- und Rasterkarte kann pauschal nicht festgestellt werden. Aufgrund ihrer Architektur sind Vektorkarten vom Grundsatz her zwar in der Detailtiefe unbegrenzt, diese wird aber durch die zur Verfügung stehende Anzeigefläche beschränkt. Ein erhöhter Detaillierungsgrad bei Rasterkarten ergibt sich durch die Möglichkeit, Karten verschiedener Maßstäbe heranzuziehen. In der Praxis weisen Rasterkarten eine ungleich höhere Vielzahl von Informationen auf als Vektorkarten. In letzteren sind üblicherweise nur das Wegenetz und die wichtigsten POIs enthalten, während in Rasterkarten darüber hinaus zum Beispiel auch topografische Informationen (Höhenlinien, Flüsse und Bäche, Hecken, usw.) enthalten sind.

Als Problem konnte festgestellt werden, dass das Datenvolumen von detaillierten Karten einen zu großen Umfang erreicht, um auf den mobilen Navigationssystemen noch komfortabel gehandhabt werden zu können. Da Radfahrer deutlich kürzere Wege zurücklegen als Pkw-Fahrer könnte für sie die Bereitstellung

von Kartenausschnitten sinnvoll sein, wodurch die Datenmenge reduziert werden kann. Dazu ist eine Separierung von Wegenetz und Kartenhintergrund sinnvoll.

3 Zur Genauigkeit der Standortbestimmung

Eine optimierte Standortbestimmung bietet Lösungsansätze für die folgenden Probleme, die sich in der praktischen Nutzung einer Radfahrravigation aufgrund eines zeitweise fehlenden oder ungenauen GPS-Signals ergeben:

- keine Anzeige des Standortes,
- im Bereich stark verästelter Wege fehlerhafte Übertragung des Standortes auf das Wegenetz,
- verspätete Abbiegehinweise.

Wesentlich für die Akzeptanz von Navigationssystemen beim Nutzer ist im Hinblick auf die GPS-Komponente insbesondere die Frage nach der Genauigkeit des Systems und dem Umgang des Systems mit Ausfällen. Neben systembedingten Ausfällen des Gesamtsystems „GPS“, die aber – abgesehen von Aktivieren der Selective Availability – fast gänzlich ausgeschlossen werden können, treten vor allem Ausfälle aufgrund topologischer Bedingungen auf. Komplettausfällen des GPS soll in der Zukunft durch den Aufbau eines eigenständigen, europäischen Global Positioning System namens Galileo begegnet werden. Galileo soll – im Gegensatz zum herkömmlichen GPS mit einer Genauigkeit von max. 10 bis 15 Metern – eine Standortbestimmung bis auf den Meter genau sicherstellen können.⁷⁸

Zu den topologischen Ursachen für GPS-Ausfälle zählen unter anderem die Positionierung in Schluchten und Tälern (Abschattung durch Berge), vor allem in ländlichen Räumen, sowie die Abschattung durch Hausfassaden (Hochhäuser, eng bebaute Straßenzüge) in städtischen Bereichen (vgl. Abschnitt 3.3). Daneben konnten in praktischen Tests Abweichungen in der Standortbestimmung zum Beispiel durch Störungen von Funktürmen o. Ä. festgestellt werden. Weitere Fehler können durch falsche Bedienung der Ortungskomponente ent-

⁷⁸ Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: Telematik im Verkehr.

stehen, z. B. bei Abschattung durch den eigenen Körper oder eine Personengruppe.

Ein weiteres Problem bei der Bestimmung der aktuellen Position ist die Ungenauigkeit des GPS. Sie resultiert aus zwei unabhängigen Einflüssen: Zum einen wird sie durch die Anzahl und die Stellung der verfügbaren, d. h. der sichtbaren Satelliten bestimmt (vgl. Abbildung 2-9). Zum anderen kann die „Sichtbarkeit“ der Satelliten durch Abschattungen beeinträchtigt werden. Dies ist häufig auf Waldwegen der Fall, wenn ein dichtes Laubdach die Sicht nach oben vermindert. Folgen im Zuge einer Tour mehrere längere Streckenabschnitte hintereinander, bei denen der GPS-Empfang eingeschränkt ist, entstehen abschnittsweise Lücken bei der Ortung (vgl. Abbildung 3-1).

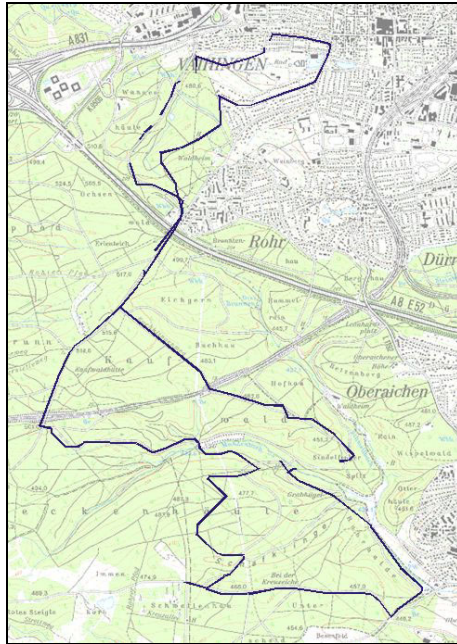


Abbildung 3-1: Beispiel für einen unterbrochenen GPS-Empfang (Raum Stuttgart)^{79 80}

Es stellt sich die Frage, wie derartige Abschattungsstrecken überbrückt werden können. Über die logische Ortung (Längen- und Winkelmessung in Verbindung mit dem digitalen Straßennetz) lassen sich solche Lücken für zeitlich begrenzte Ausfälle kompensieren. Diese Methodik kommt bereits in der Kfz-Navigation zum Einsatz. Das Prinzip kann für den Radfahrer z. T. übernommen werden, da auch hier eine Wegstreckenmessung prinzipiell durchführbar ist. Allerdings fehlt beim Fahrrad die Möglichkeit einer Winkeländerungs- oder Gierwinkelmessung.

⁷⁹ Hintergrundkarte: TOP 25, Baden-Württemberg, Karte Nord.

⁸⁰ Die Tour wurde aufgezeichnet mit einem „Garmin etrex Legend“.

Ungenauigkeiten, die auf eine unzureichende Anzahl oder ungünstige Stellung von Satelliten zurückzuführen sind, müssen durch entsprechende Algorithmen ausgeglichen werden.

3.1 Begriffe

Unter Genauigkeit (engl.: accuracy) wird nach KÖHNE und WÖßNER „die Übereinstimmung zwischen dem (einzelnen) Messergebnis und dem wahren Wert der Messgröße“⁸¹ verstanden. „Eine hohe Genauigkeit kann man [...] nur erreichen, wenn sowohl die Präzision als auch die Richtigkeit gut sind“⁸².

Als Richtigkeit (engl.: trueness, accuracy of the mean) wird danach das Maß angesehen, das die Übereinstimmung zwischen dem Mittelwert einer Datenreihe und ihrem anerkannten Referenzwert beschreibt.

Das Maß der Übereinstimmung von unabhängigen Messwerten untereinander wird als Präzision (precision) bezeichnet. Eine hohe Präzision sagt nichts über die Richtigkeit der Werte aus, so können z. B. die Werte durch präzise GPS-Bestimmung korrekt ermittelt, aber durch ein fehlerhaftes Kartendatum systematisch verschoben worden sein.

Die nachstehende Abbildung erläutert die Begriffe „Präzision“ und „Richtigkeit“:

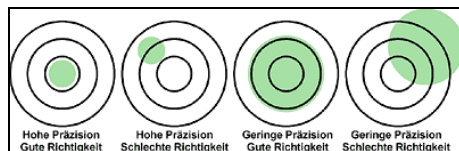


Abbildung 3-2: Differenzierung von Präzision und Richtigkeit⁸³

⁸¹ Köhne, A.; Wößner, M.: GPS-System.

Auf: <http://www.kowoma.de/gps/zusatzerklaerungen/Praezision.htm>.

⁸² Köhne, A.; Wößner, M.: GPS-System.

Auf: <http://www.kowoma.de/gps/zusatzerklaerungen/Praezision.htm>.

⁸³ <http://www.kowoma.de/gps/zusatzerklaerungen/Praezision.htm>.

Für die Ortung von Radfahrern kommt es also insbesondere auf eine hohe Richtigkeit, also die Minimierung der Abweichungen der einzelnen Messwerte vom tatsächlichen Standort, an. Statistisch gesehen ist die maximale Richtigkeit also gegeben bei einem Mittelwert $\bar{x} = x_{\text{Soll}}$. Gleichzeitig sollte aber auch eine hohe Präzision erzielt werden, die einer Standardabweichung nahe $s = 0$ entspricht.

Bei der Beurteilung bestehender Navigationssysteme wird meist nicht von der „Richtigkeit“ und der „Präzision“ gesprochen, sondern allgemein von der „Genauigkeit“ der Ortung. Der Begriff der Genauigkeit muss in diesem Zusammenhang quantifiziert werden. Ein Standard für die Entwicklung von digitalen Karten bzw. Netzen speziell für die Straßennavigation, das „Geographic Data File“ (GDF), definiert keinen Wert einer erforderlichen Genauigkeit. Einzelne Hersteller entsprechender Systeme bestimmen die maximale Abweichung von Punkten beispielsweise mit 1/4 der Straßenbreite (Firma TeleAtlas) oder 3 Meter (Firma European Geographic Technologies, EGT)⁸⁴.

Die vorliegenden Werte sind aber im betrachteten Einsatzfeld nicht anwendbar. Radfahrer (wie auch Fußgänger) verfügen über einen kleineren, gleichzeitig aber weitaus flexibleren Aktionsradius als Kraftfahrzeuge. Sie sind kleiner dimensioniert, wendiger und nicht oder nur teilweise an ein festes Wegenetz gebunden. Das ihnen zur Verfügung stehende Wegenetz ist weniger restriktiv im Hinblick auf Ge- und Verbote als das für Kraftfahrzeuge, gleichzeitig ausgehnter, verästelter, häufig auch unkomfortabler, umwegiger und deutlich schlechter beschildert.

Außerdem sind Radfahrer im Mittel deutlich langsamer als Pkw, zumindest in ländlichen Bereichen. Sie sind empfindlicher gegenüber Steigungen und schlechten Wegoberflächen sowie Witterungseinflüssen und Umwegen. Aus diesen Gründen ist für Radfahrer eine schnelle, zuverlässige Orientierung im Gelände wichtig. Um ihnen eine konstante, verzögerungsfreie Fahrt zu ermögli-

⁸⁴ Czommer, R.: Leistungsfähigkeit fahrzeugautonomer Ortungsverfahren auf der Basis von Map-Matching-Techniken, S. 24.

chen, ist eine zuverlässige, rechtzeitig vor Knotenpunkte ansprechende Zielführung notwendig.

In topografisch bewegten Bereichen liegen sehr oft mehrere, von Radfahrern nutzbare Parallelwege oder auch Kreuzungen eng zusammen.

Dementsprechend höher sind die Ansprüche an Richtigkeit der Positionsbestimmung bei Radfahrern. Während im Kfz-Bereich eine Genauigkeit von 5-10 Metern ausreicht, benötigt der Radfahrer eine Genauigkeit im Bereich von etwa einem Meter.

3.2 Probleme bei der Positionsbestimmung

Die Nutzung von satellitengestützten Navigationssystemen führt bei der Ortung zu verschiedenen Fehlerarten. Die wesentlichen Ausprägungen sind:

- Verzögerung der Positionsbestimmung nach dem Start des Systems,
- Ausfall der Ortung, also keine Bestimmung des aktuellen Standortes,
- fehlerhafte Ortung, also Abweichung der angezeigten Ist-Position von der tatsächlichen Soll-Position.

Die Ausprägungen der verschiedenen Fehlerarten und ihre Ursachen werden im Folgenden näher erläutert.

Verzögerung der Positionsbestimmung

Beim Einschalten von GPS-Empfängern unterscheidet man zwischen Heißstart, Warmstart und Kaltstart sowie der Wiedererfassung (engl. reacquisition).

Der Kaltstart bezeichnet den Startvorgang eines GPS-Empfängers, der über längere Zeit nicht in Betrieb genommen worden ist. Ein solcher Empfänger weist weder aktuelle Ephemeridendaten noch Almanachdaten auf; seine letzte Position ist ebenfalls nicht bekannt. Ein solcher Fall ergibt sich beispielsweise

bei einer Wiederinbetriebnahme an einem anderen Ort als bei der letzten Nutzung.

Unter den Almanach-Daten werden die Informationen über die Position des aussendenden sowie aller anderen Satelliten verstanden. Die Almanach-Daten werden von den Satelliten im 12,5-Minuten-Takt ausgesendet.⁸⁵

Die Ephemeridendaten werden permanent vom Satelliten ausgestrahlt und beinhalten den Status des jeweiligen Satelliten, das Datum und die Uhrzeit. Der Status kann „fehlerhaft“ bzw. „ungesund“ oder „korrekt“ bzw. „gesund“ sein. Ein fehlerhafter Status ergibt sich bei Satelliten, die von der Umlaufbahn abgekommen sind und deren Bahn durch eine Korrekturzündung korrigiert wird.⁸⁶

Sind lediglich die Ephemeridendaten im Empfänger veraltet und müssen aktualisiert werden, spricht man von einem Warmstart. Die Zeitspanne für einen Warmstart kann bis zu einige Minuten betragen.

Ein Heißstart liegt vor, wenn dem Gerät alle Daten in aktueller Form vorliegen und der Standort des Empfängers bekannt ist. Dieser dauert in der Regel nur einige Sekunden.

Einige GPS-Empfänger sehen die Möglichkeit vor, den aktuellen Standort mittels Eingabe einzugrenzen und damit die Standortberechnung zu beschleunigen.

Ausfall der Ortung

Neben der im Bereich des Radwanderns auftretenden Problematik der zu großen Ungenauigkeit des GPS-Signals ist der Ausfall der GPS-Ortung von größerer Bedeutung, insbesondere weil bei Radfahrern Zusatzinformationen von externen Sensoren fehlen, mit denen die Ortungsgenauigkeit verbessert oder ein Ortungsausfall kompensiert werden könnte. Zu solchen Informationen, die im

⁸⁵ Vgl. <http://www.quantenwelt.de/technik/GPS/almanach.html>.

⁸⁶ Vgl. US-Coast-Guard Navigation Center: <http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/sigspec/gpsps1.pdf>.

Kfz-Bereich genutzt werden, zählen beispielsweise Daten der Wegstreckemessung (Odometer) oder der Fahrzeugneigung (Gyroskop).

Ein Ausfall des GPS-Signals hat zwei mögliche Ursachen: Zum einen kann die Satellitenkonstellation so ungünstig sein, dass eine Positionsbestimmung nicht möglich ist, zum anderen kann eine Abschattung des Empfängers gegen den Horizont vorliegen.

Über gewisse Zeitbereiche hinweg kann die Verfügbarkeit an Satelliten bis hinunter auf fünf Satelliten reduziert sein. Als „verfügbar“ gelten Satelliten, die in einem horizontalen Winkel von minimal 10° zum Horizont stehen. Reduziert sich diese Anzahl durch ungünstige topografische Bedingungen (beispielsweise Berge oder Häuser) weiter, so ist möglicherweise keine Positionsbestimmung mehr erhältlich. Entsprechend ungünstige Konstellationen sind aber meist bereits nach wenigen Minuten wieder vorüber. Die Abfolge dieser Satellitenkonstellationen wiederholt sich – bedingt durch die Umlaufbahnen und -zeiten der Satelliten – täglich um etwa vier Minuten verschoben (siehe hierzu auch Abbildung 2-9).

Die zeitlich begrenzte Konstellation weniger sichtbarer Satelliten muss nicht zwingend zu einem Ausfall der Ortung führen, es kann sich auch lediglich eine Verschlechterung der Standortgenauigkeit ergeben.

Die zweite Ursache für Empfangsprobleme ergibt sich durch Abschattung des Gerätes, wie sie insbesondere beim Einsatz des GPS-Empfängers beim Radwandern auftritt. Bei stationär im Kfz verbauten Geräten ist die GPS-Antenne meist auf dem Dach montiert, wo eine freie Empfangbarkeit der Signale gewährleistet ist.

Auf dem Fahrrad muss das Gerät und dementsprechend auch die Antenne direkt am oder unmittelbar in der Nähe des Körpers getragen werden. Infolgedessen ergibt sich das Problem, dass bereits der eigene Körper einen recht großen Winkel aufspannt, in dem die Satellitensignale abgeschirmt werden. Damit stellt

sich die Frage, wo die Empfangsantenne oder GPS-Maus während der Rad-Wanderung befestigt werden sollte.

Es bietet sich die Nutzung von geeigneten Halterungen für das Navigationssystem an. Für die häufig genutzten PDAs existieren auf dem Markt eine Vielzahl von speziellen Halterungen, die auch am Fahrrad befestigt werden können. Problematisch ist aber auch hier die Befestigung der oft externen Antenne. Wesentlich besser geeignet erscheint die Konstruktion eines speziellen Gehäuses für das Navigationsgerät. Eine solche Lösung bietet zahlreiche Vorteile: Es können sämtliche Komponenten in einem Gehäuse bruchsicher und wasserdicht zusammengefasst werden. Außerdem kann ein spezieller Anschluss für eine autonome Stromversorgung über einen Nabendynamo vorgesehen werden, denn die begrenzte Einsatzdauer derzeitiger PDAs zeigt die Notwendigkeit einer solchen Lösung. Der Prototyp „MobiGuide“ zeigt die erfolgreiche Umsetzung eines entsprechenden Ansatzes. Der MobiGuide kann über den Anschluss an den Nabendynamo und eine integrierte Ladungskontrollschaltung permanent am Fahrrad genutzt werden. Wird das Gerät zwischendurch abgenommen und weiter genutzt, erfolgt bei der Weiterfahrt sogar ein Wiederaufladen des Gerätes.⁸⁷

3.3 Erzielbare Genauigkeit

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung unterliegt einem ständig schwankenden Fehler (vgl. hierzu auch Abbildung 3-3), der sich aus den verschiedensten Faktoren begründet. Geht man von einer Genauigkeit von 95 Prozent über einen Zeitraum von 24 Stunden aus, liegt die ermittelte Position des Empfängers in einem Kreis mit einem Durchmesser von ca. 30 Metern.

⁸⁷ Schönharting, J.; Tetzner, S.; Brandt, T.: Schlussbericht zum Verbundprojekt ArMont. Teil B: Konzept MobiGuide, S. 71.

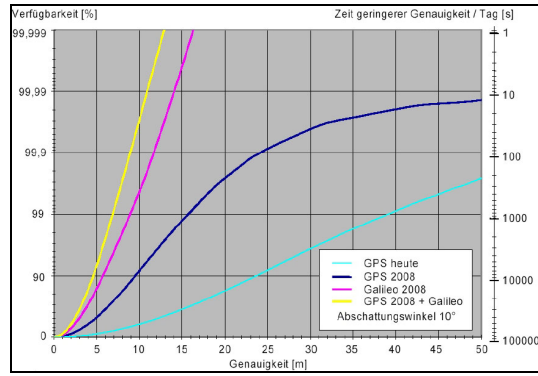


Abbildung 3-3: Genauigkeit verschiedener Global Positioning Systeme⁸⁸

Sind weniger als drei Satelliten erreichbar, ist eine eindeutige Bestimmbarkeit des Standortes nicht mehr möglich. Kann das Signal nur eines Satelliten empfangen werden, kann sich der Empfänger auf einer Kreishülle befinden, deren Durchmesser der Entfernung zum Satelliten entspricht.

Die Konstellation der Satellitenstandorte ist von besonderer Bedeutung, wenn der GPS-Empfänger keinen statischen, unbewegten Standort einnimmt (wie am Beispiel der Abbildung 3-4 gezeigt), sondern – beispielsweise in einem Fahrzeug – bewegt wird oder keinen rundum freien Sichtkontakt zum Horizont aufweist. Werden die Signale eines Satelliten z. B. durch Gebäude, Vegetation oder topografische Einflüsse (Einschnitte oder Anschnitte) abgedeckt, hängt die Qualität des GPS-Signals und damit die Genauigkeit bzw. die Möglichkeit der Standortbestimmung von den Signalen der übrigen Satelliten bzw. von ihrer Position ab. Die Positionsbestimmung wird in der Regel umso ungenauer, je mehr Satelliten verdeckt sind. Innerhalb von Gebäuden ist eine Positionsbestimmung nicht mehr möglich, weil vom Gerät keine Satellitensignale mehr empfangen werden können.

⁸⁸ Schlingelhof, M.: Ortungsverfahren, S. 22.

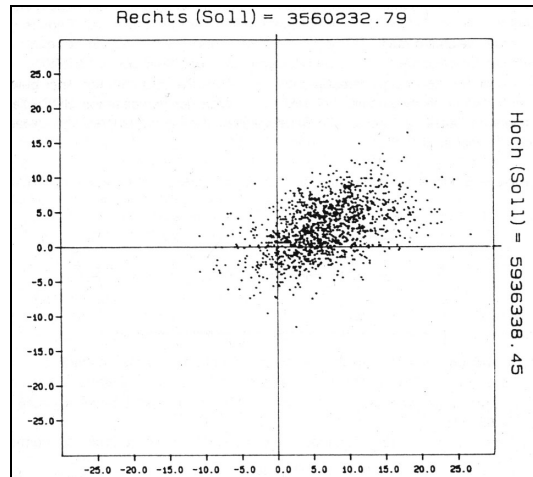


Abbildung 3-4: Punktwolke einer stationären Positionsbestimmung⁸⁹

Um die Qualität der GPS-Ortung eines Satellitenempfängers einschätzen zu können, bieten die meisten Geräte eine Information über die Anzahl der empfangbaren Satelliten an. Häufig werden die Satelliten auch bezeichnet, ihre räumliche Lage zum Standpunkt dargestellt und ihre Empfangsstärke angegeben. Einige Geräte zeigen zudem ein Maß für die Genauigkeit der Messwerte an, das als Kombination verschiedener Faktoren ermittelt wird. Dieser so genannte DOP-Wert (dilution of precision; Verschlechterung der Genauigkeit) gibt Auskunft über die Genauigkeit der Satellitenkonstellation; niedrige Werte (HDOP-Werte < 4) stehen für eine gute, hohe Werte für eine schlechte Positionsbestimmung. Dabei wird unterschieden nach den Berechnungsverfahren GDOP, PDOP, HDOP, VDOP und TDOP.⁹⁰

⁸⁹ Bauer, M.: Vermessung und Ortung mit Satelliten, S. 143.

⁹⁰ Vgl. <http://www.kowoma.de/gps/Fehlerquellen.htm>.

- GDOP (Geometric Dilution Of Precision): Gesamtgenauigkeit; 3D-Koordinaten und Zeit
- PDOP (Positional Dilution Of Precision): Positionsgenauigkeit; 3D-Koordinaten
- HDOP (Horizontal Dilution Of Precision): Horizontalgenauigkeit; 2D-Koordinaten
- VDOP (Vertical Dilution Of Precision): Vertikalgenauigkeit; Höhe
- TDOP (Time Dilution Of Precision): Zeitgenauigkeit; Zeit

Die HDOP-Werte sind abhängig vom Winkel gegen die Horizontale; schlechte Werte (beispielsweise HDOP-Wert > 8) ergeben sich, sobald die Satelliten in einem großen Winkel gegen den Horizont stehen. Bei den VDOP-Werten führen kleine Winkel zwischen Satellit und Horizont zu guten Werten. Die DOP-Werte werden zum Teil im NMEA-Protokoll (siehe Abschnitt 2.3.1) mit ausgegeben.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Genauigkeit des ermittelten Standortes ist der Breitengrad des Empfängers. Als Beispiel sei eine Satellitenaufzeichnung in Wuhan, V. R. China ($30,5^\circ$ nördlicher Breite) mit einer Aufzeichnung in der Casey-Station in der Antarktis ($66,3^\circ$ südliche Breite) verglichen. Die Abbildung 3-5 zeigt den Höhenfehler (anfangs mit eingeschalteter SA), aufgenommen im auf $30,5^\circ$ nördlicher Breite liegenden Wuhan mit einer quasi optimalen Satellitenkonstellation. Das zweite Diagramm stellt die zum gleichen Zeitraum aufgenommene Satellitenposition auf der Casey-Station in der Antarktis ($66,3^\circ$ südliche Breite) dar. Der größere Fehler in Casey ergibt sich

- aufgrund einer ungünstigeren geometrischen Lage, die eine schlechtere Konstellation zu den Satelliten bedeutet, und
- bedingt durch die größere Nähe zum Erdpol durch einen ungünstigeren Winkel für die Laufbahn der Satellitensignale, die somit für den Weg durch die Erdatmosphäre länger benötigen.

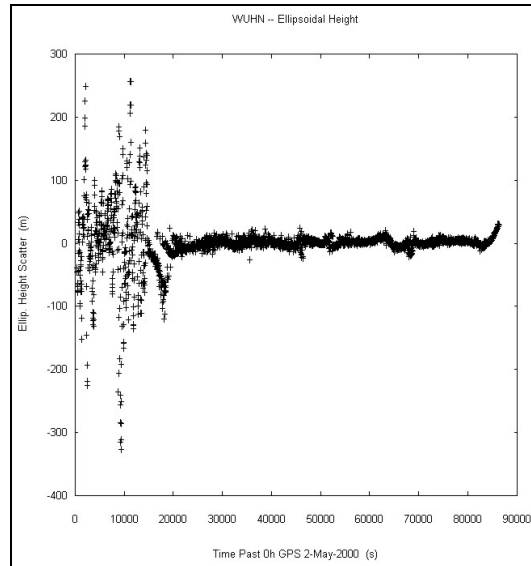


Abbildung 3-5: Genauigkeit abh. vom Breitengrad (Wuhan-China 31°N)⁹¹

⁹¹ http://www.ngs.noaa.gov/FGCS/info/sans_SA/world/wuhn.gif.

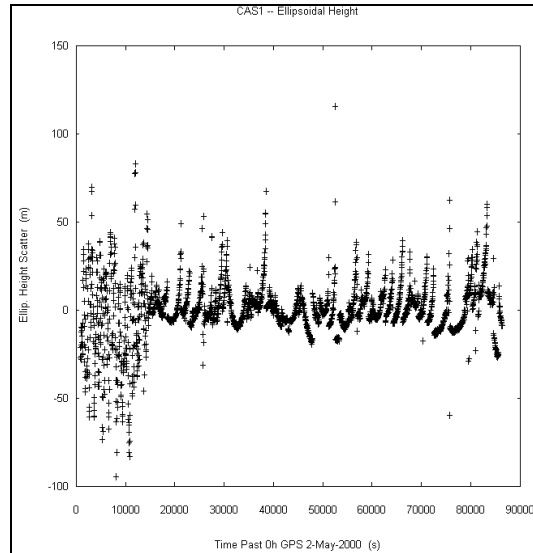


Abbildung 3-6: Genauigkeit abh. vom Breitengrad (Casey-Antarktis 66°N)⁹²

Die Genauigkeit der Aussage über die Standortposition eines GPS-Empfängers ist weniger von der technischen Präzision des GPS-Empfängers und seiner Software, als vielmehr von äußeren Störeinflüssen abhängig. Für die Genauigkeit der Ortung sind in erster Linie die Anzahl der Satelliten und ihre Stellungen, und daneben die Fehlerarten „Mehrwegeeffekt“, „atmosphärische Fehler“, „Uhrenfehler“ sowie „Rundungsungenauigkeiten“ verantwortlich. Beim Einsatz der verschiedensten Systeme konnten aber bei einigen Geräten große Ungenauigkeiten und hohe Ausfallraten beim GPS-Empfang beobachtet werden. Betroffen waren dabei vornehmlich Geräte mit älteren GPS-Chipsätzen.

⁹² http://www.ngs.noaa.gov/FGCS/info/sans_SA/world/cas1.gif.

Mehrwegeffekt

Der Mehrwegeffekt entsteht infolge der Reflexion der Satellitensignale an Objekten, insbesondere an hohen Gebäuden (siehe Abbildung 3-7) oder an sonstigen Erhebungen, beispielsweise in Einschnitten.

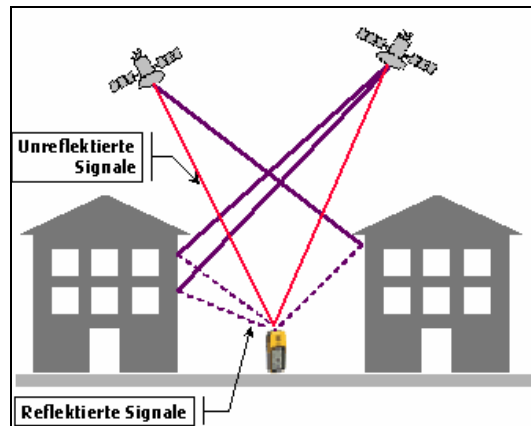


Abbildung 3-7: Mehrwegeffekt (Störungen durch Reflexion der Signale)⁹³

Durch die unterschiedliche Laufzeit zwischen dem vom Empfänger direkt empfangenen und dem von den Satelliten reflektierten Signal ergibt sich ein Fehler, der in der Größenordnung von mehreren Metern liegen kann.

Die Abschattung durch Gebäude oder Bäume führt bei der Standortbestimmung oft dazu, dass die Streuung des Fehlers nicht in alle Richtungen zufällig ist, sondern sich z. B. nur entlang der Ost-West-Achse bewegt. In der nachfolgenden Grafik ist die Verteilung des Satellitensignals bei einer stationären Messung unter dem Einfluss einer parallelen Abschirmung (z. B. Straßenschlucht) dargestellt. Die Standorte bewegen sich in der x-Achse über eine Bandbreite von 100 m, in der y-Achse beträgt die Schwankungsbreite dagegen nur etwa 20 m.

⁹³ <http://www.kowoma.de/gps/Fehlerquellen>.

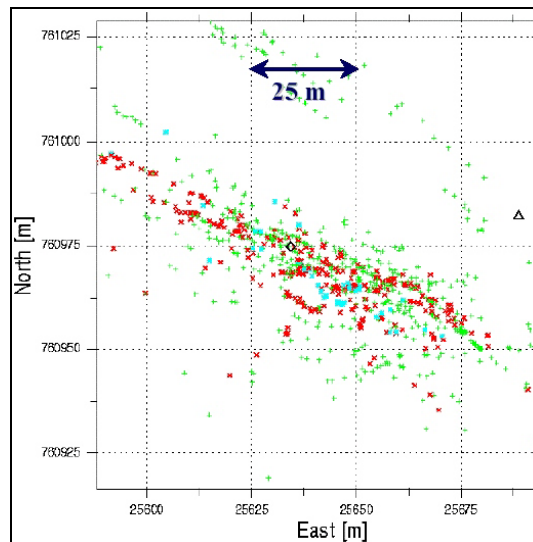


Abbildung 3-8: Beispiel für die Streuung des GPS-Signals⁹⁴

Atmosphärische Störeinflüsse

Signalungenauigkeiten entstehen auch durch atmosphärische Effekte in der Troposphäre (unterste Schicht der Atmosphäre in einer Höhe von 11 bis 16 km; Abbildung 3-9) und der Ionosphäre (Schichten ionisierter Luft in der Atmosphäre in einer Höhe von etwa 80 bis über 640 Kilometern)⁹⁵. Der Grund dafür ist, dass sich die im Weltall mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitenden Signale der Satelliten beim Durchqueren der Ionosphäre und der Troposphäre verlangsamen. Daraus ergibt sich eine erhöhte Laufzeit der Satellitensignale.

⁹⁴ Schlingelhof, M.: Ortungsverfahren, S. 25.

⁹⁵ Microsoft Encarta 2005.

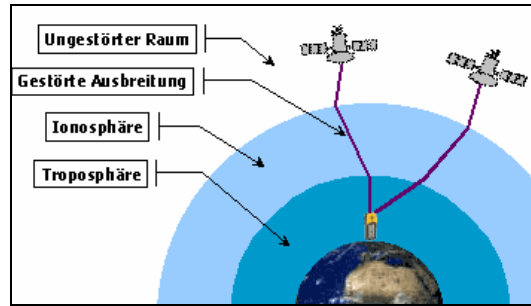


Abbildung 3-9: Atmosphärischer Effekt⁹⁶

Die atmosphärischen Fehler können im GPS-Empfänger rechnerisch weitgehend kompensiert werden, indem die bekannten Geschwindigkeitsabweichungen bei tiefen und hohen Frequenzen während der Ionosphärendurchdringung mit einbezogen werden. Darüber hinaus kann die Fehlerelimination auf Basis der unterschiedlichen Durchdringungszeiten der L1- und der L2-Signale (siehe Abschnitt 2.3.1) durch die Atmosphäre erfolgen.

Der Troposphärenfehler entsteht durch unterschiedliche Wasserdampfkonzentrationen innerhalb der Troposphäre. Die aufgrund variierender Wetterlagen unterschiedlich stark ausfallende Brechung der Radiowellen an den Wasserdampfteilchen sorgt für eine verlängerte Laufzeit der Signale. Der Troposphärenfehler fällt kleiner aus als der Ionosphärenfehler. Allerdings lässt er sich nicht herausrechnen und kann zur Fehlerelimination lediglich modellmäßig näherungsweise erfasst werden.

Uhrenungenauigkeit und Rundungsfehler

Als weitere Fehlerquelle verbleibt trotz der Synchronisierung der Satellitenuhr während der Positionsbestimmung die verbleibende Ungenauigkeit der Empfängeruhr. Der Fehler der Uhrenungenauigkeit der Satelliten beträgt bis zu zwei

⁹⁶ <http://www.kowoma.de/gps/Fehlerquellen>.

Meter Abweichung. Aufgrund von Rundungs- bzw. „Rechenfehlern“ der Empfänger ergibt sich eine weitere Ungenauigkeit in der Größenordnung von etwa einem Meter.

Zusammenfassung der Ungenauigkeiten durch Systemfehler

Die nachfolgende Tabelle zeigt eine Übersicht über die möglichen auftretenden Fehler eines Global Positioning Systems und ihre Größenordnungen. Die Fehlergrößen sind als Richtwerte zu verstehen, die aufgrund verschiedener Einflussfaktoren weiteren Schwankungen unterworfen sind:

Störungen durch Ionosphäre	$\pm 5,0$ m
Schwankungen der Satellitenumlaufbahnen	$\pm 2,5$ m
Uhrenfehler der Satelliten	$\pm 2,0$ m
Mehrwegeeffekte	$\pm 1,0$ m
Rechnungs-, Rundungsfehler	$\pm 1,0$ m
Störungen durch Troposphäre	$\pm 0,5$ m

Tabelle 3-1: Überblick über Fehlerarten und -größen des Global Positioning Systems⁹⁷

Aus der Addition der einzelnen Fehlergrößen kann ein systembedingter Gesamtfehler von ± 15 Metern resultieren. Tatsächlich werden sich i. d. R. aber einige Fehler durch wechselnde Vorzeichen eliminieren. Die Positionsbestimmung weicht in der Regel aber deutlich stärker als 15 m ab. Ursächlich sind u. a. die geringe Anzahl empfangener Satelliten bzw. die Abschattung des GPS-Signals. GPS-Empfänger mit Chipsätzen modernster Bauart, wie bei-

⁹⁷ Vgl. <http://www.kowoma.de/gps/Fehlerquellen.htm>.

spielsweise GPS-Empfänger mit der SiRFstar III-Architektur⁹⁸, sind in der Lage, auch bei starker Abschattung noch Satellitensignale zu empfangen, und erreichen daher höhere Genauigkeiten.

Vor der Deaktivierung der Selective Availability lag die Ungenauigkeit etwa in der Größenordnung ± 100 Meter.

Mit weiteren DGPS-basierten Korrekturmethode, beispielsweise dem nordamerikanischen System „Wide Area Augmentation System“ (WAAS; dt.: Erweiterungssystem für einen großen Bereich) und dem europäischen System „European Geostationary Navigation Overlay Service“ (EGNOS) können die auftretenden Fehlerarten – insbesondere der Ionosphärenfehler, aber auch der Fehler durch Umlaufbahnen und Uhrenungenauigkeiten – weiter reduziert werden. Dabei wird mit Hilfe von genau vermessenen Referenzstationen das Satellitensignal ausgewertet und der daraus berechnete Standort der Station mit dem tatsächlichen – präzise bekannten – verglichen. Aus den Differenzen können die verschiedenen Fehlergrößen berechnet und Korrekturdaten an die GPS-Empfänger gesendet werden.

Messung der Genauigkeit

Die Messung der Genauigkeit von Global Positioning Systemen gestaltet sich schwierig, eine zuverlässige Aussage ist in erster Linie bei einer stationären Messung, also an einem festen Ort, möglich. Der dort gemessene Fehler wird aber im Wesentlichen durch die Einflüsse des Umfeldes bestimmt. Stationiert man den GPS-Empfänger in freiem Gelände, also völlig ohne Sichtbehinderungen zum Horizont, verbleiben als Fehlerquelle die zeitliche Komponente, also die Stellung der Satelliten untereinander bzw. die Anzahl der sichtbaren Satelliten (die sich in ihrem zeitlichen Verlauf bestimmen ließe), Störungen durch die Iono- und die Troposphäre sowie Rechnungs- bzw. Rundungsfehler. Allerdings

⁹⁸ Vgl. <http://www.bgc.de/kunden/sirf/sirfstar3.htm>.

ist eine stationäre Messung ohne Störeinflüsse wenig aussagekräftig hinsichtlich der erzielbaren Genauigkeit der Standortbestimmung für einen Radfahrer während seiner Fahrt.

Für die Einschätzung der möglichen Genauigkeit von GPS allgemein wird auf Untersuchungen von BAUER⁹⁹ oder SPORENBERG¹⁰⁰ verwiesen.

Die während Testfahrten mit dem MobiGuide festgestellte Ungenauigkeit lag vereinzelt bei weit über 100 m. Empfänger moderner Bauart erzielen aber eine deutlich höhere Präzision.

Neben der Genauigkeit des empfangenen GPS-Signals ist für eine korrekte Darstellung des Standortes auf der Karte auch die Georeferenzierung der Karte selbst verantwortlich. Diese wird in der Regel über zwei bzw. drei Punkte, so genannte „Passkreuze“, in der Karte vorgenommen. Weicht auch nur eine der angegebenen Kartenkoordinaten von der tatsächlichen Koordinate ab, kommt es zu Unterschieden zwischen dem auf der Karte eingetragenen Standort, der aus den Satellitensignalen berechnet wurde, und dem realen Standort. Fehler ergeben sich auch, wenn zwar die Standorte an den georeferenzierten Punkten korrekt sind, die Karte aber verzerrt ist. Dieser Effekt kommt einerseits aufgrund der Projektion auf ein nationales Kartengitter (siehe in Abschnitt 2.3.2: „German Grid“) zu Stande, aber auch durch eine fehlerhafte Reproduktion (z. B. beim Einscannen) bzw. die digitale Erfassung fehlerhafter Vorlagen (feuchtes Papier). Eine digitale Karte gilt nach ZHAO als genau, wenn ihre Abweichung zur Realität unter 15 m liegt.¹⁰¹

⁹⁹ Vgl. Bauer, M.: Aktueller Stand und Modernisierungskonzepte der Satellitennavigation.

¹⁰⁰ Vgl. Sporenberg, R.: Genauigkeitsanalyse von GPS-Daten.

¹⁰¹ Vgl. Zhao, Y.: Vehicle Location and Navigation Systems.

Topografische Einflüsse auf die Genauigkeit

Die im Abschnitt „Mehrwegeffekt“ (s. o.) benannten Störeinflüsse auf die Exaktheit des empfangenen GPS-Signals sind in verschiedenen Feldversuchen analysiert worden. Hintergrund ist die Fragestellung, welche Situationen besonders häufig zu Ungenauigkeiten oder gar zu einem Ausfall des Signals führen.

Unterschieden wird nach den in der Tabelle 3-2 aufgeführten Störgrößen.

Wirkung: Ursache	Ungenauigkeit	Ausfall
Wald/Bäume	R,S	A,S
Berge/Schluchten	R,S	A,S
Häuser/Bebauung	R,S	A,S
Witterungseinflüsse (Nebel, Regen)	R	
Magnetfelder/Sender	R	
Atmosphäre	R	
Satellitenkonstellation	S	A
Fehlbedienungen	S	A

S: Menge verfügbarer Satelliten

R: Reflexion

A: Abschirmung

Tabelle 3-2: Störeinflüsse auf die GPS-Genauigkeit

Die Tabelle zeigt die Auswertung der Bedeutung der Umfeldeinflüsse des Standpunktes auf die Genauigkeit bzw. die Sicherheit der Signalverfügbarkeit. Zur Ermittlung des Einflusses verschiedener Umfelder auf die GPS-Genauigkeit

wurden insgesamt etwa 27.000 Datenpunkte von aufgezeichneten Touren in variierenden Umgebungen untersucht. Die Abweichung zwischen den als korrekt anzusehenden Sollwerten und den aus der Aufzeichnung stammenden Ist-Werten wurde als horizontale Abstandsermittlung über den Rechts- und den Hochwert (x- bzw. y-Komponente der Messung) vorgenommen. Zur Ermittlung der Sollwerte wurde die Route auf der digitalen topografischen Karte (Maßstab 1:10.000) eingetragen, wobei die fahrtrichtungsbezogene Wahl der Straßenseite mit einbezogen wurde. Dennoch ist die Ermittlung der Solltour mit einer nicht unerheblichen Ungenauigkeit behaftet, weil

- die Karte Ungenauigkeiten bzw. Unschärfen aufweist,
- Bögen im Wegeverlauf durch die abgesteckten Polygonzüge nicht vollständig erfasst werden,
- die exakte Fahrlinie des Nutzers im Nachhinein nicht rekonstruiert werden kann bzw. die im Vorfeld vorgegebene Fahrlinie vom Nutzer nicht immer eingehalten werden konnte.

Die Untersuchung wurde gegliedert in die Umfeldkategorien „Wald“, „Bebauung“, „Einschnitt“ und „Feld / frei“. Die Auswertungen wurden auf der Basis der digitalen TOP 10 vorgenommen, Mehrfachzuordnungen waren möglich. Ein Wechsel des Umfeldes wurde vorgenommen, sobald das Umfeld für mindestens drei aufeinander folgende Messpunkte konstant blieb (entsprechend etwa 50 m Länge). Unter „Feld / frei“ werden Bereiche verstanden, bei denen ungestörte Sicht zum Horizont zu einer oder beiden Seiten des Weges vorherrscht. Echte Einschnitte (Täler) wurden als „Einschnitt, beidseitig“, Anschnitte als „Einschnitt, einseitig“ charakterisiert.

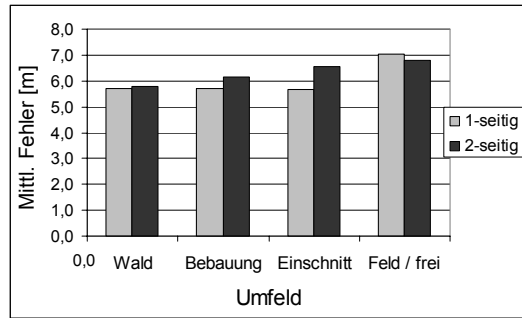


Abbildung 3-10: Genauigkeitsanalyse verschiedener topografischer Einflüsse

Die Ergebnisse (siehe Abbildung 3-10) zeigen, dass bei allen Sichtbehinderungen größere Messfehler vorliegen, sobald die Sichtbehinderungen beidseitig auftreten. Die Messfehler sind bei allen drei Störungen in etwa gleich groß, die Mittelwerte bewegen sich in einer Größenordnung zwischen fünf und sieben Metern. Auffällig ist, dass bei freier Sicht die Messfehler am größten sind. Als Ursache ist zu vermuten, dass die – aufgrund der längs des Weges liegenden Hindernisse – entstehende Reflexion der GPS-Signale zu einer genaueren Ortung führt als ohne diese Reflektoren. Denkbar ist auch, dass Wege ohne seitliche Hindernisse breiter sind, sodass die Fahrlinie des Nutzers von der vorgegebenen Solllinie stärker abweicht.

In der Auswertung wurde auch ermittelt, wie die mittlere Abweichung der Position von der Anzahl der empfangbaren Satelliten abhängt. Wie zu erwarten, ist die Positionsbestimmung mit zunehmender Anzahl der empfangenen Satelliten genauer. Die Anzahl der empfangbaren Satelliten könnte dementsprechend als ein Maß für die Genauigkeit der Ortung angesehen werden, um ggf. einen optimierenden Algorithmus einzusetzen.

3.4 Ausfallhäufigkeiten und -wahrscheinlichkeiten

Während ein fehlerhaftes GPS-Signal nur über geeignete Algorithmen und bei Vorliegen entsprechender Randbedingungen (z. B. Vorliegen des Wegenetzes im System) erkannt werden kann, kann ein GPS-Ausfall eindeutig und unverzüglich detektiert werden.

Anhand der Aufzeichnungen während zehn verschiedener Touren wurde der zeitliche Verlauf der Ausfälle des GPS-Signals untersucht. Um den Einfluss von deterministischen Fehlern¹⁰² auszuschließen, wurden die Touren zu Fuß, mit dem Fahrrad und per Pkw zurückgelegt. Es wurden verschiedene Tourlängen, Tageszeiten und (jahreszeitliche) Witterungen gewählt. Die GSP-Ausfälle wurden hinsichtlich ihrer Dauer und ihrer Häufigkeit ausgewertet. Insgesamt ergab sich dabei das in der nachstehenden Abbildung dargestellte Bild:

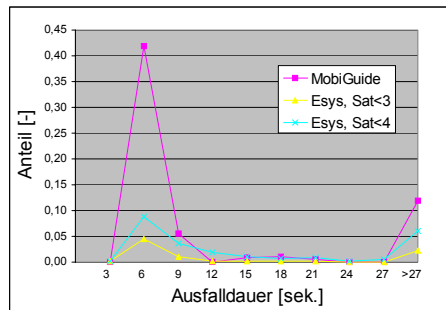


Abbildung 3-11: Häufigkeit und Dauer von GPS-Ausfällen¹⁰³

¹⁰² Deterministische bzw. systematische Fehler beschreiben die einseitige Abweichung von Messgrößen gegenüber ihrem Erwartungswert. Bei stochastischen bzw. zufälligen Fehlern folgt die Verteilung der Fehler dagegen zumeist einer Normalverteilung.

¹⁰³ Eigene Untersuchungen mit dem Datenlogger und dem MobiGuide an einer beispielhaften Radtour.

Da die Aufzeichnung des GPS-Signals im 3-Sekunden-Takt erfolgt ist, sind die Ausfalldauern alle ein Vielfaches von 3. Die „Ausfalldauer 3 Sekunden“ bedeutet, dass in einer Serie von GPS-Signalen mit einer Taktzeit von 3 Sekunden zwischenzeitlich ein einzelner Impuls ausfällt.

Die Ausfalldauern des GPS-Signals sind die auf die Gesamtdauer der Messung bezogenen Zeitanteile. In der Klasse „> 27“ sind Ausfalldauern von bis zu 382 Sekunden enthalten.

In der Abbildung 3-11 sind die Ausfallhäufigkeiten der entsprechenden Ausfalldauern des GPS-Signals dargestellt. Es wurden die Ergebnisse für die eingesetzten Geräte „MobiGuide“ und „Datenlogger“¹⁰⁴ gegenübergestellt. Da in den Aufzeichnungsprotokollen des verwendeten Datenloggers beim Ausfall des GPS-Signals eine Positionsbestimmung algorithmisch aus den zurückliegenden Positionen ermittelt wird, also nicht durch das Fehlen eines Standortdatums bemerkbar wird, ist die Bestimmung des Ausfalls der Standortbestimmung hierbei über die Anzahl der empfangenen Satelliten vorgenommen worden. Eine Standortbestimmung kann durchgeführt werden, wenn mindestens die Signale dreier Satelliten vom GPS-Empfänger ausgewertet werden können. Da die Positionsbestimmung beim Empfang von drei Satelliten noch sehr ungenau sein kann bzw. wesentlich von der Stellung der Satelliten zum Horizont und untereinander abhängig ist, sind für den Datenlogger zwei verschiedene Ausfallraten für die Simulation verwendet worden: Im ersten Fall wurden alle GPS-Signale als gültig angesehen, in denen mindestens drei GPS-Satelliten empfangen wurden. Im zweiten Fall wurden nur Signale als gültig angesehen, in denen mindestens Signale von vier Satelliten empfangen wurden.

Das Ergebnisse der Auswertung zeigen, dass insbesondere beim MobiGuide während der Testfahrten zahlreiche Ausfälle des GPS-Signals zu verzeichnen waren. Während etwa 17 % der Zeitspanne waren Ausfalldauern bis zu 6 Sekunden zu verzeichnen. Bei dem eingestellten Messintervall von 3 Sekunden

¹⁰⁴ Zum Einsatz kam der Datenlogger „GPSHand“ der Firma Esys.

bedeutet dies einen einzelnen Ausfall einer Messung von im Mittel 4,5 bis unter 7,5 Sekunden. Die entsprechenden Ausfalldauern beim Datenlogger waren mit etwa 5 % (< 3 Satelliten) bzw. 8 % (< 4 Satelliten) deutlich kleiner. Bei den Ausfalldauern zwischen 6 und 27 Sekunden Länge waren keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden verwendeten Systemen feststellbar. Die Ausfalldauern größer als 27 Sekunden waren beim MobiGuide weitaus häufiger als beim Datenlogger; vereinzelt wurden Zeitphasen ohne GPS-Signal von über 6 Minuten Dauer verzeichnet.

Die beobachtbaren Ausfallraten bei den eingesetzten GPS-Systemen weisen auf die Notwendigkeit einer ersatzweisen Positionsbestimmung bei Radfahrer-navigationsystemen hin. Anderenfalls führt ein Ausfall des GPS-Signals größerer Dauer zu einer Unsicherheit des Nutzers über seinen wahren Standort und den ggf. erforderlichen Abbiegeentscheidungen.

4 Zur Wahrscheinlichkeit, sich bei einer Radtour zu verfahren

4.1 Hintergrund

Grundlage einer optimierten Zielführung ist neben der Untersuchung der Genauigkeit der Zielführung, die im Abschnitt 3.4 behandelt wurde, die Frage, wie sich Nutzer im Netz verhalten. Diese Betrachtung ist Kern für eine Wirkungsanalyse, die das Potenzial einer optimierten Standortbestimmung beschreibt.

Ausgangspunkt ist das Verhalten des Nutzers auf einer Tour ohne GPS-Unterstützung, also bei Nutzung der konventionellen Karte. Als Vorstufe könnte man zwar die Fahrt ohne Karte ansehen, diese würde aber weitgehend einer zufälligen Bewegung durch das Netz entsprechen und ist daher als realitätsfern anzusehen. Die Fahrt eines Nutzers entlang einer geführten bzw. beschilderten Route soll in dieser Arbeit nicht in Betracht gezogen werden. Für entsprechende Routen ist keine GPS-Unterstützung erforderlich, die Präzision der korrekten Routenwahl ist i. d. R. abhängig von der vor Ort vorzufindenden Beschilderung. In der zweiten Stufe wird das Verhalten eines Nutzers mit GPS-Unterstützung betrachtet, die aber fehlerbehaftet ist. Die Fehler ergeben sich durch Signalausfälle und Ungenauigkeiten der Ortung (siehe Kapitel 3). Diese Fehler führen zu Situationen beim Nutzer, in denen er quasi unter Unsicherheit fährt, weil ihm sein Standort nicht exakt bekannt ist.

Im dritten Schritt wird die Fahrt mittels optimiertem GPS betrachtet. Zur Anwendung kommen die im Kapitel 6 entwickelten Optimierungsalgorithmen.

Eine besondere Beeinträchtigung erfährt ein Nutzer bei Ausfall des GPS-Signals, weil keine Zielführung mehr möglich ist. Daher wird das Verhalten des Nutzers untersucht, dem kein GPS zur Verfügung steht bzw. der auf ein fehlerhaftes GPS-Signal zurückgreifen muss. Die Untersuchung stützt sich

- auf die Untersuchung des Fahrverhaltens von Nutzern im Netz,
- auf eine anschließende Befragung der Nutzer sowie

- auf Simulationen von Fahrten in zwei verschiedenen Arten von Modellnetzen.

Für die Analyse des Fahrverhaltens von Nutzern während ihrer Fahrt mit Karte wurden Radfahrer mit einer Fahrradkarte (ohne GPS) auf eine vorgegebene Route geschickt, die es abzufahren galt. Ihre Fahrten wurden mittels Aufzeichnung der GPS-Signale während der Fahrt im Sekundentakt protokolliert und das Verhalten ausgewertet (vgl. Abschnitt 4.2.2). Im Anschluss an die Fahrten wurden die Nutzer zudem über ihre Erfahrungen befragt (siehe Abschnitt 4.2.3).

Die Beobachtung der Nutzer mit (fehlerbehaftetem bzw. optimiertem) GPS ist nicht ohne Weiteres realisierbar. Im wesentlichen liegt dies daran, dass eine Prüfung, ob dem Nutzer während der Fahrt ein GPS-Signal zur Verfügung steht, nicht eindeutig möglich ist. Um die Auswirkungen einer ungenauen Standortbestimmung auf den Fahrtverlauf eines Nutzers ermitteln zu können, wurde eine Untersuchung über die Häufigkeit durchgeführt, mit der sich Nutzer bei Radrouten verfahren, weil ihnen kein GPS-Signal zur Verfügung steht. Eine solche Auswertung kann mittels zweier unterschiedlicher Ansätze durchgeführt werden:

- Die Wahrscheinlichkeit für ein Fehlrouting wird stochastisch ermittelt.
- Es wird das Verhalten des Nutzers in einem Netz simuliert.

In der vorliegenden Arbeit ist die Simulation von Fahrten im Netz vorgenommen worden. Zu diesem Zweck wurde ein Netz nachgebildet, das in etwa der Geometrie eines Ausschnittes aus dem Radwegenetz der Stadt Essen entspricht und als „virtuelles Netz“ bezeichnet wird (siehe Abschnitt 4.3).

Da das Verhalten des Nutzers unter Unsicherheit von zahlreichen Faktoren abhängt, werden die simulierten Fahrten für eine Bandbreite unterschiedlich „informierter“ Nutzer durchgeführt. Es handelt sich hierbei also weder um die deterministische Bestimmung von Verteilungen im Netz, bei denen die Entscheidungen über statistische Kenngrößen vorgegeben sind, noch um ein rein stochastisches Verfahren, bei denen die Abbiegeentscheidungen über Wahr-

scheinlichkeiten festgelegt werden. Zur Nachbildung des Ausfalls des GPS-Signals wurde auf die empirisch erhobene Gesamtheit der Daten aus verschiedenen Geräten zurückgegriffen.

Im Anschluss an die Simulationen wird versucht, diesen „virtuellen“ Nutzer anhand der aus den Beobachtungen gewonnenen Erkenntnisse einzuordnen.

Da die Simulationsergebnisse im virtuellen Netz nicht zufriedenstellend waren, wofür die Struktur des Netzes maßgebend ist, wurde für die weiteren Simulationen auf ein nahezu vollständiges Netz der Stadt Essen zurückgegriffen, das neben den Knoten auch Stützpunkte und Höhenkoordinaten beinhaltet (vgl. Abschnitt 4.4).

Abschließend wird der Frage nachgegangen, wie Ungenauigkeiten der Standortbestimmung von unterschiedlichem Umfang sich auf die Anzahl potenzieller Standorte auswirken (Abschnitt 4.5). Damit kann in Abhängigkeit mit der Qualität der entwickelten Algorithmen die Wahrscheinlichkeit für korrekte Abbiegeentscheidungen ermittelt werden.

4.2 Verhalten des Nutzers ohne GPS in einem realen Netz

4.2.1 Modellnetz

Zur Analyse des Verhaltens von Radfahrern entlang einer Tour wurde eine Referenzstrecke von zwölf Probanden mit dem Fahrrad befahren. Da es sich fast in vollem Umfang um eine ausgewiesene Tour aus einem Radroutenführer handelt, weist sie eine gewisse Homogenität hinsichtlich ihrer Charakteristika auf, was z. B. die Linienführung, das Umfeld und das Höhenprofil angeht. Die Tour ist an der Strecke nicht ausgeschildert. Der Schwierigkeitsgrad für die korrekte Zielfindung durch einen Nutzer anhand einer geeigneten Karte als eher niedrig einzuschätzen.

Die Probanden waren im Alter zwischen etwa 20 und 40 Jahren, zu etwa gleichen Teilen männlich oder weiblich und mit höherem Schulabschluss. Die Ortskenntnis aller Nutzer war eher gering ausgeprägt.

Aufgabe der Nutzer war es, die Route anhand von zwei zur Verfügung stehenden Karten in vorgegebener Fahrtrichtung zu befahren. Bei den Karten handelte es sich zum einen um einen Ausschnitt aus der Topografischen Karte im Maßstab 1:10.000¹⁰⁵, zum anderen um die Fahrradkarte von Essen im Maßstab 1:20.000¹⁰⁶. Der Startpunkt entlang der Tour, die Startzeit und die Fahrgeschwindigkeit konnten von den Testpersonen frei gewählt werden. Die Tour konnte alleine oder mit anderen – ortsunkundigen – Mitfahrern absolviert werden. Die gesamte Tour wurde mit einem Datenlogger im 2-sek.-Intervall aufgezeichnet. Nach der Tour wurde jedem Fahrer ein Fragebogen zur Beantwortung vorgelegt.

4.2.2 Beobachtung

Die aufgezeichneten Tracks (s. o.) wurden hinsichtlich folgender Kriterien ausgewertet:

- Wie oft hat sich der Proband verfahren?
- Wie viele Netzknoten bzw. Streckenkilometer der geplanten Strecke hat der Proband befahren, wie viele nicht befahren?
- Wie viele zusätzliche Netzknoten, Streckenkilometer und Höhenmeter hat der Proband passiert bzw. zurückgelegt?
- Wie oft wurden Pausen gemacht, um sich zu orientieren?
- Wie hoch ist der Anteil dieser Standzeiten?
- Wie hat sich der Fahrer verhalten, nachdem er von der geplanten Route abgekommen ist?

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte weitgehend manuell und in Rücksprache mit den Fahrern, um bestimmte Aspekte korrekt interpretieren zu können. Dazu zählt beispielsweise die Frage, ob Standzeiten beabsichtigt waren (Pau-

¹⁰⁵ Landesvermessungsamt NRW: CD-ROM TOP 10 NRW.

¹⁰⁶ Stadt Essen: Amtliche Fahrradkarte Essen.

sen) oder aus Gründen der Orientierung entstanden sind. Nachträglich nicht berücksichtigt werden konnten Verzögerungen aufgrund von Verkehrssituationen, wie z. B. durch Sperrzeiten an Lichtsignalanlagen oder Vorrangpflichten. Der Anteil solcher Wartezeiten ist aber aufgrund des durchweg verkehrssarmen Charakters der Streckenführung als gering einzustufen.

Ergebnisse

Von den zwölf Fahrten waren neun vollständig; in einem Fall wurde die Strecke bewusst verkürzt, in den anderen beiden Fällen wurde die GPS-Aufzeichnung verspätet bzw. gar nicht gestartet. Die Ergebnisse der beiden unvollständigen Aufzeichnungen wurden auf die gesamte Tourlänge hochgerechnet, um die Ergebnisse besser vergleichbar zu machen, so dass sich ein Stichprobenumfang von elf Probanden ergibt.

Die Ergebnisse variieren zum Teil recht deutlich. Keiner der Fahrer hat die aus 175 Kanten bestehende, 23,6 km lange Tour fehlerfrei befahren (für die kompletten Ergebnisse siehe Anhang A-2).

Der Anteil der korrekt befahrenen Kanten (siehe Tabelle 4-1) streut von 111 bis 174 Kanten. Dies entspricht Kantenbefahrungsanteilen¹⁰⁷ von 63 bis 99 % bezogen auf die 175 Sollstrecken, der Mittelwert liegt bei 89 %.

Die Anzahl der außerhalb der geplanten Tour liegenden Strecken reicht von 3 bis 120 zusätzlichen Strecken (Mittelwert 38), dies entspricht – bezogen auf die geplante Kantenanzahl – einem Mehr zwischen 2 und 69 % (im Mittel 22 % zusätzlicher Kanten).

¹⁰⁷ Im Folgenden wird auch von „Kantendeckungsgrad“ gesprochen.

N = 11 [Anzahl Kanten]	Kanten innerhalb der Solltour	Kanten außerhalb der Solltour
	Optimum	175
Mittelwert	156	38
Standardabweichung s	21	32
Minimum	111	3
Maximum	174	120

Tabelle 4-1: Verteilung der gefahrenen Mehr- und Minderkanten

Da die Netzkanten nicht alle dieselbe Länge aufweisen, weicht die Verteilung der tatsächlich gefahrenen Längen etwas von der Verteilung der gefahrenen Kanten ab (vgl. Tabelle 4-2). Es wurden zwischen 14,9 und 23,4 der insgesamt 23,6 km langen Strecke befahren (entsprechend 63 bis 99 %). Der Mittelwert der innerhalb der Solltour zurückgelegten Streckenlänge beträgt 21,5 km, die Standardabweichung 2,5 km.

Dagegen wurden abseits der geplanten Tour zusätzliche Strecken im Umfang von 0,4 bis 13,1 km gefahren (dies ist – bezogen auf die Solllänge von 23,6 km – ein „Mehr“ von 2 bis 55 %). Der Mittelwert der zusätzlichen Strecken beträgt 4,9 km, die Standardabweichung 3,7 km.

N = 11 [km]	Länge innerhalb der Solltour	Länge außerhalb der Solltour
	Optimum	23,6
Mittelwert	21,5	4,9
Standardabweichung s	2,5	3,7
Minimum	14,9	0,4
Maximum	23,4	13,1

Tabelle 4-2: Verteilung der gefahrenen Mehr- und Minderstreckenlänge

Infolge der Kompensation von Mehr- und Minderkilometern ergeben sich hinsichtlich der insgesamt zurückgelegten Streckenlängen im Verhältnis zur geplanten Streckenlänge nur recht geringe Abweichungen nach oben, bzw. in einem Fall nach unten: Die Gesamtstrecke der Probanden variiert zwischen 23,3 und 31,2 km. Der Mittelwert der gefahrenen Streckenlängen beträgt 26,4 km, die Standardabweichung 2,6 km. In der Abbildung 4-1 sind die Mehrstrecken außerhalb der Tour auf der Abszisse sowie die Minderstrecken im Bereich der Tour auf der Ordinate abgetragen. Die Kennwerte einer Regressionsanalyse können mit $b = 0,49$ und $a = -0,29$ für die Funktion $y = a + bx$ bei einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,72$ beschrieben werden, ein mittlerer linearer Zusammenhang ist also erkennbar. Die Minderstrecke entlang der Solltour ergibt sich aus der Differenz der Solltourlänge und der befahrenen Netzkanten entlang dieser Strecke. Es wird erkennbar, dass sich nur ein Fahrer im Bereich des Optimums im Koordinatenursprung bewegt. Die übrigen zehn Touren weisen mehr oder weniger große Abweichungen gegenüber der vorgesehenen Streckenführung auf.

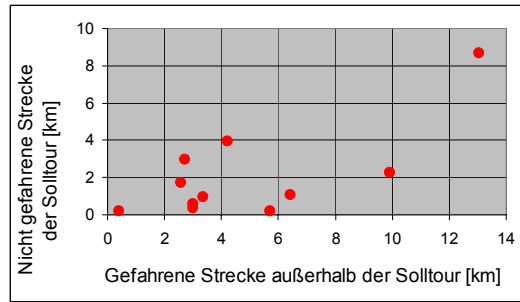


Abbildung 4-1: Verteilung der Minderstrecken entlang und der Mehrstrecken außerhalb der Tour

Insgesamt zeigt das Ergebnis, dass die Probanden teilweise eine deutlich – bis zu einem Drittel – längere Strecke zurückgelegt haben, als geplant. Dabei wurde ein erheblicher Anteil der geplanten Strecke gar nicht befahren. Dafür wurden von der Sollroute abweichende Wege gewählt, die länger waren als die geplanten Abschnitte.

Auch wenn der Routenverlauf relativ steigungsarm ist, ist neben der zusätzlich zurückgelegten Streckenlänge auch das Mehr an Steigungsmetern von Interesse. Es zeigt sich, dass vier Kandidaten weniger, die anderen sieben Kandidaten dagegen mehr Steigungsmeter zu überwinden hatten. Die durchschnittliche Steigungsmeterreduktion liegt bei -20,51 m, die durchschnittliche Steigungsmetererhöhung bei +27,38 m. Der mittlere Anstieg der gefahrenen Steigungsmeter über alle elf Touren beträgt +9,97 m, also etwa 5 % mehr als geplant. Das Ergebnis ist aufgrund der topografisch wenig bewegten Lage der Tour nur sehr gemäßigt ausgefallen, in bergigen Bereichen ist eine ausgeprägte Zunahme der zurückzulegenden Steigungsmeter zu erwarten.

Die Reisezeiten¹⁰⁸ der Touren liegen zwischen 92 und 230 min. (Mittelwert 153 min., Standardabweichung 45 min.). Die ermittelten Reisegeschwindigkeiten (bezogen auf die tatsächlich gefahrene Strecke) bewegen sich zwischen 8,1 und 16,0 km/h ($\bar{x} = 11,1$ km/h, $s = 2,8$ km/h). Trotz der steigungsarmen Streckenführung und der typischen Tourcharakteristik der Strecke sind die gefahrenen Durchschnittsgeschwindigkeiten deutlich niedriger als die erwarteten 18 km/h (siehe auch Abschnitt 5.2 und Abbildung 2-7).

Bedeutsam für den Erholungscharakter einer Radtour ist u. a. die Anzahl der Halte und der Umfang der Standzeiten, die entstehen, wenn der Nutzer sich auf der Karte orientiert. Die Auswertung dieser beiden Kenngrößen ergibt, dass sowohl die Anzahl der Halte als auch die Standzeiten äußerst hoch sind.

In der Abbildung 4-2 sind die Anzahl der Halte > 6 sek. (rosa Kreise) bzw. die Standzeiten (grüne Quadrate) der Gesamtstrecke abseits der Solltour gegenübergestellt. Die gefahrene Strecke außerhalb der Solltour stellt damit quasi einen Indikator für die Fähigkeit des Nutzers dar, die korrekte Route zu fahren. Die Betrachtung der Halte ab einer Wartezeit größer als 6 Sekunden ist notwendig, um Zeitabschnitte auszuschließen, die keine Standzeiten sind, sondern Ungenauigkeiten des GPS-Empfangs abbilden.

¹⁰⁸ Die Reisezeiten stellen die Differenz aus Ankunft- und Startzeit dar; Zeiten für eventuelle Pausen wurden herausgerechnet.

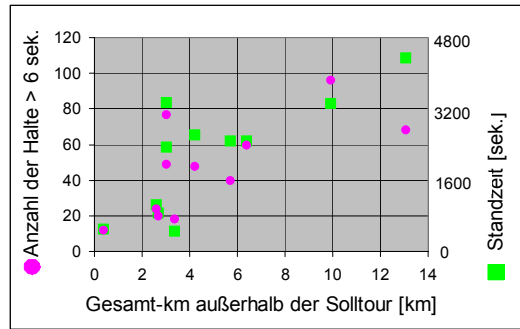


Abbildung 4-2: Anzahl der Halte in Relation zur Streckenlänge außerhalb der Solltour

Aus der Grafik wird deutlich, dass sowohl die Zahl der Halte als auch die Standzeiten prinzipiell umso größer sind, desto stärker der Anteil fehlerhaft befahrener Streckenanteile des Probanden ist. Die Anzahl der Halte weisen eine Bandbreite von 12 bis 96 Halte ($\bar{x} = 47$, $s = 27$) auf (siehe Tabelle 4-3). Die Anzahl der Halte pro gefahrener Kante liegt danach zwischen 0,07 und 0,45, das entspricht einem zur Orientierung notwendigen Halt zwischen jeder zweiten und vierzehnten Kante. Bezogen auf die Fahrkilometer bzw. die Fahrzeit haben die Fahrer im Durchschnitt alle 810 m bzw. alle 245 Sekunden angehalten, um auf der Karte die weitere Routenführung abzulesen. Es konnten schwache lineare Zusammenhänge in Bezug auf die „Gesamtkilometer außerhalb der Solltour“ für die Anzahl mit $r = 0,35$ ($b = 5,07$; $a = 21,55$) und für die Standzeit mit $r = 0,39$ ($b = 274,0$; $a = 810,3$) beobachtet werden.

N = 11	Anzahl der Halte > 6 sek.	Standzeit [sek.]
Optimum	0	0
Mittelwert	47	2162
Standardabweichung s	27	1286
Minimum	12	450
Maximum	96	4341

Tabelle 4-3: Verteilung der Anzahl der Halte und der Standzeiten

Der Anteil der Standzeiten an den Reisezeiten beträgt im günstigsten Fall 7 %, im ungünstigsten Fall 37 %. Ein Standzeitanteil von 37 % bedeutet, dass der Fahrer mehr als ein Drittel seiner Reisezeit mit dem Lesen der Karte zugebracht hat.

Insgesamt ergibt sich aus der Analyse des Verhaltens während der Befahrungen, dass eine Fahrt oft unterbrochen werden muss, damit der Fahrer sich auf der Karte über seine Weiterfahrt orientieren kann. Die Anzahl der Halte ist beträchtlich, im ungünstigsten Fall musste ein Fahrer an jedem zweiten Knoten stoppen.

Die Zusammensetzung der untersuchten Personengruppe und der recht einfache Verlauf der Tour lässt vermuten, dass die Ergebnisse nicht repräsentativ für das Verhalten von Nutzern auf Radtouren sind, sondern zu günstig bewertet werden. Die Unterstützung von Radwanderern durch ein Navigationssystem scheint daher geboten.

4.2.3 Befragung

Die Befragung der zwölf Fahrer fand jeweils unmittelbar im Nachgang zur Befahrung statt, damit sich der Proband noch gut an die gefahrene Tour und seine Eindrücke erinnern konnte. Der Fragebogen ist als Anhang A-1 abgebildet.

Ziel der Befragung war es, die so genannten „weichen“ Bewertungsfaktoren zu ermitteln, die nicht direkt messbar sind, sondern sich aus den Eindrücken und Erlebnissen der Probanden ergeben. Dazu zählen im Wesentlichen der Erlebnischarakter, also z. B.

- in welchem Maße der Fahrer Spaß beim Zurücklegen der Tour hatte,
- ob der Erlebnischarakter infolge des Orientierens an Kreuzungspunkten eingeschränkt war,
- wie oft sich der Proband verfahren hat (um im Vergleich mit der Aufzeichnung zu erkennen, ob eine Diskrepanz zwischen tatsächlichem und wahrgenommenen Verfahren vorliegt),
- ob der Erlebnischarakter infolge falscher Wegewahl gesunken ist.

Neben den demographischen Daten wurden die Probanden nach ihrer Erfahrung im Umgang mit Karten befragt, um zu prüfen, ob die Ergebnisse ihrer Befahrung damit korrelieren. Außerdem sollten sie Auskunft geben, wie sie im Falle des Abkommens von der Strecke die Tour bevorzugt fortgesetzt haben. Abschließend sollte die benutzte Kartenform angegeben und hinsichtlich ihrer Brauchbarkeit beurteilt werden.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Befragung sind zunächst einmal eigenständig und anschließend im Zusammenhang mit den Beobachtungen der Befahrung bewertet worden. Dadurch kann überprüft werden, inwieweit die Einschätzungen der Be-

fragten mit dem tatsächlichen Ablauf ihrer Fahrt korrelieren. Die vollständigen Ergebnisse der Befragung finden sich im Anhang A-3.

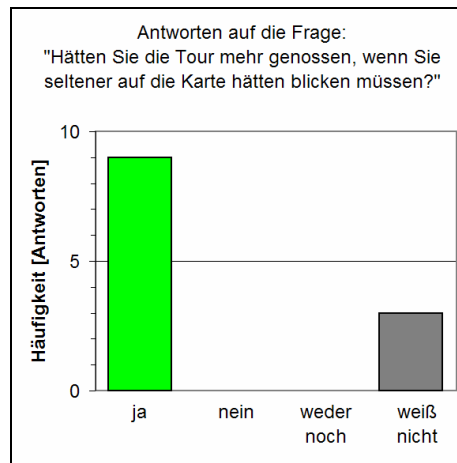


Abbildung 4-3: Antworten auf die Frage nach dem besseren Erholungswert bei Reduzierung der Orientierung anhand der Karte

Der Erholungswert der Tour wurde von nahezu allen Kandidaten als „mittel“ eingestuft, drei Befragte schätzten ihn „hoch“ ein. Neun Probanden gaben an, dass die Tour erholsamer gewesen wäre, wenn sie nicht so viel auf die Karte hätten schauen müssen; drei Personen konnten dazu keine konkrete Aussage machen (siehe Abbildung 4-3).

Weniger einheitlich sind die Ergebnisse auf die Frage nach dem Mehrwert der Tour bei einer geringeren Rate an Fehlfahrten ausgefallen (siehe Abbildung 4-4). Aus diesen Ergebnissen lässt sich schließen, dass die befragten Fahrer das ständige Suchen des Weges und Orientieren auf der Karte als störender empfunden haben, als die Fehlentscheidungen selbst.

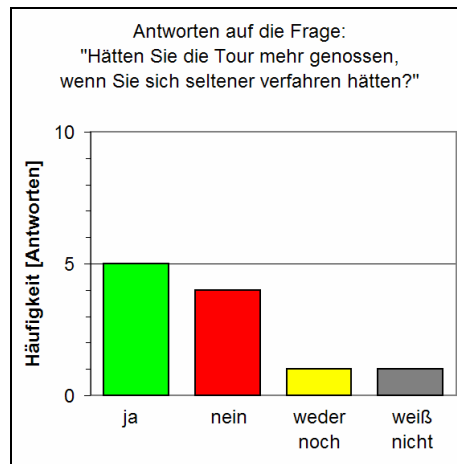


Abbildung 4-4: Antworten auf die Frage nach dem besseren Erholungswert bei Reduzierung der Fehlentscheidungen¹⁰⁹

Von Interesse ist die Frage, ob der Mehrwert an Erholung insbesondere für diejenigen Fahrer bestanden hätte, die sich besonders häufig verfahren haben. Die Auswertung zeigt, dass eine leichte Tendenz diesbezüglich auftritt: Die Fahrer, die auf diese Frage mit „Ja“ geantwortet haben, weisen im Schnitt 11,6 Fehlentscheidungen auf, diejenigen mit „Nein“ nur 8,3 Fehlentscheidungen.

¹⁰⁹ Eine Person hat bei dieser Frage keine Antwort gegeben.

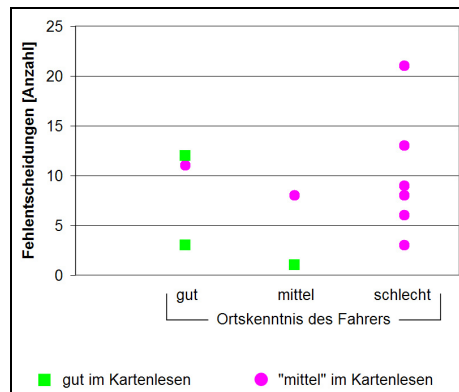


Abbildung 4-5: Zusammenhang zwischen Ortskenntnis bzw. Kartenerfahrung des Fahrers und Fehlentscheidungsrate

Ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Ortskenntnis des Fahrers und seiner korrekten Wegewahl bzw. zwischen seiner Kartenerfahrung und der Anzahl seiner Fehlentscheidungen ist aufgrund der geringen Stichprobe nur ansatzweise erkennbar (siehe Abbildung 4-5). Prinzipiell ist aber eine korrekt gefahrene Tour umso häufiger, je besser der Fahrer mit Karten vertraut bzw. desto höher seine Ortskenntnis ist.

Bei der Frage nach der eigenen Einschätzung zur korrekten Wegewahl wurde einmal die Antwort „nicht verfahren“ bzw. in zwei Fällen „1-2 Mal verfahren“ gegeben. In allen drei Fällen wurde damit eine zu günstige Einschätzung der tatsächlichen Wegewahl gegeben. Die übrigen Antworten „mindestens 3 Mal“ konnten nicht differenziert werden.

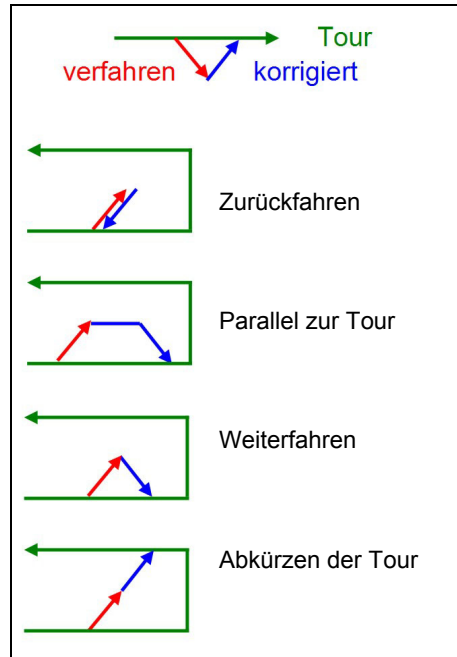


Abbildung 4-6: Auswahlmöglichkeiten der Weiterfahrt nach einer Fehlentscheidung des Fahrers

Nachdem der Proband sich verfahren hatte, konnte er sich – nach Bemerkungen seines Fehlers – bewusst für eine der vier Möglichkeiten „Zurückfahren“, „Weiterfahren“, „Parallel zur Tour“ und „Abkürzen der Tour“ (vgl. Abbildung 4-6; siehe auch Fragebogen im Anhang A-1) entscheiden. Die Verteilung der Antworthäufigkeiten ist in Abbildung 4-7 dargestellt.¹¹⁰ Die beiden Methoden „Zurückfahren zur Tour“ und „Weiterfahren bis zur Tour“ wurden mit je sechs Nennungen am häufigsten gewählt.

¹¹⁰ Es waren Mehrfachnennungen möglich.

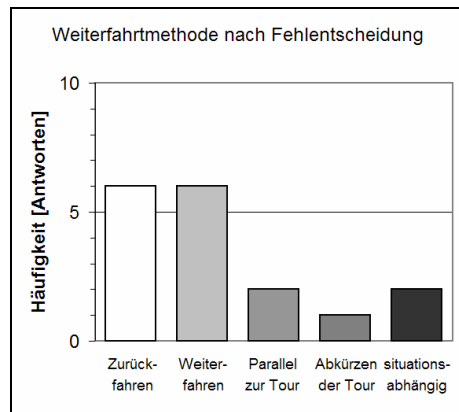


Abbildung 4-7: Methode der Weiterfahrt nach einer Fehlentscheidung

Bei der Frage nach dem benutzten Kartenmaterial und nach seiner Eignung wurde in neun Fällen die Topografische Karte angegeben; zwei Probanden schätzen diese als „schlecht“, die übrigen neun als „mittelmäßig geeignet“ ein. Kritikpunkt an der TOP-Karte war ihr geringer Detaillierungsgrad.

Die Fahrradkarte der Stadt Essen wurde ebenfalls neun Mal bewertet, und dabei sieben Mal als „gut geeignet“ und zwei Mal als „mittelmäßig geeignet“ eingestuft.

4.3 Simulation des Nutzerverhaltens mit GPS in einem virtuellen Netz

4.3.1 Modellnetz

Für die Simulation wurde in einem ersten Schritt ein Teil des Essener Fahrradwegenetzes aufgenommen, der aus einem 600 Knoten umfassenden Areal im Bereich des Essener Baldeneysees bestand (siehe Tabelle 4-4). Bei der Modellierung wurden lediglich die Nachbarknoten aller Knoten bestimmt. Eine Zuord-

nung von Attributen zu Knoten (Koordinate) oder Kanten (Länge, Steigung, Streckentyp) erfolgte nicht.

Anzahl der Nachbarknoten	Anzahl der Knoten (Anteil)
1	39 (6,5 %)
2	194 (32,4 %)
3	260 (43,5 %)
4	77 (12,9 %)
5	24 (4,0 %)
6	4 (0,7 %)

Tabelle 4-4: Übersicht über die Struktur des Modellnetzes

Ausgehend von diesem Netz (Ausschnitt siehe Abbildung 4-8) wurden – manuell und automatisiert – verschiedene Touren erzeugt, die eine Knotenanzahl zwischen 12 und 40 aufweisen. Dies entspricht Tourlängen zwischen 1,0 und 8,0 Kilometern.

Anschließend wurde für jede Tour die Fahrt eines Nutzers mit verschiedenen, zufälligen Startpunkten simuliert. Für die Simulation wurde angenommen, dass das GPS-Signal ausfällt, sobald der Nutzer die zweite vorgesehene Kante erreicht.

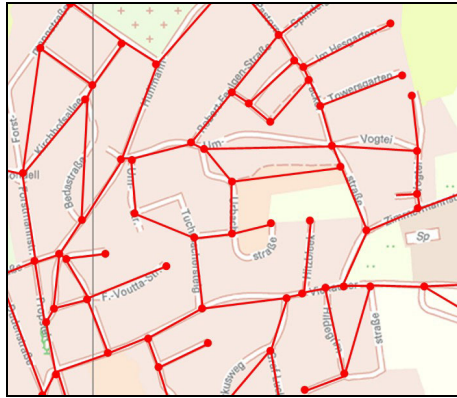


Abbildung 4-8: Ausschnitt des Modellnetzes im Essener Süden¹¹¹

An n -armigen Knoten mit $n > 2$ steht der Nutzer vor der Auswahlentscheidung, seine Tour auf einer der verbleibenden $n-1$ Kanten (Wenden unberücksichtigt) fortzusetzen. Es wird unterstellt, dass er mit aktivem GPS-Signal stets die korrekte Kante wählt, also die, die im Verlauf der Solltour zum nächsten Soll-Knoten führt.

Beim Ausfall des GPS-Signals wird der Fahrtverlauf von der Armigkeit n des Knotens und der Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F des Nutzers abhängig gemacht. Die Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F stellt eine Hilfsgröße dar, die die Fähigkeit des Nutzers repräsentiert, sich anhand einer Karte im Gelände zu orientieren und an erreichten Knotenpunkten die richtige Abbiegeentscheidung zu treffen.

Im Folgenden wird unterstellt, dass der Nutzer mit einer Wahrscheinlichkeit p_F zwischen 0 und 1 an jedem erreichten Knoten nicht weiß, welcher weiterführende Ast korrekt ist, falls das GPS-Signal ausfällt. Mit einer Wahrscheinlichkeit $(1-p_F)$ kennt der Fahrer den richtigen Weg und fährt die Route korrekt weiter.

¹¹¹ Hintergrundkarte: Landesvermessungsamt NRW: CD-ROM TOP 10 NRW.

Die Rückfahrt zum vorhergegangenen Knoten sei ausgeschlossen (der Nutzer dreht also nicht um).

Die Wahrscheinlichkeit für die korrekte Weiterfahrt für $p_F = 0$ beträgt also an jedem Knoten der Tour 1, der Nutzer erreicht also auf jeden Fall das Ziel. Bei einer Wahrscheinlichkeit von $p_F > 0$ für eine zufällige Wahl ist die Wahrscheinlichkeit für den richtigen Weg von p_F und der Anzahl der Abbiegeentscheidungen, also der vom Knoten abzweigenden Kanten abhängig.

Sei n die Anzahl der zum erreichten Knoten zuführenden Kanten, so beträgt die Wahrscheinlichkeit für die korrekte Weiterfahrt p_{korrr} .

$$p_{\text{korrr}} = \frac{p_F * (2 - n)}{n - 1} + 1; n \in \mathbb{N} > 1$$

Formel 4-1

Das Problem besteht darin, das Verhalten des Nutzers bei Ausfall des GPS-Signals abzuschätzen. Empirische Untersuchungen existieren nach Kenntnis des Verfassers hierzu nicht, so dass dafür ein sinnvoller Ansatz gefunden werden muss. Das Verhalten des Radfahrers während des Fahrtverlaufs wird von verschiedenen Faktoren abhängig sein:

- von der Ortskenntnis des Nutzers. Es kann unterstellt werden, dass diese prinzipiell eher niedrig ist, wenn der Nutzer auf die Hilfe eines Navigationssystems zurückgreift;
- von der Komplexität des Netzes. Mit Komplexität wird die Armigkeit der Knoten und die Kurvigkeit der Kanten (Summe der kumulierten Winkeländerungen über den Längsverlauf einer Kante) beschrieben;
- von der Präzision der Karte. Eine detailgetreue Karte ermöglicht dem Nutzer möglicherweise eine bessere Zuordnung seines realen Standpunktes zum Standpunkt auf der Karte. Hilfreich sind hierbei insbesondere topografische Besonderheiten (Vegetation, Gewässer, Höhenlinien) und bauliche Gege-

benheiten (Gebäude, konstruktive Bauwerke). Ein Einflussfaktor dabei ist die Fähigkeit und Erfahrung des Nutzers, die Karte zu lesen und so anhand seiner Umgebung auf seinen Standpunkt zu schließen. Es kann unterstellt werden, dass der Nutzer weitgehend auf die Informationen (Standpunkt, Abbiegehinweis) des Navigationssystems angewiesen ist.

Insgesamt bleibt die Frage offen, wie die vorliegenden Faktoren zu einer quantitativen Aussage über die Korrektheit der Abbiegeentscheidung an einem Knoten aggregiert werden können. Da eine solche Aussage nicht zuverlässig getroffen werden kann, werden verschiedene Fehlentscheidungswahrscheinlichkeiten $p_F = 0..1$ durchgespielt und die Simulationen damit durchgeführt. So wird quasi das Verhalten verschiedener Nutzer simuliert:

Radfahrern, die über exzellente Ortskenntnisse verfügen und sehr gut Karte lesen können (und diese auch mitführen), und die sich zudem in einem „einfachen“ Netz bewegen, wird eine Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit nahe $p_F = 0$ zugewiesen. Nutzern, die sich bei ihrer Weiterfahrtsentscheidung im Falle des GPS-Ausfalls weder auf ihre Ortskenntnis noch auf eine Karte stützen können, wird eine Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit nahe $p_F = 1$ zugewiesen. Dies bedeutet aber nicht zwangsläufig, dass dieser Nutzer den falschen Weg nutzt: $p_F = 1$ heißt, dass 100 % der Nutzer die Abbiegeentscheidung völlig zufällig wählen. Sie repräsentieren damit quasi den Nutzer, der keine Karte lesen kann (also auf die Zielführung angewiesen ist), bzw. seinen Standort nicht der Karte zuordnen kann. An einem 4-armigen Knoten würden also ein Drittel den richtigen Weg und zwei Drittel einen falschen Weg (keine Person wendet und fährt zurück) wählen.

4.3.2 Hintergrund der Simulation

Es soll gezeigt werden, dass auch bei kleinsten Unsicherheiten ($p_F > 0$) die Wahrscheinlichkeit des Radfahrers, sich zu verfahren, insbesondere bei vielen zu passierenden Knoten (und damit zu treffenden Abbiegeentscheidungen)

steigt. Mit steigendem Komplexitätsgrad der Knoten, wie sie in Wegenetzen des nichtmotorisierten Verkehrs mit $n = 5$ oder $n = 6$ zu finden sind (vgl. Tabelle 4-4), nimmt sie stark zu.

In vielen Fällen wird es dem Radfahrer, nachdem er sich verfahren hat, unmöglich, seine ursprüngliche Tour wieder aufzunehmen. Gerade in topografisch problematischen Bereichen (Gebirge, Flussläufe) führt dies zu großen Umwegen.

Es wurden drei Solltouren mit den Längen 11 Knoten, 24 Knoten und 39 Knoten definiert. Insgesamt wurden für die drei Touren jeweils 10.000 Simulationen für 24 verschiedene Fehlentscheidungswahrscheinlichkeiten p_F zwischen 0 und 1 in jeweils zwei Richtungen simuliert (insgesamt also ca. 1,5 Millionen Simulationenläufe).

Der jeweilige Simulationslauf wurde beendet, falls

- das Ende der Tour erreicht wurde,
- von der Tour abgekommen und diese später wieder erreicht wurde,
- ein Randknoten (Sackgasse) erreicht wurde,
- die Zahl der erreichten Knoten etwa die vierfache Länge der Solltour überschreitet, der Nutzer sich also verfährt und nicht zur Solltour zurückkehrt.

Für diese Fälle wurde das entsprechende Abbruchereignis notiert und in den Auswertungen entsprechend berücksichtigt.

Unberücksichtigt geblieben ist in den Simulationsläufen die Frage, wie oft der Nutzer von der Solltour abkommt und diese wieder erreicht.

Hat der Radfahrer in der Simulation die Solltour verlassen, wird die Abbiegeentscheidung abseits der Tour zufällig (ohne Umdrehen) in Abhängigkeit von den auf den Knoten zulaufenden Kanten und der für den Simulationslauf vorgegebenen Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F getroffen. In der Realität ist

durchaus die bewusste Wahl eines Weges möglich, der zur Solltour zurückführt. In der Simulation scheidet diese Möglichkeit aus.

Um den Einflussfaktor „Netzgröße“ auszugleichen, wurden die Simulationen für jede Solltour in Hin- und in Rückrichtung durchgeführt. Damit wird verhindert, dass in ungünstigen Simulationen die „Grenzen“ des Netzes beim Verfahren überdurchschnittlich häufig erreicht werden.

4.3.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen für die drei verschiedenen Tourlängen sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

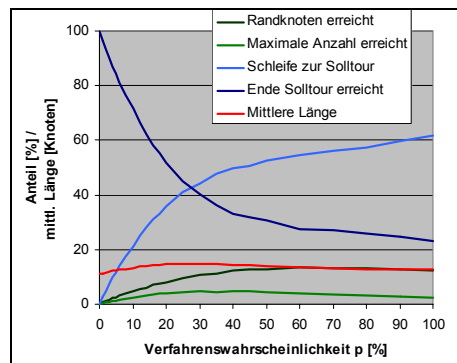


Abbildung 4-9: Ergebnisse der Simulation für Tour 1 (kurze Tour)

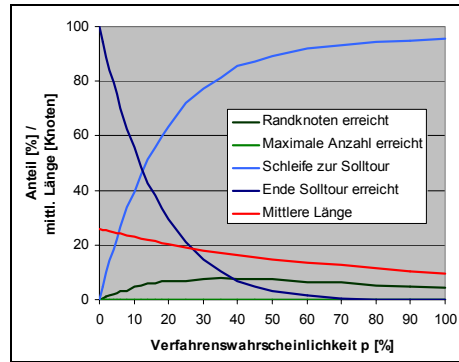


Abbildung 4-10: Ergebnisse der Simulation für Tour 2 (mittlere Länge)

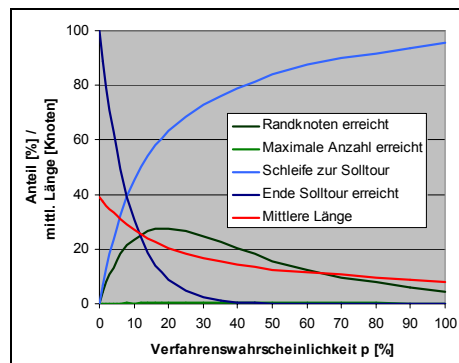


Abbildung 4-11: Ergebnisse der Simulation für Tour 3 (lange Tour)

Der Ausgang der einzelnen Simulation wird in vier Zustände unterschieden:

- Ende der Solltour wird erreicht (entweder ordnungsgemäß oder zufällig nach Verlassen der Route), dunkelblaue Kurve;
- Randknoten wird erreicht, dunkelgrüne Kurve;

- maximal vorgegebene Knotenzahl – Vierfaches der geplanten Knotenanzahl
 - wird erreicht¹¹², hellgrüne Kurve;
- Fahren einer Schleife¹¹³, hellblaue Kurve.

Die rote Kurve zeigt die mittlere zurückgelegte Länge der simulierten Tour; bei einer Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit von $p_F = 0$ ist die durchschnittliche gefahrene Länge identisch mit der Länge der Solltour. Bei der kurzen Strecke ist die mittlere simulierte Tourlänge mit zunehmender Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F leicht zunehmend, bei den längeren Strecken ist die mittlere Länge mit zunehmendem p_F abnehmend. Prinzipiell ist mit steigenden p_F eine zunehmende gefahrene Länge zu erwarten, wie sie ansatzweise bei der kurzen gefahrenen Tour erkennbar ist. Aufgrund der simulierten Fehlentscheidungen des Nutzers aufgrund des GPS-Ausfalls, die zum Erreichen von Randknoten des Netzes führt, nehmen aber die simulierten Fahrtlängen ab. Ursächlich hierfür ist der begrenzte Umfang des Untersuchungsnetzes. Unterstellt werden kann, dass bei in der Ausdehnung nicht beschränkten Netzen die mittlere Länge mit steigendem p_F zunehmen wird.

Der dunkelblaue Graph zeigt die Häufigkeiten, mit der die Solltour regulär durchfahren wird. Für $p_F = 0$ (keine Fehlentscheidung) beträgt dieser Anteil bei allen simulierten Tourlängen 100 %. Die Anteile der übrigen drei Simulationsergebnisse „Schleife“ (hellblau), „maximale Knotenzahl durchfahren“ (hellgrün) und „Randknoten erreicht“ (dunkelgrün) sind dagegen bei $p_F = 0$ jeweils 0. Die Wahrscheinlichkeit, dass das Ende der Tour regulär erreicht wird, fällt nun mit steigendem p_F stark ab, und zwar umso stärker, desto länger die simulierte Tour ist. Bei der kurzen Tour wird in immer noch einem Viertel der Simulationen für $p_F = 1$ das reguläre Ende erreicht, während bei mittleren Tourlängen ($n = 24$)

¹¹² Durch Vorgabe einer Grenzlänge bzw. Grenzknotenzahl wird verhindert, dass die Fahrt übermäßig lang wird, weil dies nicht dem Verhalten eines „echten“ Fahrers entspräche.

¹¹³ Durch den Abbruch nach Erreichen eines bereits passierten Knotens werden Endschleifen verhindert.

bereits ab $p_F = 0,7$ und bei langen Touren ($n = 39$) bereits ab $p_F = 0,4$ das Ende der Solltour nicht mehr erreicht wird.

Die Kurve für das Erreichen eines Randknotens (dunkelgrüne Kurve) ist in allen drei untersuchten Tourlängen für ansteigende p_F zunächst steigend und dann fallend, und zwar je steiler, desto länger die Tour ist. Dieser Verlauf ergibt sich zwangsläufig aufgrund des degressiven Anstiegs der hellblauen Kurve („Schleife“) und der Tatsache, dass die vier Graphen an jeder Stelle p_F gleich 100 % ergeben. Bei langen Touren ist bei einem GPS-Ausfall mit einer Wahrscheinlichkeit bis zu fast 30 % damit zu rechnen, dass die Solltour verlassen und nicht wieder zu ihr zurückgefunden wird, und dies bereits bei sehr niedrigen Fehlentscheidungswahrscheinlichkeiten p_F ($p_F = 18 \%$).

Damit wird die Sinnfälligkeit für die Standortoptimierung bzw. ein Ersatzverfahren zur GPS-Messung für Radfahrer unterstrichen.

Die durchgeführte Simulation ist hinsichtlich des Netzes, des Nutzerverhaltens und der Algorithmik sehr einfach gehalten. Die daraus abgeleiteten Ergebnisse erscheinen für die Übertragung auf das Verhalten in der Realität nicht hinreichend genau. Aus diesem Grund ist eine hinsichtlich der Kritikpunkte verfeinerte Simulation durchgeführt worden, die im nächsten Abschnitt vorgestellt wird.

4.4 Simulation des Nutzerverhaltens mit GPS in einem realen Netz

4.4.1 Modellnetz

Ausgehend von den genannten Erkenntnissen wurde das Simulationsverfahren in einer zweiten Stufe an einem umfangreicheren Netz erprobt. Bei diesem erweiterten Netz handelt es sich um nahezu den kompletten Ausschnitt der Stadt Essen, teilweise mit angrenzenden Bereichen der benachbarten Städte bzw. Gemeinden Bochum, Mülheim, Gelsenkirchen und Mettmann. Die Kantenlänge des quadratischen Netzausschnitts beträgt exakt 18 km.

Grundlage des verwendeten Netzausschnitts ist das Forstwegkataster Nordrhein-Westfalens (Darstellung des Netzes siehe Anhang A-4)¹¹⁴. Das gewählte Netz besteht in der Basis aus den Knoten und Kanten des NavTech-Netzes, das auch für die Map-Server- bzw. MobiGuide-Entwicklung herangezogen wurde.¹¹⁵ Den Kanten ist unter anderem das Attribut „Straßentyp“ zugeordnet. Der Straßentyp wird mittels einer Kennziffer von 1 bis 7 klassifiziert (siehe Tabelle 4-5).

Straßentyp	Bezeichnung
1	Autobahnen und autobahn-ähnliche Schnellstraßen
2	Sonstige Fernstraßen
3	Regionale Hauptverbindungsstraßen
4	Sonstige Hauptstraßen
5	Nebenstraßen
6	Hauptwege, Hauptwirtschaftswege, Fahrwege (mit Fahrzeugen befahrbar)
7	Sonstige Wege, Fußwege

Tabelle 4-5: Einteilung der NavTech-Wegeklassen¹¹⁶

Der verwendete Netzausschnitt besteht aus insgesamt ca. 33.500 Kanten und 25.500 Knoten, die sich gemäß der Tabelle 4-6 auf die sieben Straßentypen der NavTech-Kategorisierung verteilen. Bei den Kanten des Typ 1 handelt es sich um das Netz der Bundesautobahnen, das von Radfahrern nicht befahren werden darf. Bei dem Straßentyp 2 handelt es sich um Bundesstraßen, deren Be-

¹¹⁴ Logiball: Forstwegkataster.

¹¹⁵ Eckstein, T; Kahrau, M; Witte, P.; et al: Schlussbericht zum Verbundvorhaben Ar-Mont, S. 43.

¹¹⁶ Firma Navtech: Beschreibung der Klassifizierung der Straßenklassen.

nutzung Radfahrern zwar erlaubt ist, die aber aufgrund der Verkehrsdichte und der oft fehlenden Radwege als nicht empfehlenswert angesehen werden können. Tatsächlich verlaufen aber entlang dieser Straßen der Klasse 2 oft straßenbegleitende Radwege, die jedoch im Netz nicht als eigenständige Kanten ausgewiesen sind: Deshalb werden alle Straßenklassen > 1 für die Simulation genutzt. Da in dem Netz einige Radwegeverbindungen fehlen – insbesondere Wege im Bereich der Zeche Zollverein –, wurde das Netz um diese Wege ergänzt, die der Kategorie 8 zugewiesen wurden.

Typ	Anzahl Kanten	Gesamtlänge
1	413	90,97 km
2	1.039	118,30 km
3	4.704	432,61 km
4	1.846	170,08 km
5	23.142	2.206,28 km
6	634	90,40 km
7	1.608	255,34 km
8	9	10,84 km
Σ	33.395	3.374,82 km

Tabelle 4-6: Anteile der Straßenklassen im Untersuchungsraum

Die Anzahl der Knotenpunktarme und deren Verteilung spiegeln die Struktur des Netzes wider: Je mehr Arme an einen Knoten angebunden sind, desto mehr Möglichkeiten existieren für eine Auswahlentscheidung (Tabelle 4-7). Dabei ist zu beachten, dass in dem vorliegenden Modellnetz zahlreiche Knoten zu Teilknoten aufgelöst wurden, so dass die Anzahl der Knoten mit drei Armen überrepräsentiert, die mit großer Armigkeit ($n > 4$) hingegen unterrepräsentiert sind. Durch die Kombination zweier unmittelbar hintereinander liegender Entscheidungen wird aber die Realität letztendlich korrekt abgebildet. Die einarmi-

gen Knoten stellen entweder Sackgassen im Netz oder Randbereiche dar, an denen das Netz an den Grenzen des Untersuchungsraums aufgetrennt wurde.

Anzahl der Nachbarknoten	Anzahl der Knoten (Anteil)
1	3.764 (15,2 %)
2	3.586 (14,5 %)
3	13.897 (56,1 %)
4	3.382 (13,7 %)
5	107 (0,4 %)
6	14 (0,1 %)
Σ	24.750 (100,0 %)

Tabelle 4-7: Übersicht über die Komplexität der Knotenpunktgeometrien des Modellnetzes

Das erweiterte Netz sollte auch die für Radfahrer relevanten Höhen als Datum enthalten. Dazu war es erforderlich, die Höhendaten für alle Knoten- und Stützpunkte des Netzes zu ermitteln.

Über das Geländemodell der Stadt Essen¹¹⁷ konnte jeder bekannten Koordinate des Netzes deren Höhe zugeordnet werden. Die Genauigkeit der so ermittelten Höhen wird lt. Auskunft der Stadt Essen mit drei Dezimeter angegeben.¹¹⁸

Ausgehend von den Höhen wurde anschließend für jede Kante unter Einbezug der Stützpunkte die kumulierte Steigung und das kumulierte Gefälle (richtungsbezogen) ermittelt.

¹¹⁷ Stadt Essen, Vermessungsamt: Höhenmodell.

¹¹⁸ Telefonat mit Herrn Dr. Knospe vom Landesvermessungsamt der Stadt Essen im Mai 2006.

Das Modellnetz wurde mit den in der topografischen Karte TOP10¹¹⁹ verzeichneten Straßen und Wegen auf Vollständigkeit bzw. Netzabdeckung verglichen. Das Ergebnis des Netzvergleiches ist, dass im insgesamt 3.364 km umfassenden Streckennetz gegenüber dem in der TOP 10 verzeichneten Wegenetz nur 18,12 km Länge an Strecken fehlen (dies entspricht 0,54 %). Dagegen sind im Modellnetz Strecken enthalten, die in der TOP 10 nicht verzeichnet sind. Ihr Anteil wurde nicht ermittelt.

Für die Simulation wurde eine Radtour aus einem Radwanderführer als Solltour herangezogen.¹²⁰ Dabei handelt es sich um eine Rundtour von 18,36 km Länge, die in der folgenden Abbildung dargestellt wird:

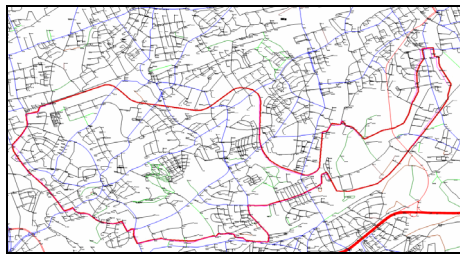


Abbildung 4-12: Ausschnitt des Untersuchungsraums mit Rundtour^{121 122}

4.4.2 Nachbildung des Nutzerverhaltens

Im Rahmen der Simulation hat sich herausgestellt hat, dass die Länge der Fahrten infolge der GPS-Ausfälle nicht – wie erwartet – länger wird, sondern zum Teil sogar kürzer (vgl. Abbildung 4-17). Dies ergibt sich aus der Konstellation der Tour, die dazu führt, dass der Radfahrer beim Verlassen der Tour die

¹¹⁹ Landesvermessungsamt NRW: CD-ROM TOP 10 NRW.

¹²⁰ Berke, Wolfgang: Radfahren und entdecken!

¹²¹ Berke, Wolfgang: Radfahren und entdecken!

¹²² Hintergrundkarte: Logiball: Forstwegekataster.

Strecke abkürzt, sobald er die Tour „nach innen“ verlässt (siehe Abbildung 4-14 und Abbildung 4-24). Um diesen Effekt auszuschließen, wurde als Vergleich noch eine zweite Tour in Form einer „Etappentour“ generiert. Dazu wurde ein Teilstück der Rundtour beibehalten und nach Westen verlängert. Die Streckenlänge der Etappe beträgt 16,1 km (vgl. Abbildung 4-13).

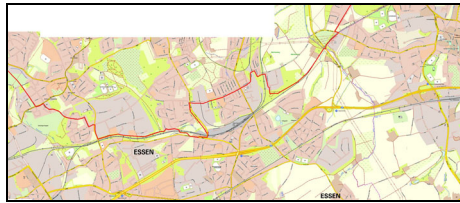


Abbildung 4-13: Ausschnitt des Untersuchungsraums mit Etappe¹²³

In einem **ersten Schritt** wurde die Soll-Tour in eine Knotenfolge umgesetzt. In Bereichen, in denen im Modellnetz Strecken fehlten, wurden entweder parallele Strecken genutzt, soweit diese in vertretbarer Entfernung zur eigentlichen Tour lagen, oder das Netz wurde um eigene Strecken der (fiktiven) Straßenklasse 8 ergänzt. Ausgehend von der Knotenfolge wurden die Länge der Tour sowie die kumulierte Steigung und das Gefälle ermittelt.

In einem **zweiten Schritt** wurde der Fahrtverlauf des Nutzers simuliert. Ausgehend vom Startknoten der Tour wurde für jeden erreichten Knoten die GPS-Verfügbarkeit simuliert. Dazu wurde die Fahrzeit bis zum Knoten berechnet, die sich vereinfacht aus der zurückgelegten Strecke und einer konstanten Geschwindigkeit von $v = 18 \text{ km/h}$ zu

$$s = v * t = 18 \text{ km/h} * t \quad \text{Formel 4-2}$$

ergibt. Auf eine differenzierte Betrachtung der Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der kumulierten Steigung bzw. dem Gefälle wurde wegen der weitgehend flach verlaufenden Tour verzichtet.

¹²³ Hintergrundkarte: Landesvermessungsamt NRW: CD-ROM TOP 10 NRW.

In einem **dritten Schritt** wurde die Abbiegeentscheidung des Nutzers an jedem Knoten simuliert. Bei Vorliegen des GPS-Signals trifft der Nutzer die korrekte Entscheidung, bei Ausfall des GPS-Signals trifft er seine Entscheidung anhand der Fehlentscheidungs-Wahrscheinlichkeit p_F (s. o.). Konkret sind vier verschiedene Fälle zu unterscheiden:

	GPS-Signal	
	liegt vor	fällt aus
auf Weg	a	b
abseits	c	d

Tabelle 4-8: Situationsmatrix für Nutzerentscheidungen

Im **Fall a** fährt der Nutzer die Tour wie geplant. Im **Fall b** (GPS-Ausfall entlang der Tour) entscheidet der Nutzer nach der Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F zufällig. Im **Fall c** (GPS vorhanden, aber Tour verlassen) stellt sich die Entscheidung, wie sich der Nutzer verhält: Die Fragestellung ist hier, für welchen Routenverlauf sich der Nutzer auf dem Weg zurück zu seiner Soll-Tour entscheidet (siehe Abbildung 4-14):

- Wählt er die fälschlicherweise genutzte Kante, um zu dem Knoten zurückkehren, an dem die Soll-Tour verlassen wurde (Fall 1)?
- Wählt er eine alternative Kante, um an einer späteren Kante auf die Solltour zurückzukehren (Fall 2)?
- Gleicht er den durch die Wegsuche erlittenen Zeitverlust aus, um abzukürzen und die Zeit aufzuholen (Fall 3)?
- Oder nutzt er den Fehler, um eine parallel zur Ausgangstour gelegene, landschaftlich reizvoll gelegene Route zu fahren (Fall 4)?

- das Erreichen des Zielknotens,
- das Überschreiten einer Fahrzeitgrenze oder
- das „Steckenbleiben“ im Netz.

Ein „Steckenbleiben“ kann sich ergeben, wenn der Nutzer in komplexe Sackgassenäste hineingerät. Während einfache Sackgassen ($n \leq 3$) vom Algorithmus entsprechend berücksichtigt werden (der Nutzer fährt maximal einmal in eine solche Sackgasse hinein), sind verschachtelte Sackgassen aufgrund der Markierung der Knoten auf Überschreiten (damit sie nicht mehrmals angefahren werden) deutlich aufwändiger zu handhaben (siehe Abbildung 4-15). Auf eine algorithmisch korrekte Abwicklung des Nutzerverhaltens beim Befahren entsprechender Bäume wurde hierbei verzichtet, da dies nicht die untersuchte Problematik betrifft.

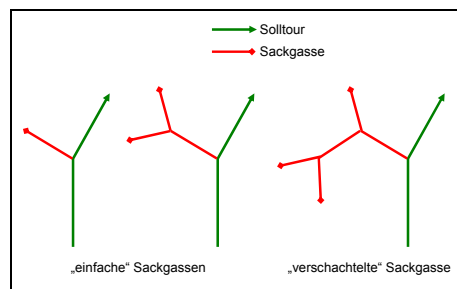


Abbildung 4-15: Einfache und komplexe Sackgassen

Ein „Steckenbleiben“ kann sich auch ergeben, wenn keine benachbarten Knoten mehr unmarkiert sind. Ein Knoten wird markiert, sobald er zweimalig durchfahren wurde. Mit der Markierung soll verhindert werden, dass Fahrten mehrfach über einen Knoten, also z. B. im Kreis führen, was auch in der Realität nur äußerst selten vorkommen wird.

Das Überschreiten einer bestimmten Fahrzeit bedeutet in der Praxis, dass der Nutzer auch nach einer gewissen Zeit nicht zu seiner Route zurückgefunden hat.

Für die vorgestellte Tour wird eine hinreichend große Anzahl an Simulationsdurchläufen durchgeführt ($n = 1.000$), wobei jeweils die Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F von 0 bis 1 sukzessive erhöht wird. Als Ergebnis der Simulationen werden folgende Größen ermittelt:

- Anteil der regulären Fahrten (entlang der Solltour),
- Anteil der Fahrten, bei denen das Ziel (Endknoten) nicht erreicht wurde¹²⁴,
- Anzahl der befahrenen Abschnitte der Solltour sowie der befahrenen, aber nicht zur Solltour gehörigen Kanten,
- Umweganteil bei den Fahrten mit Zielerreichung, aber bei zeitweiligem Verlassen der Solltour, in den Dimensionen „Anzahl Knoten“, „Weglänge“, „Zeitdauer“ und „kumulierte Höhenmeter“ (eventuelle zusätzliche Gefällemeter werden nicht berücksichtigt),
- Anteile der zusätzlich befahrenen Strecken verschiedener Streckentypen.

Für die Aufbereitung der Daten und die eigentliche Simulation wurden selbst entwickelte Programme verwendet, die unter „Visual Basic“ im Programmsystem „Microsoft Excel“ erarbeitet wurden. Vorteil des Tabellenkalkulationsprogramms Excel ist der unmittelbare Zugriff auf eine sehr große Menge von Daten innerhalb der Tabellenblätter, die nicht speziell in Variablen oder externen Dateien gespeichert werden müssen.

Zur Modellierung der Ausfallhäufigkeiten wurden die GPS-Tracks der Touren ausgewertet, die mit dem Datenlogger und dem MobiGuide durchgeführt wurden. Da der Datenlogger im Falle eines GPS-Ausfalls die zuletzt bekannte Posi-

¹²⁴ Hierunter fallen die oben beschriebenen Szenarien (Fahrzeitlimit und „Steckenbleiben“).

tion protokolliert, wurde die im NMEA-Protokoll aufgeführte Anzahl der verfügbaren Satelliten als Indiz für eine nicht bestimmbare Position herangezogen, wobei der Parameter „empfangene Satelliten“ < 3 als relevant angesehen wurde. Da bei drei empfangbaren Satelliten dennoch eine ungünstige Konstellation der Satelliten entstehen kann, wurde zusätzlich noch die Bedingung „ < 4 Satelliten“ ausgewertet (siehe auch Abschnitt 4.1.3: „Ausfallhäufigkeiten und -wahrscheinlichkeiten“).

Für jede simulierte Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F ¹²⁵ wurden 1000 Simulationsdurchläufe durchgeführt. Insgesamt wurden dementsprechend 126.000 Simulationsläufe berechnet.¹²⁶

4.4.3 Ergebnisse der simulierten Rundtour

Als Ergebnis der Simulationen zeigt sich, dass der Anteil der erreichten Zielknoten mit steigendem p_F sinkt (siehe Abbildung 4-16): Bei GPS-Ausfallverteilungen gemäß dem MobiGuide (von 100 % bei $p_F = 0$) auf 26 % (bei $p_F = 1$), bei Ausfallverteilungen wie der des Datenloggers auf 74 % (Sat < 4) bzw. 93 % (Sat < 3). Die deutlich schlechtere Zielerreichung beim Simulationsverfahren auf Basis der GPS-Ausfallverteilung des MobiGuide entspricht der – bereits beschriebenen – größeren Ungenauigkeit bzw. der höheren GPS-Ausfallrate des MobiGuide gegenüber dem Datenlogger.

¹²⁵ Es wurden für p_F insgesamt 21 Werte simuliert (in [%]): 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100.

¹²⁶ 126.000 Simulationsläufe =
2 Tourarten * 3 GPS-Ausfallverläufe * 21 Fehlentscheidungswahrscheinlichkeiten *
1.000 Einzelsimulationen.

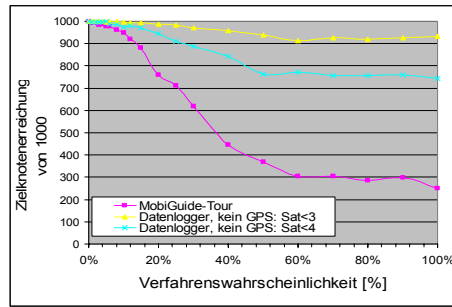


Abbildung 4-16: Zielknotenerreichung in Abhängigkeit von der Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F für eine Rundtour im realen Netz

Die Kernfrage der Simulation lautet, um wie viel die Streckenlänge bzw. die Zahl der zurückgelegten Höhenmeter i in Abhängigkeit der Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F zunimmt. Die Hypothese ist, dass Fahrer mit höherem Informationsdefizit bzw. zunehmender Orientierungslosigkeit längere Strecken bzw. deutlich mehr Höhenmeter zurücklegen müssen.

Das Simulationsmodell kann diese Frage zunächst einmal nur unvollständig beantworten. Die Menge der Touren, die das Ziel nicht erreichen, sind einem der drei Ereignisse

- Nutzer fährt sich im Netz fest,
- Nutzer stößt an die Grenzen des Netzes oder
- Nutzer überschreitet die Anzahl an Grenzknoten bzw. Grenzweglänge zugeordnet. Diese drei Fälle sind Simulationszustände, in denen eine Weiterführung der Berechnung unplausibel ist. Deswegen werden diese Fälle nicht weiter untersucht und sind quasi als ungültige Versuche anzusehen. Tatsächlich führen aber genau diese Fälle zu einer deutlich längeren Wegstrecke, die aber aufgrund des Simulationsabbruchs nicht ermittelt werden kann.

Für die das Ziel erreichenden Nutzer wird im Folgenden die zurückgelegte Wegstrecke (mittels des Kriteriums „Knotenanzahl“, Abbildung 4-17) betrachtet. Da die Wegstrecke der Nutzer, die das Ziel ohne Fehlentscheidung erreichen (siehe Abbildung 4-18, blaue Kurve), bekannt ist (die Wegstrecke entspricht genau der Länge der Modellstrecke), kann aus der mittleren Wegstrecke aller Nutzer mit Zielerreichung die Länge der Wegstrecke für die Nutzer mit Zielerreichung, aber mit Verlassen der Tour ermittelt werden, wobei gilt:

$$L_{\text{ind.}} = \frac{L_{\text{d.+ind.}} \cdot (i + d) - d \cdot L_{\text{d.}}}{i}$$

$L_{\text{ind.}}$: Wegstrecke der indirekten Zielerreicher

$L_{\text{d.}}$: Wegstrecke der direkten Zielerreicher

i : Anzahl indirekter Zielerreicher

d : Anzahl direkter Zielerreicher

Formel 4-3

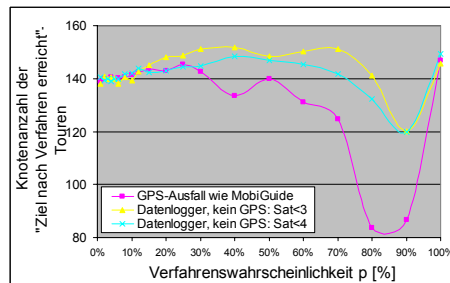


Abbildung 4-17: Tourlänge aller „Ziel nach Fehlentscheidung erreicht“-Touren [Knoten] in Abhängigkeit der Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F für eine Rundtour im realen Netz

Die Kurven für die zurückgelegte Wegstrecke und für die überwundenen Höhenmeter ähneln sich. Grund dafür ist eine relativ homogene Höhenverteilung über das gesamte Netz, die in diesem Fall die Radfahrer begünstigt, die vom

Weg abkommen. In topografisch bewegten Regionen dagegen sind Fehlentscheidungen i. d. R. mit der Überwindung zusätzlicher Höhenmeter verbunden.

Die Wegstreckenkurve (siehe Abbildung 4-17) und die Höhenmeter-Kurve starten für eine Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit $p_F = 0$ mit den Kennwerten der Tour, also mit der Tourlänge von 18.361 m bzw. mit 138 Höhenmetern, da eine Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit $p_F = 0$, unabhängig von GPS-Ausfällen, immer zur Wahl der korrekten Wegstrecke führt.

Mit ansteigenden p_F steigt die Kurve der zurückgelegten Wegstrecke¹²⁷ zunächst einmal leicht an. Dieser Anstieg ist für alle Simulationen von GPS-Ausfällen in etwa gleichem Maße zu beobachten. Im weiteren Verlauf (ab einem p_F von ca. 0,25) weisen die Kurven einen stark fallenden Verlauf auf; die Länge der zurückgelegten Wegstrecke für alle Nutzer, die das Ziel nach zwischenzeitlichem Abweichen von der Sollroute erreichen, sinkt – teilweise deutlich – unter die Länge der Wegstrecke, die die Nutzer zurücklegen, die nicht von der Sollstrecke abweichen. Dieser Effekt lässt sich unmittelbar zurückführen auf eine Verkürzung der Wege, die sich durch die Rundtour ergibt: Nutzer, die „nach innen“, von der Rundtour abkommen, stoßen in vielen Fällen auf einen deutlich später im Tourverlauf folgenden Knoten, so dass sich ihre individuelle Tourlänge dadurch verkürzt. Das Abfallen der Kurve ist allerdings in besonderem Maße auch auf den mit steigendem p_F zunehmenden Anteil der Abbrecher zurückzuführen, d. h. in gleichem Maße erhöht sich der Anteil derjenigen „Zielerreicher“, die ihr Ziel ohne Verfahren erreichen (siehe Abbildung 4-18, hellblaue Kurve).

¹²⁷ Für die weiteren Betrachtungen werden ausschließlich die Kurven der durchlaufenen Knoten zu Grunde gelegt, da der Verlauf der Steigungsmeter-Kurven bzw. der Wegstrecken-Kurven entsprechend verläuft.

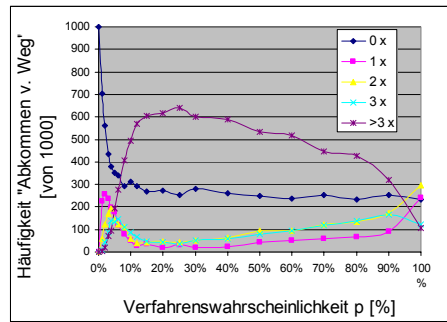


Abbildung 4-18: Häufigkeit des Abkommens von der Tour in Beziehung zur Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F für eine Rundtour im realen Netz

Die Abbildung 4-18 zeigt die Relation zwischen der Häufigkeit des Verlassens der Tour zur Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F . Auffällig ist, dass die hohe Häufigkeit des Abkommens von der Tour (> 3 ; \ast) bis $p_F = 0,25$ steil ansteigt (auf nahezu 65 %), dann jedoch bis $p_F = 1$ wieder abflacht (auf 10 %). Im Gegenzug steigen die Ausfälle im Bereich 1- bis 3- Mal pro Tour erst an, fallen dann wieder ab und ab und steigen ab $p_F = 0,2$ wieder an. Touren ohne Abkommen von der Sollstrecke (\blacklozenge) fallen bis $p_F = 0,06$ auf 40 % stark ab und bleiben im weiteren Verlauf etwa konstant. Es zeigt sich, dass der Anteil häufiger Abweichungen von der Tour nicht stetig steigend mit zunehmender Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit ist, sondern vielmehr ab $p_F = 0,25$ wieder abfällt.

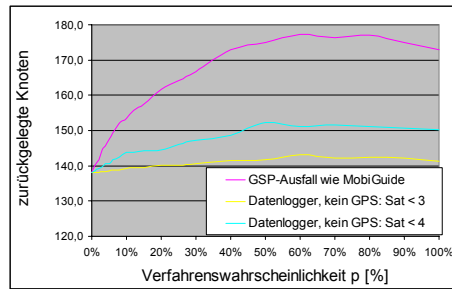


Abbildung 4-19: Tourlänge [Knoten] aller Touren in Abhängigkeit von der Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F für eine Rundtour im realen Netz

Um auch den Einfluss der nicht bis zum Ende durchgeführten Simulationen auf die Tourlänge abzubilden, wurde die Anzahl der durchfahrenen Knoten in Abhängigkeit von der Anzahl des Abkommens von der Solltour bzw. des Steckenbleibens im Netz ermittelt. Dazu wurde für jedes Abkommen von der Tour die Anzahl der durchfahrenen Knoten gegenüber der Sollknotenzahl um 5 erhöht. Für ein Steckenbleiben im Netz, was quasi die Situation eines vollständigen Fehlversuchs darstellt, wurde die Zahl der durchfahrenen Knoten zusätzlich um 35 erhöht. Die sich daraus ableitende Kurve ist in Abbildung 4-19 dargestellt.

Die drei Kurven stellen die Anzahl der durchfahrenen Knoten für die drei den Testgeräten entsprechenden GPS-Ausfallraten dar. Es ist ein Anstieg aller drei Kurven mit steigendem p_F bis zum Scheitelpunkt etwa bei $p_F = 0,8$ abzulesen, ab dem alle drei Kurven wieder leicht abfallen. Das Abfallen der Kurve ist mit der bei hohem p_F zunehmenden Häufigkeit der Simulationen mit ein- oder zweimaliger Fehlentscheidung (siehe Abbildung 4-18) zu erklären. Diese Zunahme von Simulationen mit seltener Fehlentscheidung („1x“ oder „2x“) liegt tatsächlich darin begründet, dass es sich bei diesen Fahrten um Simulationsläufe handelt, die zu einem „frühen Steckenbleiben“ während des Simulationslaufs führen, also aus der speziellen Charakteristik des Modells resultieren. Das „frühe Steckenbleiben“ führt aber auch durch die hilfsweise Addition von 35 zusätz-

lich durchfahrenen Knoten (s. o.) zu einem als zu günstig zu bewertenden Ergebnis.

Da alle gewählten Indikatoren in besonderem Maße durch die Ergebnisse der nicht ordnungsgemäß zu Ende geführten Simulationen beeinflusst werden, wurde nach einem Indikator gesucht, der die Zielerreichung bzw. die Soll-Tour-Abdeckung besser darstellt. Als ein solcher Indikator wurde der Kantenbefahrungsanteil¹²⁸ gewählt.

Der Kantenbefahrungsanteil gibt an, wie viel (Prozent) der geplanten Kanten vom Nutzer während der Simulation im Durchschnitt befahren wurden. Die geplanten Kanten sind sämtliche Kanten der Solltour.

Abbildung 4-20 gibt Aufschluss über die Verteilung des Parameters „Kantenbefahrungsanteil“ in Abhängigkeit der Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F für die simulierten Touren unter dem Einfluss der drei GPS-Ausfallraten.

Für ein $p_F = 0$ beginnen alle Kurven bei einer Rate von 100 %. Der gewählte Indikator ist am besten geeignet, das Ergebnis des Nutzerverhaltens in den Simulationen wiederzugeben; die drei Graphen sind nahezu im gesamten Bereich streng monoton fallend. Erwartungsgemäß ist die negative Steigung der Kurve umso größer, desto höher die GPS-Ausfallrate ist. Für die Simulationen unter dem Ansatz der MobiGuide Ausfallrate sinkt der Anteil der geplanten, durchfahrenen Netzkante bis auf 32 % beim maximalen p_F von 1 (rosa Kurve). Der Kantenbefahrungsanteil unter den günstigeren GPS-Ausfallraten für $p_F = 1$ liegt bei 76 % (Satellitenzahl < 4, hellblaue Kurve) bzw. 94 % (Satellitenzahl < 3, gelbe Kurve).

¹²⁸ Alternativ wird dieser auch als „Kantendeckungsgrad“ oder „Kantenabdeckungsgrad“ bezeichnet.

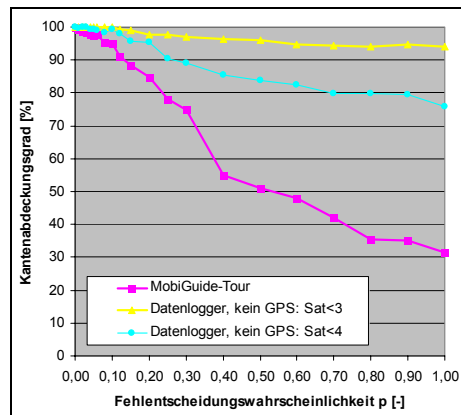


Abbildung 4-20: Kantenbefahrungsanteil der Tour in Abhängigkeit von der Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F für eine Rundtour im realen Netz

Das Ergebnis zeigt, dass selbst bei recht genauem GPS bis zu ein Zehntel der geplanten Streckenabschnitte nicht befahren werden. Verschlechtert sich das GPS weiter, verpasst der Radfahrer bis zu zwei Drittel der vorgesehenen Netzabschnitte. Da es sich bei den vorliegenden Aussagen um die Mittelwerte über sämtliche Simulationsläufe handelt, fallen die Ergebnisse im Einzelfall noch schlechter aus.

4.4.4 Ergebnisse der simulierten Etappe

Um die Besonderheiten der Rundtour (siehe Abbildung 4-24) zu eliminieren, wurde auch eine Etappentour untersucht. Dabei wurden die folgenden Ergebnisse erzielt:

Hinsichtlich der Relation zwischen Steigungssaldo und Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F der Nutzer, die das Ziel nach Abkommen von der Route erreichen, unterscheiden sich die Ergebnisse für die Simulationen der Etappe nicht wesentlich von denen der Rundtour. Wie auch bei der Rundtour steigt die Kurve bei den Simulationen für die Etappe (siehe Abbildung 4-21) mit zuneh-

menden p_F , beginnend bei der Summe der 158 Knoten der Etappe zunächst je nach GPS-Ausfallrate mehr oder weniger steil an. Ab einer Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit von $p_F = 0,4$ verlaufen alle drei Kurven in etwa konstant, bevor sie ab ca. $p_F = 0,7$ wieder geringfügig abfallen.

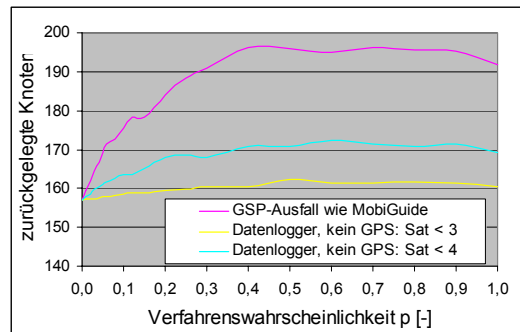


Abbildung 4-21: Tourlänge [Knoten] aller Touren in Relation zur Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F für eine Etappe im realen Netz

Auch die Häufigkeit des Fehlfahrens während der Tour unterscheidet sich zwischen Rundtour und Etappe nicht wesentlich (Abbildung 4-22): Die Anzahl der Touren ohne Abkommen vom Weg fällt mit von Null abweichendem p_F zunächst stark ab (auf ca. 30 %), um dann nahezu konstant zu bleiben (blaue Kurve). Die Anzahl der Touren mit sehr großer Häufigkeit des Abkommens von der Tour („>3x“; violette Kurve) steigt zunächst stark an und fällt dann allmählich wieder ab, während die Anzahl der Simulationen, bei denen die Tour nur ein- (rosa Kurve), zwei- (gelbe Kurve) oder dreimal (hellblaue Kurve) verlassen wird, ansteigt.

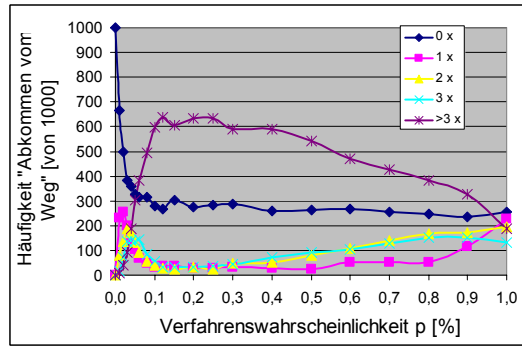


Abbildung 4-22: Häufigkeit des Abkommens von der Tour in Beziehung zur Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F für eine Etappe im realen Netz

Beim Vergleich der Ergebnisse des Kantenbefahrungsanteils zwischen Etappe und Rundtour liegen die Ergebnisse noch enger zusammen (siehe Abbildung 4-23): Der Verlauf der Kurven unterscheidet sich nur geringfügig dadurch, dass er für die Etappen stärker degressiv ausgeprägt ist, d. h. dass die Kantenbefahrungsanteile für mittlere p_F bei den Etappen geringer sind als bei den Rundtouren. Die Schlusswerte der Graphen bei $p_F = 1$ sind in allen Fällen nahezu identisch.

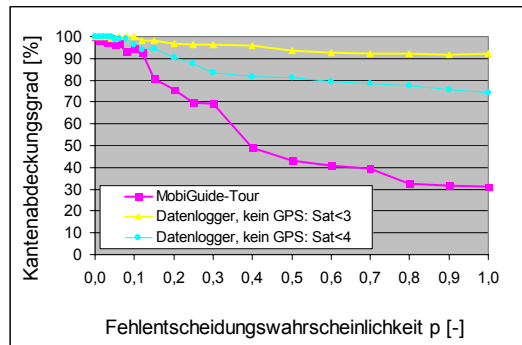


Abbildung 4-23: Kantenbefahrungsanteil der Tour in Abhängigkeit von der Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F für eine Etappe im realen Netz

Zusammenfassung

Die Simulationsergebnisse zeigen zusammenfassend, dass prinzipiell die tatsächlich gefahrene Strecke zunimmt, sobald eine von $p_F = 0$ abweichende Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit vorliegt. Entsprechendes gilt nahezu analog auch für die Summe der überwundenen Höhenmeter und für die Anzahl der befahrenen Knoten aufgrund der Homogenität der Höhen des Netzmodells. Eine Zunahme der gefahrenen Wegstrecke in Abhängigkeit von der Fehlfahrtswahrscheinlichkeit findet in nahezu gleichem Maße bei den simulierten Etappen wie bei den simulierten Rundtours statt. Bei den Rundtours fällt die maximale Zunahme der Streckenlänge mit steigendem p_F mit +28,5 % (177,3 / 138) etwas größer aus als bei den Etappen mit +24,9 % (196,1 / 157). Ein möglicher Grund hierfür könnte in der größeren Gefahr liegen, nicht auf die Tour zurückzufinden, wenn man sich entlang einer Rundtour „nach außen“ verfährt (siehe Abbildung 4-24).

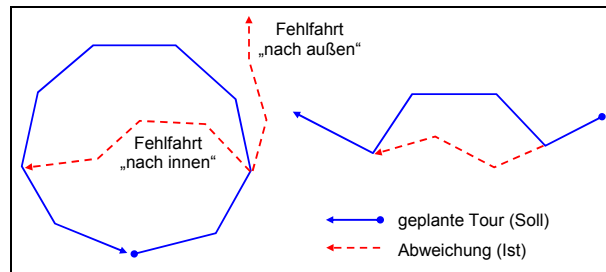


Abbildung 4-24: Schematische Darstellung des Effekts des Verfahrens bei der Rundtour (links) und bei der Etappe (rechts)

Für den Parameter „Kantenbefahrungsanteil“ liegen die Ergebnisse zwischen simulierten Rundtours und simulierten Etappentours nahe beisammen. In beiden Fällen ist mit steigender Nutzerunsicherheit eine Zunahme der verpassenen Kanten zu beobachten, deren Zahl zwischen einem Zehntel und zwei Dritteln der vorgesehenen zu befahrenen Netzkanten ausmachen kann.

Die Sinnfälligkeit einer ersatzweisen Standortsschätzung bei GPS-Ausfall ist damit sowohl für Rundtouren als auch für Etappen erkennbar. Die Häufigkeit der fehlerfreien Zielerreichung sinkt unmittelbar mit von Null abweichendem p_F und ist entsprechend für alle eine Radtour unter Unsicherheit zurücklegenden Nutzer gegeben. In diese Nutzergruppe fallen wohl die meisten ein Radfahrer-navigationsystem nutzenden Radfahrer.

Die Länge der Umwegigkeit ist dagegen von p_F abhängig, prinzipiell ist die Umwegigkeit umso höher, desto unsicherer der Radfahrer hinsichtlich seiner Abbiegeentscheidungen bei GPS-Ausfall reagiert. In topografisch wenig bewegten Regionen entspricht eine Zunahme der Umwegigkeit in etwa proportional einem Anstieg der zurückzulegenden Höhenmeter. In bergigen Bereichen werden sich Mehrstrecken gegenüber der geplanten Solltour i. d. R. überproportional auf die zurückzulegenden Höhenmeter auswirken.

Ein linearer Zusammenhang zwischen p_F und zurückgelegter Wegstrecke ist nicht feststellbar. Ursächlich dafür ist die Tatsache, dass Simulationsrechnungen, die bestimmten Kriterien unterliegen, zum Abbruch führen. Dazu zählen Fahrten, die an die Netzkanten stoßen, eine bestimmte Länge bzw. Fahrtdauer überschreiten oder für die keine bislang noch nicht erreichten Nachbarknoten mehr existieren. Zu einem Großteil dieser Fahrten zählen auch diejenigen der Rundtouren, die nicht nach „innen“, sondern nach „außen“ führen (vgl. Abbildung 4-24).

Die Menge der nicht das Ziel erreichenden Fahrten, die aus Abbildung 4-16 als

$$F_{\text{Abbruch}} = 1.000 - F_{\text{Zielerreichung}} \quad \text{Formel 4-4}$$

berechnet werden kann, stellt aber den Großteil der Fahrten dar, die dem Kriterium „Solltour verlassen“ unterliegen. Beim Simulationsverfahren gemäß der GPS-Ausfallrate des MobiGuide erreichen bis zu 75 %, bei den Ausfallraten des Datenloggers bis zu 25 % der Fahrten das Ziel nicht. Es ist zu erwarten, dass die Menge dieser Fahrten eine deutlich größere Wegstrecke aufweisen

würde, als die ermittelte Wegstrecke der unter Umwegen zum Ziel führenden Fahrten (was in der Realität üblicherweise der Fall ist), wenn die Berechnung bis zum Ziel fortgesetzt werden könnte.

Die zurückgelegte Strecke ist desto länger, umso schlechter die GPS-Verfügbarkeit ist. Der eine relativ hohe GPS-Ausfallrate repräsentierende Mo-biGuide führt in den Simulationen zu deutlich längeren Wegstrecken als der Datenlogger.

4.5 Auswirkungen einer fehlerhaften Ortung auf die Interpretation des aktuellen Standortes (Kantenfehlinterpretation)

Die Wahrscheinlichkeit eines Nutzers, sich zu verfahren, ist nicht nur mit der Dauer und der Häufigkeit eines GPS-Ausfalls verbunden, sondern hängt letztendlich auch von der Komplexität des Netzes ab.

Tritt tatsächlich ein Ausfall ein, so ist neben der Genauigkeit der Positionsbestimmung für den Optimierungsalgorithmus von Bedeutung, ob die auftretenden Ungenauigkeiten zu einer Missinterpretation durch den Nutzer führen. Zu solchen Fehldeutungen hinsichtlich des tatsächlichen Standortes kommt es insbesondere dann, wenn in einem bestimmten Radius um den angezeigten Standort herum weitere Wege verlaufen, auf denen sich der Nutzer – aus der Ungenauigkeit resultierend – in Wirklichkeit aufhalten könnte.

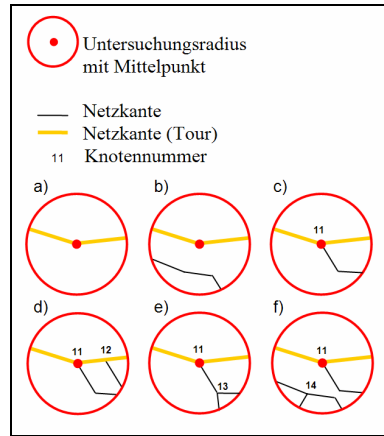


Abbildung 4-26: Möglichkeiten der Fehlinterpretation des Standortes

- ohne mögliche Alternativstrecken,
- mit möglichen Parallelstrecken,
- mit einer Abzweigung,
- mit einer Abzweigung und einer zweiten, angrenzenden Abzweigung entlang der Tour,
- mit einer Abzweigung und einer zweiten, angrenzenden Abzweigung außerhalb der Tour,
- a) mit einer Abzweigung und einer zweiten, nicht angrenzenden Abzweigung.

Für die Konstellationen a) und b) entsteht für den Nutzer keine Entscheidungsnotwendigkeit, weil er nicht auf einen Knotenpunkt stößt. Es werden nur diejenigen Situationen untersucht, in denen der Nutzer lt. Navigationsgerät einen Knoten erreicht hat, in der radialen Umgebung aber noch weitere Standorte denkbar wären (Fälle d bis f). Der Fall c) stellt dagegen den Idealfall dar, in dem die Situation für den Nutzer eindeutig ist. Die Konstellationen, in denen der Nutzer auf einen Knoten trifft, obwohl er sich laut GPS abseits eines Knotens

befindet, sind – soweit sie nicht einer fehlerhaften Karte zuzuordnen sind – auf die Situationen d) bis f) übertragbar.

Es wurde überprüft, wie hoch der Anteil der Radien entlang der Tour ist, für die einer der Fälle d) bis f) eintritt. Die Ergebnisse sind für verschiedene Radien differenziert in Abbildung 4-27 aufgeschlüsselt. Die Tabellenwerte geben an, wie groß der Anteil der Radien ist, denen mindestens einer der Fälle d), e) oder f) (oder mehrere) zugrunde liegt.

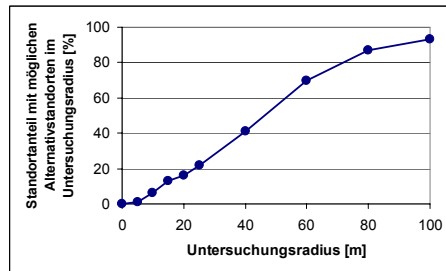


Abbildung 4-27: Anteile von Standorten mit Alternativstandorten innerhalb Untersuchungsradien verschiedener Größe

Bei einer Ungenauigkeit von über 100 Metern ist eine eindeutige Bestimmung des Standortes demzufolge nicht mehr gegeben, da nahezu in allen untersuchten Radien alternative Standorte liegen. Mit kleiner werdenden Radien sinkt die Anzahl möglicher Alternativstrecken; bei der mit einer Ungenauigkeit von 20 m behafteten Positionsangabe kann in 84 % der untersuchten Standorte eine unmittelbare Zuordnung zu einem Alternativstandort ausgeschlossen werden.

Wenngleich eine eindeutige Zuordnung des dargestellten Standortes zu einer Netzkante auch bei Einhaltung der untersuchten Fehlerradien nicht zwingend gewährleistet werden kann, wird durch die vorliegende Analyse verdeutlicht, dass eine – wenngleich auch mit Ungenauigkeiten behaftete – Ersatzstandort-

bestimmung (beispielsweise mit Hilfe von Wegstreckenmessung bei zugrunde gelegter Tour) zu verbesserten, für den Nutzer verwertbaren Standortinformationen führt, bzw. es wird klar, wie exakt eine solche Standortbestimmung für den Fahrer sein sollte. Der Nachweis der Nicht-Mehrdeutigkeit von Standorten in Radien unterschiedlicher Größe stellt eine notwendige Voraussetzung für die Anwendbarkeit von entsprechenden Optimierungsalgorithmen (vgl. Kapitel 5) dar.

5 Lösungsansätze zur Verbesserung der Standortbestimmung

Im Folgenden wird versucht, einen Überblick über mögliche Techniken zu geben, mit denen eine Optimierung der Positionsbestimmung denkbar ist. Es kann dabei zwischen Verfahren mit Hilfe von zusätzlicher Sensorik und rein algorithmischen Lösungen unterschieden werden. Für jedes Verfahren wird auf die technische Umsetzbarkeit und die sich möglicherweise ergebenden Probleme eingegangen. Einige der Lösungsansätze sind für die Optimierung der Standortbestimmung bei GPS-Ungenauigkeit, andere dagegen als Ersatzortungsverfahren bei Signalausfall geeignet. Unterschieden werden muss ferner danach, ob die Methode für beliebige Touren geeignet ist oder nur für Fahrten, bei denen im Gerät eine Tour hinterlegt ist. Im letzten Fall ist es möglich, über einen Abgleich zwischen der vorliegenden (Soll-)Tour und der tatsächlichen zurückgelegten (Ist-)Strecke auf Fehler im GPS-Signal zu schließen bzw. die fehlende Standortbestimmung über einen gewissen Zeitraum durch Extrapolation zu kompensieren.

Die folgende Tabelle zeigt die Gesamtheit der verschiedenen denkbaren Optimierungsansätze:

Verfahren zur Standortoptimierung:
- GSM-Ortung (Mobilfunk)
- Bakenortung
- manueller Positionsabgleich
- mathematische Verfahren (z. B. Ähnlichkeitstransformation)
- Kompassortung
- Neigungssensor (Gyro, Gierwinkel)

Tabelle 5-1: Verfahrensansätze zur Verbesserung der Standortbestimmung

Angelehnt an diese Verfahrensansätze werden die folgenden Methoden hinsichtlich ihrer Implementierbarkeit in ein Radfahre-navigationssystem untersucht:

- Einfache mathematische Korrekturmethode (Abschnitt 5.1),
- Korrektur mit Hilfe eines Odometers (Abschnitt 5.2).
- Korrektur mit Hilfe eines Höhenmessers (Abschnitt 5.3),
- Optimierung durch Einbezug eines Kompasses (Abschnitt 5.4),
- Plausibilitätsprüfung des GPS-Signals (Abschnitt 5.5),
- Korrektur über die Ähnlichkeitstransformation (Abschnitt 5.6).

Für die ersten drei Methoden werden detaillierte Lösungsansätze entwickelt und z. T. im Modell getestet.

Einige der aufgeführten Lösungsansätze wurden nicht weiter verfolgt, weil ihr Einsatz aufgrund der erforderlichen Infrastruktur, aufgrund technischer Restriktionen oder örtlich begrenzter Einsatzfelder für eine Optimierung nicht in Frage kommen.

Systeme ortsfester Baken, wie sie im ÖPNV zum Einsatz kommen, sind allenfalls für ausgewählte Routen denkbar und erfordern kostenintensive Installationen an Hardware bzw. Infrastruktur.

Ortungsoptimierungen über die Erfassung fahrzeugseitiger Radumdrehungen oder über Gierraten- bzw. Neigungsmessungen scheitern beim Fahrrad an der Einspurigkeit des Fahrzeugs bzw. an den fahrdynamischen Eigenschaften der Fahrt.

Messungen über GSM-Signale scheitern sowohl in ländlichen Bereichen aber auch in städtischen Regionen an den Dimensionen der Funkzellenausdehnung. Einen brauchbaren Ansatz verspricht die Ortung über die Messung der Signalstärke von Wireless LAN-Sendern, so genannten WLAN-Hotspots, wie sie im Projekt „Witrack“ vom Institut für Integrierte Schaltungen (IIS) der Fraunhofer-Gesellschaft untersucht werden.¹³⁰ Die Technologie, die als WLAN-Positioning-System (kurz WPS) bezeichnet wird, vermag eine Ortungsgenauigkeit von bis zu 3 m (innerhalb) bzw. 10 m (außerhalb geschlossener Räume) sicherzustellen – allerdings nur in städtischen Bereichen, so dass sie für die Optimierung der Standortbestimmung bei Freizeittouren ungeeignet ist.¹³¹

5.1 Einfache mathematische Korrekturansätze

Komplexe Verfahren, wie beispielsweise die in Abschnitt 5.6 beschriebene Ähnlichkeitstransformation, stellen eine Möglichkeit dar, die Standortposition bei Ausfall oder Ungenauigkeit des GPS alternativ zu ermitteln. Das Verfahren ist allerdings nicht nur rechentechnisch sehr aufwendig, sondern zudem auf ein möglichst vollständiges Wegenetz angewiesen.

Es wurden daher Ansätze für eine deutlich einfachere Optimierung gesucht, die zu ähnlich guten Ergebnissen führen. So stellt sich zum Beispiel die Frage, wie

¹³⁰ Vgl. <http://www.iis.fraunhofer.de/bf/ec/nl/omf/index.jsp>

¹³¹ http://www.iis.fraunhofer.de/fhg/Images/PI_WLAN_Testbed_tcm97-103946.pdf

der Fahrtverlauf aus der Vergangenheit für die Prognose des weiteren Fahrtverlaufs herangezogen werden kann, um einen Signalausfall zu kompensieren.

Hierzu wurden drei eigene Verfahren entwickelt:

- Projektionsverfahren,
- Kreisbogenverfahren und
- Extrapolationsverfahren.

Im folgenden Abschnitt werden die Verfahren dargestellt und es wird untersucht, inwieweit diese Ansätze für die Implementierung in ein Radfahernavigationssystem geeignet sind.

Projektionsverfahren

Als ein möglicher methodischer Ansatz unter Nutzung der Verlaufsinformationen der Route bietet sich im einfachsten Fall zunächst einmal die Projektion der Ist-Daten auf die Soll-Daten an.¹³² Dabei wird für die aktuelle GPS-Position ermittelt, welcher Punkt der Soll-Daten am nächsten liegt, und die Position an der entsprechenden Kante auf diese projiziert (siehe Abbildung):

¹³² Im Folgenden werden die vorgegebene, theoretisch zu fahrende Route mit „Soll“ und die tatsächlichen vom GPS-Empfänger ermittelten Positionen mit „Ist“ bezeichnet. Die aus den Ist-Daten unter Berücksichtigung der Soll-Daten (bzw. sonstiger technischer Systeme) abgeleiteten Daten werden als „Korrektur-Daten“ bezeichnet und ggf. um das angewendete Korrektur-Verfahren ergänzt. In der Regel werden Soll-Daten in blau, Ist-Daten in rot und Korrektur-Daten in grün dargestellt.

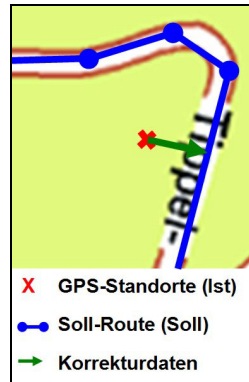


Abbildung 5-1: Einfache Projektion des GPS-Standortes auf die Solltour

Probleme beim Projektionsverfahren ergeben sich insbesondere bei Netzkonstellationen, in denen die Wege der Sollroute eng beieinander liegen (Serpentinen) und der Standpunkt auf eine fehlerhafte Kante projiziert wird (siehe Abbildung 5-2). Durch Projektion auf die umgebenden Kanten sind dabei mehrere potenzielle Standorte (im Beispiel drei) möglich. Durch Auswahl auf den nächstgelegenen Punkt wie im Beispiel kann ein Standort auf einer fehlerhaften Kante als wahrer Standort ermittelt werden (siehe Abbildung 5-2).

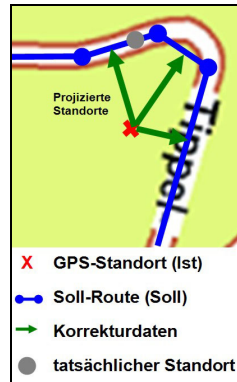


Abbildung 5-2: Fehlerhafte Projektion beim Projektionsverfahren

Die Projektionsmethode ist lediglich bei Ungenauigkeit des GPS-Signals geeignet, nicht bei Ausfall. Die Methode greift nur, wenn der Nutzer sich exakt auf der vom System vorbestimmten Linienführung bewegt und dem System der (als fehlerhaft unterstellte) Standpunkt des Nutzers bekannt ist. Voraussetzung für eine hinreichend große Abbildungsgenauigkeit ist außerdem, dass das Netz bzw. die Route detailliert genug erfasst bzw. abgebildet werden.

In bestehenden Kfz-Navigationssystemen kommt ein entsprechendes Verfahren, bei dem eine Zuordnung eines Standortes zu den Netzkanten vorgenommen wird, bereits zum Einsatz. Das angewendete Verfahren wird als „Map-Matching“ bezeichnet. Dabei wird mit Hilfe entsprechender Algorithmen die Kante bzw. die Position auf einer bestimmten Kante gesucht, zu der eine Zuordnung am wahrscheinlichsten ist.

Der Grundgedanke beim Map-Matching ist, dass davon ausgegangen wird, dass sich der Nutzer auf dem Wegstreckennetz befindet. Liegt der vom GPS-Signal ausgewertete Standort abseits der Strecke, wird die Position des Nutzers nach bestimmten Berechnungsverfahren auf die Wegstrecke projiziert, also ge-“matcht“.

Das Verfahren kommt – bis auf das Wegenetz – ohne zusätzliche Hilfsmittel aus, ist aber nur eingeschränkt für eine Radfahrernavigation geeignet. Grund dafür ist die oft unzureichende Dichte des in der Karte abgebildeten Netzes (siehe in Abschnitt 2.1: „Netzabdeckung“), die ein Matching in weiten Teilen nicht zulässt bzw. zu fehlerhaften Ergebnissen führen würde.

Kreisbogenverfahren

Eine zweite, im Folgenden als Kreisbogenverfahren bezeichnete Methode besteht darin, die Distanz zwischen den GPS-Punkten GPS_i und GPS_{i-1} auf die Soll-Route abzuwickeln. Das Verfahren setzt dabei auf der Hypothese auf, dass die aufeinander folgenden GPS-Signale ähnlich hinsichtlich ihrer Ungenauigkeit sind¹³³, und weist damit Parallelen zur Ähnlichkeitstransformation auf. Der Unterschied zur Ähnlichkeitstransformation besteht darin, dass nicht ein zeitlich ausgedehnter Verlauf der Aufzeichnungen ausgewertet wird, sondern nur die letzten unmittelbar aufeinanderfolgenden GPS-Signale. Es wird hierbei die räumliche Distanz zwischen diesen beiden Standorten Abbildung 5-3 verdeutlicht die Methode.

Ausgangspunkt ist der (fehlerhafte) GPS-Standort GPS_{i-1} . Dieser wird auf die Solltour projiziert ($GPS_{i-1}^{korr.}$). In der darauffolgenden GPS-Messung ergibt sich als Standort der (erneut fehlerhafte) Ort GPS_i . Nun wird die Distanz zwischen GPS_{i-1} und GPS_i in Form eines (hier des roten) Kreises mit dem berechnet und diese Wegstrecke auf der Sollroute abgewickelt. Die Radius R_N im zweidimensionalen Raum dargestellt. Diese Distanz R_N wird ab der Position $GPS_{i-1}^{korr.}$ auf die Solltour abgewickelt. Je nach Anzahl der Kantenlängen muss der Kreis in n

¹³³ Bei den mit den verschiedenen GPS-Empfängern durchgeführten Messungen konnte die Ähnlichkeit von Fehlern in aufeinanderfolgenden Messsekunden beobachtet werden, die Autokorrelation für zeitlich nahe beieinander liegende Messwerte ist relativ hoch.

kleinere Teilkreise zerlegt werden (hier die zwei grünen Kreise mit den Radien R_1 und R_2), sodass gilt:

$$\sum_{i=1}^n R_i = R_N \quad \text{Formel 5-1}$$

Die aus der Summe der n erforderlichen Kreise $R_1..R_n$ gebildete Abwicklungstrecke ergibt am Schnittpunkt zwischen R_n und der Solltour den korrigierten Standpunkt GPS_i^{kor} .

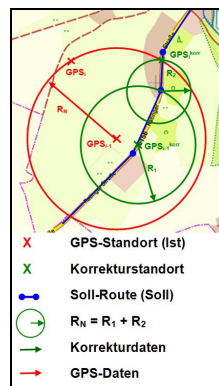


Abbildung 5-3: Kreisbogenverfahren

Das Verfahren zeigt aber Schwächen bei besonderen Konstellationen, die gerade durch die Ähnlichkeitstransformation beseitigt werden. Ein Beispiel dafür ist in der Abbildung 5-4 dargestellt: In der Darstellung oben links ist die korrigierte GPS-Koordinate GPS_i^{kor} nach dem oben beschriebenen Verfahren markiert. Fraglich ist aber in Betracht der abweichenden Richtungswinkel zwischen der Differenz der beiden letzten Ist- und denen der Soll-Koordinaten, ob nicht tatsächlich die in der Abbildung oben rechts rot durchgezogene dargestellte Strecke zurückgelegt worden ist. Noch wahrscheinlicher erscheint die Bewe-

gung wie in der unteren Darstellung (rot gepunktet), zumal die Richtungswinkel von $\text{GPS}_i - \text{GPS}_{i-1}$ und $\text{Soll}_2 - \text{Soll}_3$ nahezu identisch sind.

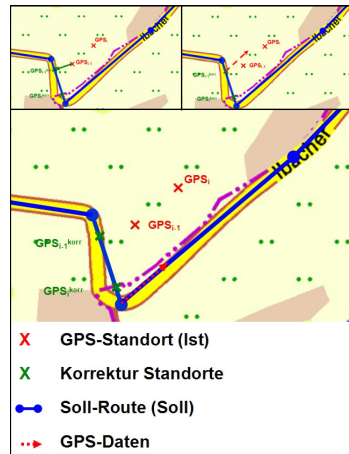


Abbildung 5-4: Problematische Konstellationen beim Kreisbogenverfahren

Man erkennt, dass das Verfahren in bestimmten Situationen fehlerhafte Ergebnisse liefert. Es ist fraglich, wo eine Trennung zwischen fehlerbehafteter und korrekter Standortbestimmung zu ziehen bzw. eine korrekte Anwendung des Verfahrens zu detektieren ist. Für Strecken mit hoher Kurvigkeit ist das Verfahren nicht geeignet, ebenso wenig für zeitlich ausgedehnte Ausfalldauern. Der Einsatz des Odometers schafft hier Vorteile: Einerseits ist zwar mit dem Odometer kein Richtungswinkel bestimmbar, weil eine reine Längenmessung vorgenommen wird, andererseits liefert das Odometer unabhängig vom fehlerbehafteten GPS-Signal relativ exakte Wegstrecken (siehe Abschnitt 5.2).

Extrapolationsverfahren

Das Extrapolationsverfahren gründet sich auf der Hypothese, dass sowohl Winkel- als auch Geschwindigkeitsänderungen in unmittelbar aufeinanderfolgenden Messsekunden üblicherweise nur in gewissen Grenzen auftreten sollten. Der Verlauf von GPS-Messungen hat aber gezeigt, dass in bestimmten Fällen „Sprünge“ zu beiden Seiten der Solltour in der Ortungsbestimmung auftreten.

Beim Extrapolationsverfahren wird daher unterstellt, dass der zuletzt von GPS_{i-2} bis GPS_{i-1} zurückgelegte Wegstreckenvektor erneut von GPS_{i-1} bis GPS_i zurückgelegt wird, was in gewissen Grenzen plausibel ist (siehe Abbildung 5-5 oben).

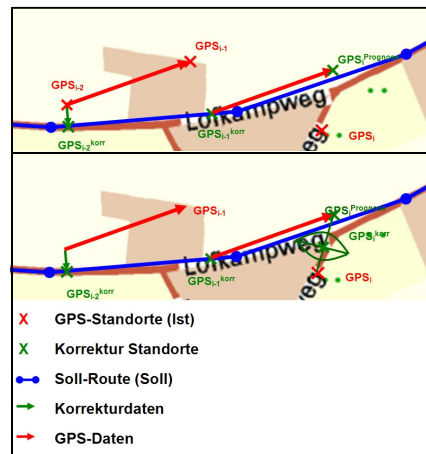


Abbildung 5-5: Extrapolationsverfahren

Um die möglicherweise nicht völlig fehlerhaften Winkel- und Geschwindigkeitsänderungen der Reihe von GPS-Signalen infolge dieser Methodik nicht völlig zu ignorieren, bietet sich eine Methode an, bei der der korrigierte Standort aus dem Mittelpunkt des mit Hilfe der Extrapolation ermittelten Standpunktes und dem vom System ermittelten GPS-Standort festgelegt wird. Dazu werden die

aus der Extrapolation ermittelten x- und y-Koordinaten und die aus dem GPS-Standort entnommenen x- und y-Koordinaten arithmetisch gemittelt (Mittelpunkt der Strecke zwischen diesen beiden Punkten GPS_i und GPS_i^{korr} (siehe Abbildung 5-5 unten).

Der Ablauf wird an der Abbildung erläutert: GPS_{i-n}, \dots, GPS_i seien die vom GPS ermittelten Koordinaten (beispielsweise im Sekundentakt). Für den Schritt i seien zudem die bereits korrigierten Koordinaten von Punkt GPS_{i-1} und GPS_{i-1}^{korr} , bekannt. Der Erwartungswert für den neuen Punkt sei $GPS_i^{Prognose}$. Dieser ergibt sich aus der Differenz zwischen den Punkten GPS_{i-2} und GPS_{i-1} , vom korrigierten Punkt GPS_{i-1}^{korr} aus abgetragen. Auf die Gerade zwischen den Punkten $GPS_i^{Prognose}$ und GPS_i werde eine Mittelsenkrechte abgetragen, der Schnittpunkt mit der Geraden ergebe die neuen, korrigierten Koordinaten des Punktes GPS_i^{korr} .

Das Extrapolationsverfahren ist auf das Vorliegen von GPS-Koordinaten angewiesen und von daher nur zur Kompensation von Ungenauigkeiten des GPS-Signals einsetzbar.

5.2 Korrektur mittels Wegstreckenmessung

Mit Hilfe eines Odometers wird die Wegstreckenmessung eines Fahrzeugs über die Anzahl der Umdrehungen eines Rades und dessen Umfang vorgenommen. Hierzu wird an einem Rad ein Impulsgeber (Speichensensor) befestigt, der einmal pro Radumdrehung berührungslos an einem Impulsempfänger (Magnetsensor) vorbeistreicht. Auf diese Weise kann die Anzahl der Radumdrehungen pro Zeiteinheit ermittelt werden. Diese werden vom Magnetsensor an das Navigationssystem übermittelt. Das System muss über die Information zum Radumfang (der ggf. aus dem Raddurchmesser berechnet werden kann) verfügen, damit die Wegstrecke und, als abgeleitete Größe, die aktuelle Geschwindigkeit berechnet werden kann.

Das Odometer liefert zunächst einmal relativ genaue Werte der abgewickelten Wegstrecke. Laut SCHÖTTLER treten Ungenauigkeiten bei Radsensoren insbesondere durch Verformung und Abnutzung sowie durch Schlupf – hervorgerufen durch Beschleunigungs- und Bremsvorgänge – auf.¹³⁴

Voraussetzung für zuverlässige Werte beim Odometer sind einerseits eine einwandfreie Erkennung des Speichenmagneten durch den Speichensensor. Probleme ergeben sich bei radialer Unwucht des Rades, einem zu großen oder zu kleinen Abstand zwischen Speichenmagneten und -sensor, oder Fremdkörpern dazwischen. In der Regel führen Fehler aber zu einem kompletten Ausfall, unregelmäßige Messwertverteilungen zwischen korrekten Werten und Totalausfall sind selten.

Andererseits sind exakte Informationen über den Radumfang erforderlich. Fehler treten hierbei insbesondere aufgrund der schwierigen Messbarkeit auf, wobei auf Tabellenwerte zurückgegriffen werden kann, in denen die Radumfänge für die verschiedenen Radtypen verzeichnet sind. Weitere Fehlerquellen sind ein falscher, insbesondere zu niedriger Luftdruck oder eine im Laufe der Zeit verschlissene Lauffläche, die zu einem verringerten Radumfang führt. So genannter „Makroschlupf“ tritt beim Fahrrad nur in vernachlässigbarem Umfang entweder als Gleiten oder als Schleudern auf. Beim Gleiten dreht „sich das Rad langsamer [...], als es der Geschwindigkeit des Fahrzeugs entspricht. Von Schleudern spricht man, wenn sich das Rad schneller dreht, als es der Geschwindigkeit des Fahrzeugs entspricht.“¹³⁵ Gleiten führt zu einer Minder-, Schleudern zu einer Mehranzeige der Wegstrecke. Unterschiedliche Radumdrehungen zwischen linker und rechter Seite bei Kurvenfahrten treten aufgrund der Einspurigkeit eines Fahrrads nicht auf. Damit entfällt die beim Pkw mögliche Messbarkeit der Winkeländerungen bei Kurvenfahrten.

¹³⁴ Schöttler, F.: Fahrzeugortung, S. 13 f.

¹³⁵ Schönharting, J.; Bruckmann, D.: Verkehrstechnik I (Skript), S. 7.

Um eine zuverlässige Information über die zurückgelegte Wegstrecke bzw. die Geschwindigkeit geben zu können, sind zwei Methoden geeignet:

- Ermittlung der Zeitdifferenz zwischen zwei Umdrehungsimpulsen,
- Ermittlung der Anzahl an Umdrehungsimpulsen in einem bestimmten Zeitintervall.

Für einen Fahrradtachometer, bei dem die Anzeige der momentanen Geschwindigkeit im Vordergrund steht, ist die erste Methode eher geeignet. Die zweite Methode schlägt hier quasi fehl, weil die Anzahl der Umdrehungsimpulse für ein übliches Zeitintervall von einer Sekunde zu gering ist (bei einem typischen Radfahrertempo von 18 km/h und einem Radumfang von 2 m gibt es 2,5 – also wechselnd 2 oder 3 – Impulse pro Sekunde) bzw. zu große Streuungen aufweist. Abhilfe könnte die Anbringung zusätzlicher Speichenmagneten schaffen.

Tatsächlich ist aber beispielsweise beim für die Messungen verwendeten MoBiGuide nur die zweite Methode anwendbar, weil das System die Anzahl der Umdrehungsimpulse im Sekundentakt liefert.

Weitere Ungenauigkeiten beim Odometer ergeben sich im Wesentlichen aus fünf Gründen:

- 1) Der Nutzer fährt nicht exakt die Ideallinie. Insbesondere auf Steigungen, aber auch auf ebenen Strecken tritt ein mehr oder weniger starkes „Pendeln“ auf, was zu einer Mehrmessung führt.
- 2) Der Nutzer nimmt kleine Abstecher abseits der Tour vor, z. B. wenn eine Pause eingelegt wird, der Weg aus einem anderen Grund verlassen wird oder der Nutzer wieder ein Stück des Weges zurückfährt, weil er z. B. auf andere Personen wartet oder etwas verloren hat. Abstecher von der vorgesehenen Route führen dazu, dass eine Korrektur über die Soll-Route nicht mehr möglich ist. Diese Abweichungen müssen vom System „erkannt“ wer-

den, damit keine Korrekturen des GPS-Signals vom System vorgenommen werden, die faktisch aussichtslos sind.

- 3) Die vom Odometer gemessene Distanz lässt sich nur in der Ebene auf ein x-/y-Gitter projizieren. Fährt der Nutzer dagegen bergauf oder bergab, so führt die Abwicklung der Längendistanz auf eine horizontale Projektionsfläche zu einer fehlerhaften Abweichung nach oben.
- 4) Es wurde keine Tour geladen oder die Tour wurde vorzeitig beendet bzw. verlassen. Eine mangelnde Zuordnung des Nutzerstandortes zur Tour aus den Wegstreckendaten ergibt sich auch, falls der Nutzer die Tour vor oder nach dem vorgesehenen Startpunkt der Tour aufnimmt, sofern von Beginn der Tour an kein GPS-Signal empfangbar ist.
- 5) Die Wegstreckenmessung selbst kann fehlerbehaftet sein. Infolge von Laub oder einen falschen Abstand zwischen Speichenmagnet und Sensor werden einzelne oder sogar sämtliche Radumdrehungsimpulse nicht erfasst. Auch bei nicht mit dem Fahrrad zurückgelegten Abschnitten (ÖPNV-Nutzung, Treppen) werden keine Wegstreckenimpulse generiert. Durch eine fehlerhafte Angabe des Radumfangs kann ebenfalls eine fehlerhafte Wegstrecke berechnet werden.

Bewegt sich der Radfahrer entlang einer vorgegebenen Tour, wie es bei der Nutzung eines Radfahrernavigationssystems Standard sein sollte, bietet es sich an, eine Kontrolle seiner Position anhand des Vergleiches der zurückgelegten Strecke mit der Soll-Strecke vorzunehmen.

Das Verfahren ist insbesondere bei GPS-Ausfall, aber auch zur Fehlerkorrektur nutzbar. Eine Optimierung der GPS-Bestimmung über die Längenmessung ist aber erst dann sinnvoll, wenn die Strecken bekannt sind, auf die die gefahrenen Längen abgetragen werden. Hierzu ist aber erforderlich, dass im System entweder das komplette Wegenetz oder die geplante Route hinterlegt sind. Eine Abwicklung auf das Wegenetz ist nur in engen Zeitfenstern möglich, die Anzahl der möglichen Abbiegeentscheidungen steigt in Abhängigkeit von der Zeit. Der

zugehörige Verzweigungsbaum wird stark verästelt, was einer exponentiellen Zunahme potenzieller Standorte gleichkommt (vgl. Abbildung 5-6). Der Einbezug der geplanten Fahrtroute ist daher für das vorliegende Optimierungsverfahren geeigneter.

Korrektur mittels Wegstreckenmessung bei zugrunde gelegter Tour

Dieser erweiterte Lösungsansatz der Optimierung des GPS-Signals mit Hilfe eines Odometers sieht vor, den Verlauf der Tour heranzuziehen. Startet der Nutzer die Tour, ist es möglich, mit Hilfe der Odometerimpulse und der vorgegebenen Route die Position des Nutzers zu berechnen. Die Fragestellungen, die sich aus der Umsetzung dieses Ansatzes ergeben, sind:

- wie exakt ist die vorliegende Methode?
- wie ändert sich die Genauigkeit infolge ungenauer Linienfolge des Nutzers?
- wie wirken sich Ungenauigkeiten bzw. Fehler der Odometerimpulse auf die so vorgenommene Standortbestimmung aus?
- wie kann das System mit Abstechern, Wendemanövern usw. des Nutzers umgehen?
- wie muss das System mit dem GPS-Signal verknüpft werden, um zu optimalen Ergebnissen zu gelangen?
- welche Genauigkeiten lassen sich mit Hilfe des Systems erzielen?
- Ist das Systemkonzept geeignet, um GPS-Ausfälle zu kompensieren?

Voraussetzung für die Methodik ist, dass im Navigationsgerät eine Route abgelegt bzw. geladen ist. Eine Route (auch Track) besteht aus der Aneinanderreihung von so genannten „Waypoints“ (Wegpunkten) bzw. Knoten. Diese können z. B. am PC mit einem geobasierten Anwendungsprogramm auf Kartenbasis, beispielsweise der TOP 50-CD der Landesvermessungsämter, erstellt und in einer Datei abgespeichert werden. Der MobiGuide erlaubt es, speicherabhängig

eine Vielzahl von Routen mitzuführen und jeweils eine davon zu laden und auf dem passenden Kartenhintergrund anzuzeigen.

Wichtig für eine Korrektur des GPS-Signals auf der Basis von Touren ist die Genauigkeit ihrer Erstellung. Die gebräuchlichen digitalen Karten der Landesvermessungsämter im Maßstab 1:50.000 sind hierfür nur eingeschränkt brauchbar, weil zu wenige Details – z. B. die exakte Radwegführung – erkennbar sind. Die nach der ERA empfohlene minimale Radwegbreite von 1,60 m entspricht auf der Karte einer „Stärke“ von 1/30 mm. Das fehlerhafte Abgreifen von Punkten mit einer maßstäblichen Abweichung von einem Millimeter stellt in der Natur einen Fehler von 50 Metern dar, was größer ist als die mittlere Abweichung des GPS-Empfängers. Für eine zuverlässige Kartenbasis muss auf Karten mit einem Maßstab größer 1:20.000 zurückgegriffen werden. Besser ist die Verwendung eines digitalisierten Straßennetzes der lokalen Tiefbau- bzw. Vermessungsämter. Die beschriebene Ungenauigkeit wird noch verstärkt, wenn die Touren fahrtrichtungsfein erstellt werden. Dies ist der Fall, wenn beispielsweise der seitenrichtige, straßenbegleitende Radweg genutzt werden soll.

5.3 Korrektur durch Einbezug der Höhenmeter

Neben den geoid-bezogenen x-/y-Informationen liefert ein GPS-Empfänger auch die z-Koordinate der Höhe. Die Höhenmessung erfolgt mittels Messung über das Ellipsoid (Ellipsoidische Höhe). Mit Hilfe der als Raster im Gerät gespeicherten Geoidinformationen wird für die aktuelle Position das Geoid interpoliert. Daraus kann die Höhe – bezogen auf das Geoid – berechnet werden. Aus der Interpolation des Geoids ergeben sich geringe Abweichungen zum tatsächlichen Geoid. Diese Abweichungen sind aber hinsichtlich der Höhengenaugkeit des eigentlichen GPS-Signals gering. Der Ungenauigkeitsfaktor der Höhenmessung gegenüber Messungen der horizontalen Position beträgt ungefähr 1,8. In der Praxis im Rahmen des Projekts ArMont hat sich aber gezeigt, dass die Fehler der Höhenangaben des GPS-Signals weit über 100 Meter hinausgehen können.

Insbesondere in topografisch bewegten Gegenden könnte aber eine Standortbestimmung über die Höhe eine Möglichkeit zur Verbesserung oder Kompensierung des GPS-Signals sein. Denkbar ist der Einsatz eines barometrischen Höhenmessers (Altimeter), mit dem Genauigkeiten zwischen 1 und 20 m¹³⁶ erreicht werden können. Bei der barometrischen Höhenmessung wird über die Messung des Luftdrucks die Höhe des Nutzers über dem Meeresspiegel ermittelt. Einschränkungen bei dieser Methode ergeben sich durch

- wetterbedingte Einflüsse, z. B. bei Aufziehen von Tiefdruckgebieten,
- Veränderungen über große Höhen,
- durch die Notwendigkeit der Kalibrierung von Höhen an bekannten Höhen.

Zusätzlich zur Höhenbestimmung des Nutzers ist es erforderlich, dass im System Karten mit hinterlegtem Höhenraster abgelegt sind. Über diese Höhendaten kann die Plausibilität bzw. der Standort des Nutzers bestimmt bzw. verdichtet werden. Basis für die Höhenmodelle in topografischen Karten sind in der Regel die Digitalen Geländemodelle (DGM) verschiedener Maßstäbe. Die Rasterweite des DGM 25 in Nordrhein-Westfalen beträgt 25 x 25 m und weist eine Höhen Genauigkeit von ein bis drei Metern auf.¹³⁷ Dazwischenliegende Höhenwerte werden interpoliert. Engmaschigere Kartenwerke entstehen auf der Basis von Laser-Scan-Befliegungen mit einer mittleren Rasterweite von bis zu 3 Metern.¹³⁸ Aufgrund der teilweise noch recht hohen Ungenauigkeit dieser Höhendaten ergibt sich, dass das Verfahren eher zur Standortbestimmung bei Signalausfall als zur Genauigkeitsverbesserung genutzt werden kann.

¹³⁶ <http://de.wikipedia.org/wiki/Altimeter>

¹³⁷ Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Produkte und Dienstleistungen 2006/2007, S. 20/21.

¹³⁸ <http://www.stua-si.nrw.de/htm/service/links/leitfaden.pdf>.

Methodik

Der Standort unmittelbar vor Ausfall des GPS-Signals ist dem System – mit der üblichen, nicht bekannten Ungenauigkeit – bekannt. Zur Optimierung dieses möglicherweise fehlerbehafteten Standortes kann das Projektionsverfahren (s. o.) genutzt werden. Bei Ausfall des GPS bei Weiterfahrt wird kein GPS-Signal, sondern nur noch ein Höhenmeter-Signal und ggf. ein Wegstreckensignal vom System geliefert.

Zur Ermittlung des Standortes werden im Bereich des noch zurückzulegenden Tourabschnitts Punkte gesucht, deren z-Wert (Höhe) eine möglichst kleine Abweichung gegenüber der aktuellen Höhe aufweist. Um die Zahl der möglichen Punkte einzuschränken, wird durch Ermittlung der Fahrzeit seit GPS-Ausfall die mögliche zurückgelegte Wegstrecke berechnet. Da unterstellt wird, dass keine Wegstreckensignale verfügbar sind, kann die seit GPS-Ausfall zurückgelegte Wegstrecke räumlich begrenzt werden durch Annahme einer Fahrgeschwindigkeit, z. B. in einem festen Intervall von $v_{\min} = 0$ km/h bis v_{\max} (z. B. 40 km/h). Diese kann in Abhängigkeit von der Steigung zwischen der Höhe des GPS-Ausfalls und der aktuellen Höhe oder aber aus den Geschwindigkeitswerten der zurückliegenden Tour weiter eingegrenzt werden.

Die vorliegende Methodik kann danach differenziert werden, ob

- eine Tour im System hinterlegt ist oder
- keine Tour, zumindest aber das Streckennetz bekannt ist.

Ist nur das Streckennetz, nicht aber die geplante Tour bekannt, so wächst die Zahl möglicher Standorte mit zunehmender Fahrzeit ohne GPS-Verfügbarkeit, weil bei der Fahrt im Netz zahlreiche Verästelungen möglich sind. Folgen auf einen Standort im Verlauf der Tour n Knoten mit der Armigkeit k_i in beliebiger Folge aufeinander, so steigt die Zahl der Kombinationsmöglichkeiten für den neuen Standort des Nutzers auf

$$S_{\text{pot.}} = \sum_{i=1}^m k_i - 2n + 1$$

Formel 5-2

mit $S_{\text{pot.}}$: Anzahl potenzieller Standorte
 k : Armigkeit des Knotens i
 n : Anzahl der Knoten

an, wenn unterstellt wird, dass der Nutzer nicht zurückfährt. Für zwei aufeinanderfolgende 4-armige Knotenpunkte ergibt sich daraus die Anzahl von 5 möglichen Standorten (vgl. Abbildung 5-6) als Summe aus $(4 + 4) - 2 \cdot 2 + 1 = 5$. Tatsächlich ist die Zahl der Entscheidungen bei großen n geringer, weil in der Praxis mehrere Kombinationen von Abbiegeentscheidungen zu identischen Standorten führen.

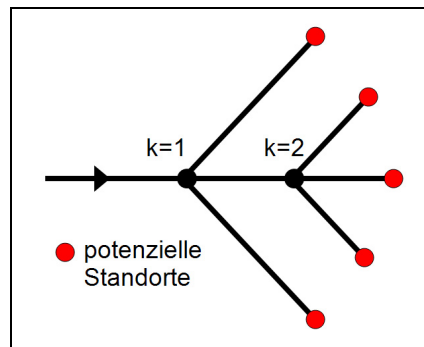


Abbildung 5-6: Anzahl möglicher Standorte nach Passieren zweier 4-armiger Knotenpunkte

Das vorgestellte Verfahren kann durch Einbezug eines Odometersignals ergänzt und optimiert werden. Mit Hilfe des Wegstreckensignals kann die Anzahl möglicher Standorte deutlich eingeschränkt werden. Bei Vorliegen einer Route anstatt eines Netzes kann u. U. der mit Hilfe der Wegstreckensignale ermittelte Standort durch die Höhenmessung korrigiert werden.

Ausgangspunkt der Berechnung sind Ort und Zeitpunkt des Standortes mit dem zuletzt verfügbaren GPS-Signal. Durch Abwicklung der gefahrenen Wegstrecke auf die bekannte Tour bzw. das Wegenetz ergibt sich ein einziger bzw. ergeben sich mehrere mögliche Standorte.

Ist dem System die Fahrtroute bekannt, kann geprüft werden, ob die für diesen Standort aus dem Netz abgeleitete Höhe mit der vom Radfahrravigationssystem gemessenen Höhe übereinstimmt. Ist dies nicht der Fall, kann die Standortbestimmung korrigiert werden. Voraussetzung hierfür sind eine hohe Netzdichte der Höhen und eine exakte Höhenmessung mit dem Gerät.

Ist im System das Wegenetz hinterlegt, kann die zurückgelegte Wegstrecke auf das Netz abgewickelt werden. Dadurch ergibt sich ein Kollektiv mehrerer, theoretisch denkbarer Standorte. Die Höhen dieser potenziellen Standorte werden aus dem Netz berechnet und mit der aktuellen Systemhöhe verglichen. Es ist zu erwarten, dass der Standort mit der geringsten Abweichung zur tatsächlichen Höhe der korrekte Standort ist.

Das Modellnetz kann dazu genutzt werden, statische Ungenauigkeiten des Höhenmessers zu ermitteln. Dazu wird während der Fahrt bei vorhandenem GPS-Signal permanent die zum Standort zugehörige Höhe des Modellnetzes mit dem vom Höhenmesser ermittelten Wert verglichen. Eine konstante Abweichung deutet auf eine Ungenauigkeit in der Höhenmessung hin und kann als Korrekturbeitrag berücksichtigt werden. Wechselnde Differenzen können auf Ungenauigkeiten im Netz oder Fehler bei der Höhenmessung hinweisen.

Um die Umsetzbarkeit des Verfahrens festzustellen, wurde am Beispiel des Essener Radwegmodells überprüft, inwieweit eine Ersatzmessung über die Höhe zu brauchbaren Ergebnissen führen würde. Je topografisch bewegter der Untersuchungsraum ist, d. h. je stärker die Höhenmeter entlang des Netzes bzw. der Tour streuen, desto günstiger ist die Prognose für einen Einsatz des Verfahrens, weil durch eine große Streuung der Höhenmeter eine eindeutigere Zuord-

nung des Standortes über die z-Koordinate vorgenommen werden kann. Das Modellnetz des Essener Radwegenetzes ist daher nicht optimal geeignet, weil es nur in begrenztem Umfang variierende Höhen aufweist. Sollte das Verfahren jedoch am Beispiel Essen zu brauchbaren Ergebnissen führen, ist eine Portierbarkeit auf die meisten anderen räumlichen Bereiche denkbar.

Für die Überprüfung der Einsetzbarkeit wurden entlang einer Rundtour und einer Etappe in Essen zehn zufällige Punkte auf dieser Tour bestimmt, an denen ein GPS-Ausfall auftreten soll. Die zufälligen Punkte wurden durch jeweils eine gleich verteilte Zufallszahl $1..k_R$ und $1..k_E$ über die k Kanten der Rundtour bzw. der Etappe und eine gleich verteilte Position p_K von $[0..1[$ innerhalb der Kante ermittelt. Dass die Wahrscheinlichkeit für den GPS-Ausfall auf einer kürzeren Kante im Vergleich zu den längeren Kanten überrepräsentiert wird, ist für das weitere Vorgehen ohne Belang.

Ausgehend vom Standort des GPS-Ausfalls wird angenommen, der Nutzer fahre eine bestimmte Zeit $t_i = \{10; 30; 90; 270\}$ Sekunden mit der mittleren Geschwindigkeit $v_{Rad} = 5$ m/s im Streckennetz weiter. An den folgenden Knotenpunkten sind jeweils verschiedene Abbiegeentscheidungen möglich. Mit zunehmender Ausfalldauer t_i steigt die Zahl der möglichen Routenentscheidungen exponentiell, in Abhängigkeit von der Anzahl der passierten Knoten und der Komplexität der Knoten. Mögliche Standorte, die sich für die Fahrt des Nutzers ohne Informationen über seinen tatsächlichen Standort ergeben, sind in den nachfolgenden Abbildungen exemplarisch dargestellt. Das rote Quadrat zeigt jeweils die Position, an der das GPS ausfällt, die roten Kreise stellen die möglichen Standorte nach Zurücklegung des Weges

$$s_i = v_{Rad} * t_i$$

Formel 5-3

dar.

Insgesamt wurden Ausfälle für neun Rundtouren und für zehn Etappentouren simuliert. Für die simulierten 19 Touren ergaben sich insgesamt 1923 potenzielle Standorte für die vier Abwicklungslängen x_i .



Abbildung 5-7: Mögliche Nutzerstandorte bei GPS-Ausfall nach Zurücklegung verschiedener Wegstrecken (auf der Basis der TOP 10)¹³⁹

¹³⁹ Hintergrundkarte: Landesvermessungsamt NRW: CD-ROM TOP 10 NRW.

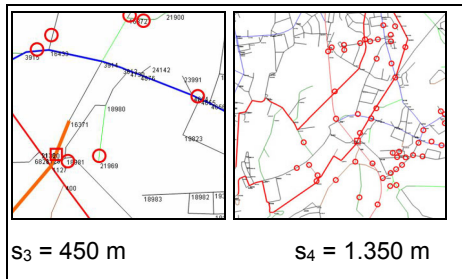


Abbildung 5-8: Mögliche Nutzerstandorte bei GPS-Ausfall nach Zurücklegung verschiedener Wegstrecken (auf der Basis des Modellnetzes)¹⁴⁰

Es wird deutlich erkennbar, wie mit zunehmendem Wegfortschritt unter Unsicherheit die Zahl der möglichen Standorte zunimmt (siehe Tabelle 5-2). Die Auswertungen anhand von 19 verschiedenen Positionen innerhalb der Tour ergab, dass nach 1350 m zurückgelegter Wegstrecke durchschnittlich 83 potenzielle Standorte für den Nutzer denkbar sind.

$N = je\ 19$	Mittelwert [Häufigkeit]	Standard- abweichung [Häufigkeit]
$x_1 = 50\ m$	1,68	0,58
$x_2 = 150\ m$	2,95	1,81
$x_3 = 450\ m$	13,95	7,76
$x_4 = 1350\ m$	82,63	26,57

Tabelle 5-2: Statistische Verteilung der Anzahl potenzieller Standorte

¹⁴⁰ Hintergrund: Logiball-Netz, eigene grafische Aufbereitung.

$N_{ges.} = 1923$ $\Sigma N_{Stabw.} = 63$	Mittelwert der Standardabweichungen des Fehlers in z-Richtung [m]
$x_1 = 50$ m	1,76 (N=12)
$x_2 = 150$ m	2,86 (N=15)
$x_3 = 450$ m	4,61 (N=18)
$x_4 = 1350$ m	9,45 (N=18)

Tabelle 5-3: Mittelwert aller Standardabweichungen der z-Koordinaten potenzieller Standorte

Die Tabelle 5-3 zeigt die Mittelwerte für die Standardabweichungen der Höhenverteilung aller potenziellen Standorte. Von den 76 potenziellen Standardabweichungen der z-Koordinaten (vier Abwicklungslängen multipliziert mit 19 Touren) sind effektiv 63 Standardabweichungen ermittelbar, bei denen also der Stichprobenumfang größer 2 ist. Es zeigt sich, dass mit zunehmender GPS-Ausfalldauer die Standardabweichung der Anzahl potenzieller Standorte zunimmt. Mit zunehmender Standardabweichung steigt aber auch die Differenzierbarkeit möglicher Standorte über die Höhe, es kommen also zahlreiche potenzielle Standorte aufgrund großer abweichender z-Werte als Standort nicht in Frage.

Darüber hinaus wurde die tatsächliche Höhe, also die Ist-Höhe, den potenziellen Höhenwerten gegenübergestellt und die Verteilung der Abweichungen dieser beiden Werte dargestellt (siehe Tabelle 5-4).

	N	Mittelwert [m]	Standard- abw. [m]
$x_1 = 50 \text{ m}$	32	0,93	1,14
$x_2 = 150 \text{ m}$	53	1,88	1,49
$x_3 = 450 \text{ m}$	265	3,75	3,63
$x_4 = 1350 \text{ m}$	1570	7,57	6,89

Tabelle 5-4: Statistische Verteilung der Höhendifferenzen zwischen Standort und potenziellen Standorten

Analog zur Zunahme potenzieller Standorte mit fortschreitender GPS-Ausfalldauer nehmen die Differenzen zwischen der Standorthöhe und der Höhe der potenziellen Standorte zu. Eine Auswertung der Differenzen zwischen der Höhe des jeweiligen Standortes und der Höhe des potenziellen Standortes ergibt die in der Tabelle dargestellten Mittelwerte und Standardabweichungen: Der Mittelwert der Differenzen steigt von 0,93 m bei kurzen GPS-Ausfalldauern ($s_1 = 10 \text{ s}$) bis zu 7,57 m bei sehr langen GPS-Ausfalldauern ($s_4 = 270 \text{ s}$), die Standardabweichung vergrößert sich sukzessive von über einem Meter (kurze Strecke) auf knapp 7 Meter (lange Strecke).

Aus den Untersuchungen ergibt sich, dass die Zahl möglicher Standorte nach einer kurzen Fahrtzeit ohne GPS-Verfügbarkeit mit im Mittel zwei bis drei Punkten (Fahrtstrecke ca. 50-150 m) sehr gering ist. Die Streuung der an diesen potenziellen Standorten im Modell ermittelten Höhen ist sehr gering. Der wesentliche Grund dafür ist die beschriebene zu geringe Hügeligkeit im Verlauf der ausgewählten Radtour. Bei längerer Fahrdauer ohne GPS steigt allerdings die Streuung der Höhe potenzieller Standorte an, gleichzeitig nimmt auch die Anzahl möglicher Standpunkte stark zu (auf bis zu 83 bei $x_4 = 1.350 \text{ m}$).

Um eine eindeutige Standortbestimmung im Untersuchungsraum vornehmen zu können, ist eine Höhenmessung mit einer Genauigkeit von etwa 1 m notwendig. Eine Messung mit einer solch hohen Präzision ist für ein Radfahrernavigations-

system nicht realisierbar. Damit scheidet der Einsatz eines Höhenmeters in topografisch wenig bewegten Bereichen aus.

5.4 Korrektur durch Einbezug eines Kompasses

Durch Integration eines magnetischen bzw. elektronischen Kompasses in das Navigationssystem könnte die aktuelle Fahrtrichtung ermittelt werden. Damit könnte die Folge der letzten GPS-Signale auf ihre Richtigkeit hin überprüft werden. In Verbindung mit einem Odometer (s. o.) wäre die Möglichkeit gegeben, auch ohne das Vorliegen einer vorgegebenen Tour, sondern nur auf der Basis des digitalen Radwegenetzes den Standort beim Ausfall des GPS-Signals – ausgehend vom letzten empfangenen Standort – rechnerisch zu ermitteln.

Allerdings weist ein digitaler Kompass nur eine begrenzte Genauigkeit auf (die Anbieter versprechen für ihre Geräte bis zu 1° Genauigkeit). Abweichungen ergeben sich zum Beispiel durch äußere Störgrößen wie Magnetfelder. Dennoch vermag die Kombination aus GPS-Ortung und Richtungsmessung über einen digitalen Kompass die Standortgenauigkeit zu verbessern. Insbesondere bei Ausfall der GPS-Ortung kann ein solches System noch erheblich weiter optimiert werden, wenn die Signale eines Odometers ausgewertet werden. Auch bei zeitlich ausgedehntem GPS-Ausfall kann mit Hilfe der Richtungsmessung und der Wegstreckenimpulse vermutlich eine zumindest zufriedenstellende Ersatzbestimmung der Position durchgeführt werden.

5.5 Korrektur mittels Überprüfung der Plausibilität des GPS

Korrekturverfahren, die sich auf die GPS-Daten selbst stützen, sind nur bei ungenauer Standortbestimmung, nicht bei Ausfall des Signals geeignet. Ein denkbarer Ansatz ist die Ableitung von Kenngrößen aus den GPS-Signalen, wie z. B. der Fahrgeschwindigkeit, und die Kontrolle der Plausibilität dieser Größen.

Kontrolle der Plausibilität der Geschwindigkeit

Eine rein algorithmische Lösung könnte darin bestehen, die Plausibilität der aktuellen Position über verschiedene Verfahren zu prüfen. Dazu könnte gehören, das aktuelle Geschwindigkeitsprofil des Nutzers mit seinem bisherigen Geschwindigkeitsprofil oder dem eines anderen Nutzers zu vergleichen.

Auch wäre es möglich, anhand des Streckenprofils plausible Geschwindigkeiten abzuleiten. Dazu müsste ein geeignetes Höhenprofil im Netz hinterlegt sein (siehe vorheriger Abschnitt) und ggf. die Oberflächenbeschaffenheit der Strecke bekannt sein bzw. es müssten Geschwindigkeitsattribute der einzelnen Streckenabschnitte vorliegen. In der Regel existieren derzeit keine solchen Informationen, abgesehen von ausgewählten Netzen, in denen ein Radfahrerouting durchgeführt werden kann. Ein von der Längsneigung der Strecken abhängiges Geschwindigkeitsprofil kann mit dem Diagramm aus Abbildung 2-7 abgeschätzt werden. Für die Bestimmung des individuellen Fahrverhaltens, welches im entsprechenden Diagramm implizit berücksichtigt wird, kann auf ein im Gerät gespeichertes Nutzerprofil zurückgegriffen werden bzw. die zurückgelegte Durchschnittsgeschwindigkeit kann ins Verhältnis der Attribute der Kantenvektoren gesetzt werden.

Kontrolle der Plausibilität des GPS-Signals

Bei einer Korrektur des GPS-Signals ausschließlich mit Hilfe des GPS-Signals selbst kommen verschiedene Möglichkeiten in Betracht:

- Es wird die mit dem GPS-Signal mitgelieferte Anzahl an empfangbaren Satelliten genutzt, um einen Aufschluss über die vermeintliche Genauigkeit des Signals zu erhalten,
- es wird über Tag und Uhrzeit zur GPS-Messung die Anzahl der „sichtbaren“ Satelliten ermittelt – hierzu sind Tabellenwerke mit entsprechenden Auskünften verfügbar, aus denen auf die Genauigkeit geschlossen werden kann,

- es werden die so genannten „dop-Werte“ des GPS-Signals genutzt, die ihrerseits aus den verfügbaren Satellitensignalen und deren Stellung zueinander berechnet worden sind, um Aussagen über die Genauigkeit zu treffen (siehe Abschnitt 2.3.1).

Bei allen drei Methoden bleibt das Problem bestehen, dass zwar möglicherweise die Genauigkeit hinsichtlich ihrer quantitativen Größe statistisch eingegrenzt werden kann, nicht aber, in welche konkrete Richtung die Abweichung vom tatsächlichen Standpunkt aus auftritt. Eine solche Ungenauigkeit in eine bestimmte Richtung tritt z. B. bei der Abschattung durch Gebäude auf (siehe Abbildung 3-8). In diesem Fall ist der Fehler in der Ost-West-Achse sehr groß, während die Lage in Nord-Süd-Richtung recht genau bestimmt werden kann. Es wäre für einen konkreten Optimierungsalgorithmus aber zu untersuchen, wie groß die Ungenauigkeit anzusetzen und in welche Richtung (nach Osten oder nach Westen) sie vom signalisierten Standpunkt aus abzutragen ist.

5.6 Korrektur mittels Ähnlichkeitstransformation

Bei einer Ähnlichkeitstransformation handelt es um eine spezielle Art der Transformation. Unter einer Transformation wird die Abbildung einer Menge auf eine andere Menge nach einer bestimmten Vorschrift verstanden.

Ziel der Ähnlichkeitstransformation ist es, mit Hilfe mathematischer Methoden den Verlauf einer aufgezeichneten oder zurückgelegten Tour innerhalb eines abgesteckten Kartenraums einer Trasse bzw. einem Netzausschnitt zuzuordnen.^{141 142}

Um eine mögliche Übereinstimmung zwischen der Karte und der Tour bestimmen zu können, ist es zunächst einmal erforderlich, das Wegenetz der Karte

¹⁴¹ Vgl. Czommer, R.: Leistungsfähigkeit fahrzeugautonomer Ortungsverfahren auf der Basis von Map-Matching-Techniken, S. 16.

¹⁴² <http://www.geoinformatik.uni-rostock.de>.

sowie die Tour einheitlich in Form von Vektor- oder Rasterdaten vorliegen zu haben. Grundsätzlicher Gedanke bei der Korrekturmethode über die Ähnlichkeit ist die Annahme, dass sich die GPS-Koordinaten der gefahrenen Strecke insgesamt relativ gleichmäßig gegenüber der Soll-Route verschieben (z. B. durch Abschattung).

Bei der Ähnlichkeitstransformation wird daher mittels Anwendung der geometrischen Methoden „Rotation“ (Drehung), „Skalierung“ (Maßstabsveränderung) und „Translation“ (Verschiebung) versucht, eine Abbildung in eine andere zu überführen.¹⁴³ Mathematisch wird dazu die Transformation

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

Formel 5-4

in die Ähnlichkeitstransformation der Form

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s \cdot \cos\alpha & -s \cdot \sin\alpha \\ s \cdot \sin\alpha & -s \cdot \cos\alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}$$

Formel 5-5

überführt. Mittels Vereinfachung in der Form $s \cdot \cos \alpha = a_1$, $s \cdot \sin \alpha = b_1$, $x_1 = a_0$ und $y_1 = b_0$ und Auflösung nach X und Y erhält man die beiden Gleichungen

$$X = a_0 + a_1x - b_1y,$$

$$Y = b_0 + b_1x + a_1y$$

Formel 5-6

für deren Lösung man mindestens zwei Passpunkte P_1 und P_2 benötigt. Aufgrund der vier Parameter a_0 , a_1 , b_0 und b_1 spricht man auch von einer

¹⁴³ Vgl. Jugel, Henri: Aufbereitung von Rasterkarten als Grundlage thematischer Kartenansichten, S. 19.

4-Parameter-Transformation oder – nach dem Geodäten Friedrich Robert Helmer – von einer Helmertransformation.¹⁴⁴

Angewendet auf das vorliegende Problem der Überprüfung, ob ein zurückgelegter, aufgrund von GPS-Ungenauigkeiten nicht korrekt ermittelter Streckenzug mit einem Ausschnitt aus dem vorliegenden Netz übereinstimmt, muss für einen begrenzten Ausschnitt der zuletzt zurückgelegten Strecke, hier beispielsweise von GPS_i bis GPS_{i-1} über den Verlauf der Soll-Daten $Soll_1$ bis $Soll_n$ (Abbildung 5-9, blauer Polygonzug) geprüft werden, ob eine Ähnlichkeit vorliegt.

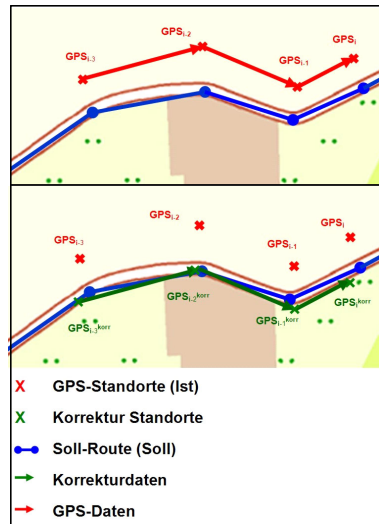


Abbildung 5-9: Einpassung des GPS-Streckenzugs in die Sollroute zum Zeitpunkt GPS_i

Im Beispiel der Abbildung 5-9 bezeichnet die rote Kurve die vom GPS ermittelten Punkte. Die blaue Linie stellt einen Ausschnitt der Soll-Route dar. Offensichtlich sind sämtliche GPS-Punkte mehr oder weniger weit nach Norden gegenüber der Soll-Kurve verschoben. Wenn „das Muster“ des betrachteten (ro-

¹⁴⁴ Göpfert, Wolfgang: Raumbezogene Informationssysteme, S. 143ff.

ten) Ausschnitts an keiner zweiten Position innerhalb des blauen Linienzugs auftaucht, ist zu erwarten, dass tatsächlich der blaue Linienzug befahren wurde.

Das Verfahren der Ähnlichkeitstransformation ist als Korrekturmethode ungenauer GPS-Signale, nicht jedoch bei GPS-Ausfall geeignet. Für die Methode stehen bereits fertige Algorithmen zur Verfügung, so dass die Genauigkeit entsprechender Verfahren an dieser Stelle nicht geprüft werden soll. Für eine Korrektur mittels Ähnlichkeitstransformation ist das Vorhandensein einer Route oder eines vollständigen Radwegenetzes erforderlich. Da bislang weder Routen noch vollständige Wegenetze auf Radfahrernavigationssystemen zu finden waren, war der Einsatz des Verfahrens in diesem Bereich bisher nicht möglich.

Das Verfahren der Ähnlichkeitstransformation ist ein mathematisch recht aufwändiges Verfahren, das auf den von Radfahrernavigationssystemen genutzten PDAs vermutlich nicht umgesetzt werden kann. Da in dieser Arbeit ein bewusst einfaches Verfahren zur ersatzweisen Standortbestimmung gewählt werden soll, erscheint das betrachtete Verfahren dafür nicht geeignet.

6 Auswirkungen der Standortoptimierung auf die Wahrscheinlichkeit, sich bei einer Radtour zu verfahren

Im vorhergehenden Kapitel wurden sechs denkbare Verfahren zur Optimierung der Standortbestimmung von Radfahrern beim Einsatz eines Navigationssystems diskutiert.

Das dritte und das vierte Verfahren (Höhenmeter, Kompass) sind aufgrund des hohen technischen Aufwands bzw. des eingeschränkten Nutzungsumfelds für eine Verbreitung nicht geeignet.

Das sechste Verfahren (Ähnlichkeitstransformation) erscheint aufgrund seiner Komplexität für den Einsatz auf teilweise noch recht leistungsschwachen Radfahrernavigationssystemen ungeeignet.

Das Verfahren über die Plausibilität stellt eher einen Ansatz für die Erkennung von Fehlern als einen konkreten Lösungsansatz dar.

Die mathematischen Korrekturansätze stellen sehr triviale Lösungsansätze dar, die aber anhand von aufgezeichneten Tracks als geeignet bei GPS-Ungenauigkeit eingestuft werden konnten.

Da ein möglichst einfaches Verfahren zur Standortoptimierung für Radfahrernavigationssysteme zum Einsatz kommen soll, und das „Korrekturverfahren unter Einbezug der Wegstreckenmessung“ sich sowohl das Projektionsverfahren als auch ansatzweise das Kreisbogenverfahren zunutze macht, wird die Entwicklung eines Lösungsansatzes für die Korrektur mittels Odometer weiterverfolgt. Nach der Entwicklung des Verfahrens (Abschnitt 6.1) werden seine Einsatzgrenzen erläutert (Abschnitt 6.2), ehe anschließend seine Eignung getestet (Abschnitt 6.3) und abschließend eine Bewertung vorgenommen wird (Abschnitt 6.4).

6.1 Entwicklung des Simulationsalgorithmus

Im Folgenden wird ein Algorithmus (vgl. hierzu Anhang A-5 und Anhang A-6) mittels Wegstreckenmessung bei zugrunde gelegter Tour entwickelt. Es wird

dabei die tatsächlich gefahrene Distanz betrachtet, und nicht die aus der Differenz der – fehlerhaften – GPS-Signale ermittelte Wegstrecke. Beim Einsatz des Algorithmus wird also das Vorhandensein eines GPS-Signals ausgeklammert. Zur Kontrolle der Leistungsfähigkeit des Modells sind ergänzende Aufzeichnungen des GPS-Signals herangezogen worden.

Wesentliche Voraussetzung für eine plausible Positionsbestimmung aus der zurückgelegten Wegstrecke ist, dass sich der Nutzer entlang der vorgesehenen Touren bzw. Routen im Netz entlang bewegt.


Der entwickelte Algorithmus basiert auf

- der letzten bekannten GPS-Position,
 - der geplanten Route und
 - der seit GPS-Ausfall zurückgelegten Wegstrecke
- und berechnet ersatzweise den wahrscheinlichen Standort des Nutzers. Hierfür wurde eine Tour definiert, für die die GPS-Signale und die Wegstreckensignale aufgezeichnet wurden.

Der Algorithmus besteht aus den Komponenten

- Ermittlung des Ausfallzeitpunktes,
- Ermittlung der Ausfalldauer,
- Projektion des Standortes auf die Tour,
- Bestimmung des Verschiebungsvektors,
- Abwicklung der Wegstrecke auf die Tour,
- Ermittlung der Fehlergröße,
- Einbezug des Verschiebungsvektors,
- Ermittlung der modifizierten Fehlergröße,
- Variation des Radumfangs,
- Ermittlung der modifizierten Fehlergrößen für die variierten Radumfänge.

Die Ausfalldauer (b) wird variiert, wobei für jede simulierte Ausfalldauer etwa 100 verwertbare Simulationen durchgeführt worden sind.

Der Ausfallzeitpunkt (a; Symbol  in Abbildung 4-31) wurde stochastisch aus dem Kollektiv 1..(k-x) der k Kanten der Tour ermittelt. Der Parameter x ist positiv korrelierend mit der Ausfalldauer. Damit wird gewährleistet, dass die zurückgelegte Wegstrecke im Bereich der geplanten Tour komplett abgewickelt wird. Die für den Ausfallzeitpunkt aufgezeichneten Daten (Position x, y; Saldo Odometerimpulse) werden ausgelesen.

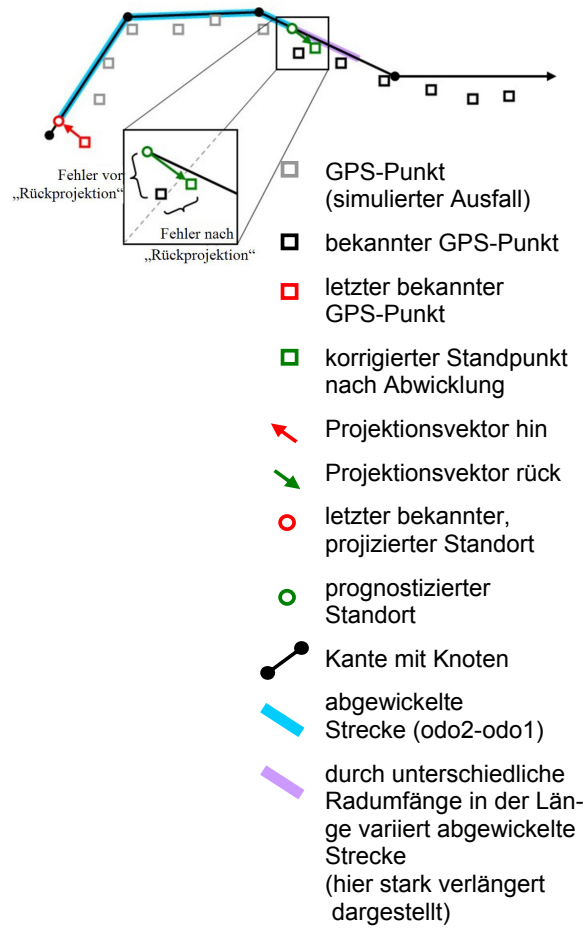




Abbildung 6-1: Methodisches Vorgehen der Optimierung mittels Wegstreckenmessung bei zugrunde gelegter Tour

Ausgehend von dem tatsächlich ermittelten Standort wird der wahrscheinlichste Standort auf der Route ermittelt (c; ○).

Für die Bestimmung des Standortes auf der Tour wird das Projektionsverfahren (siehe in Abschnitt 5.1: „Projektionsverfahren“) angewendet. Hierbei wird unterstellt, dass der Nutzer den nächstgelegenen Punkt auf der Tour einnimmt. Zur Bestimmung dieses Punktes wird der zuletzt bekannte, vom GPS ermittelte Standort mit allen Kanten verglichen und es werden die nächstgelegene Kante sowie das Lot darauf bestimmt. Die Differenz zwischen diesem Punkt und dem GPS-Standpunkt stellt den Projektionsvektor (d ; ) und damit quasi ein Maß für die Genauigkeit des GPS-Signals dar. Das Verfahren nimmt in Kauf, dass der tatsächliche Punkt sowohl hinter als auch vor dem ermittelten Punkt auf der Tour oder auch abseits der Tour liegen kann.

Ausgehend von dem so ermittelten GPS-Ausfall-Standort wird die für die GPS-Ausfalldauer zurückgelegte Wegstrecke berechnet. Diese ergibt sich als Differenz zwischen den Odometerwerten zu den Zeitpunkten „GPS-Ausfall“ ($odo1$) und „GPS-Ausfall + Ausfalldauer“ ($odo2$), multipliziert mit dem Radumfang. Da der Radumfang mit einer gewissen, nicht genau bekannten Ungenauigkeit behaftet ist, werden die nachfolgenden Berechnungen für den gemessenen Radumfang sowie je einer Variante mit Zu- bzw. Abschlag durchgeführt. Die so berechnete Wegstrecke wird auf den weiteren Routenverlauf abgewickelt (e ; ). Dazu wird kanten- bzw. teilkantenweise geprüft, ob die verbleibende Reststrecke innerhalb der Teilkante liegt. Sofern dies der Fall ist, wird der genaue Endpunkt mittels Interpolation bestimmt, anderenfalls wird die abzuwickelnde Reststrecke um die Teilkantenlänge reduziert und die nächste Kante bzw. Teilkante bestimmt. Der Begriff „Kante“ bezeichnet die Verbindung zwischen zwei Knoten. Um den Wegeverlauf genauer abzubilden, ist der Großteil der Kanten durch so genannte „Stützpunkte“ weiter spezifiziert. Mit „Teilkante“ wird der Abschnitt von Startknoten K_A zum Stützpunkt S_1 , von einem Stützpunkt S_i zum nächsten Stützpunkt S_{i+1} , vom letzten Stützpunkt S_s zum Zielknoten K_Z oder vom Startknoten K_A zum Zielknoten K_Z (bei Kanten ohne Stützpunkt) bezeichnet (vgl. Abbildung 6-2). Durch den Einbezug von Stützpunkten bzw. Teilkanten

kann die zurückgelegte Wegstrecke präziser abgewickelt und der prognostizierte Standort genauer bestimmt werden.

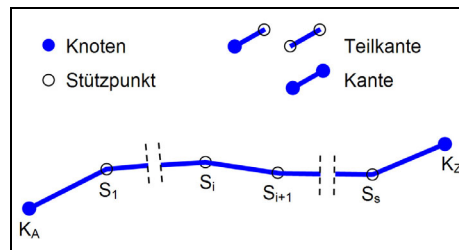








Abbildung 6-2: Unterteilung einer Kante in Knoten und Stützpunkte

Der tatsächliche (mit der Ungenauigkeit des GPS-Signals behaftete) Fehler ergibt sich aus der Abstandberechnung zwischen dem so ermittelten, wahrscheinlichen Standort (○) und dem aus den GPS-Aufzeichnungen für den Zeitpunkt „GPS-Ausfall + Ausfalldauer“ ermittelten tatsächlichen Standpunkt (f; □). Da die Höhenkoordinaten sowohl des Radwegemodellnetzes als auch der GPS-Messung mit größeren Ungenauigkeiten behaftet sind, erfolgt die Differenzbildung über die Abweichungen in der x-/y-Ebene. Dagegen wird bei der Abwicklung der zurückgelegten Wegstrecke auf die Route die z-Koordinate mitberücksichtigt. Dazu werden die Höhenkoordinaten der durchfahrenen Knotenpunkte und Stützpunkte aus dem Modell mit ausgelesen und so die Wegstrecken im dreidimensionalen Raum ermittelt. Dies ist möglich, weil hierbei der Start- und der Zielpunkt sowie die durchfahrenen Punkte das gleiche Bezugssystem (nur Radwegemodellnetz) aufweisen und zudem ein Höhenfehler im Modell unbedeutend gegenüber der in der x-/y-Koordinate liegenden Länge ist. Bei der Ermittlung der Abweichung des prognostizierten Standorts vom tatsächlichen Standort ist dagegen die Berücksichtigung der z-Koordinate nicht sinnvoll, weil einerseits zwei unterschiedliche Bezugssysteme (Radwegemodellnetz und GPS-Messung) verwendet werden, und andererseits Fehler in der Höhe ein

recht großes Gewicht gegenüber den recht kurzen Distanzen in der x-/y-Ebene aufweisen.

Bei kurzen Ausfallzeiten und entsprechend kurzen Fahrzeiten ist zu erwarten, dass ein in den GPS-Daten enthaltener Fehler in Richtung und Betrag nur geringfügig variiert, weil sich die Satellitenkonstellation oder die Umgebungsbedingungen nicht oder nur marginal verändern. Diesem Umstand wird Rechnung getragen, indem der in (e; ) ermittelte Standort um den in (d) ermittelten Verschiebungsvektor korrigiert wird (g; ). Wiederum wird die Differenz aus dem neuen Standort () und dem bekannten, tatsächlichen Standort ermittelt (h; ). In einem letzten Schritt wird die zurückgelegte Wegstrecke in der Weise variiert, dass verschiedene Radumfänge angesetzt werden (i; ). Ein verkürzter Radumfang gleicht eine überhöhte Wegstrecke aus, die durch Pendeln um die geplante Route entsteht. Ein verlängerter Radumfang gleicht Fehler aus, die durch Schlupf oder einen verringerten Radumfang entstehen. Auch hierbei wird der Fehler als Differenz zwischen tatsächlichem Standort und prognostiziertem Standort ermittelt.

Die vorgenommene Methodik zur Ermittlung der Fehlergröße zwischen (tatsächlichem) Standort und korrigiertem Standort lässt Unschärfen bestehen, zumal eine offizielle Festlegung der Fehlergröße nicht existiert. Eine alternative Bestimmung der Fehlergröße könnte darin bestehen, den aus der GPS-Messung bekannten Punkt ebenfalls auf die Solltour zu projizieren und den Fehler als Differenz zwischen diesem projizierten Punkt und dem sich aus der Abwicklung der zurückgelegten Wegstrecke auf die Solltour ergebenden Punkt () zu ermitteln. Die so bestimmte Fehlergröße erscheint aber zu günstig; eine Ungenauigkeit des GPS-Signals in der Weise, dass der wahre Standort¹⁴⁵ jeweils exakt auf den Teilkanten der Solltour liegt, ist auszuschließen.

¹⁴⁵ Die mit einem Fehler behaftete „vermeintlich wahre“ Position muss in Ermangelung einer präzisen Standortbestimmung als „wahre Position“ angenommen werden. Eine

Simulationsablauf

Um den Algorithmus zu testen sind die Implementierung in ein Navigationssystem und der Einsatz unter Praxisbedingungen am sinnvollsten. Da dies einerseits aus technischen Gründen nicht möglich war, andererseits ein solcher Test auch nicht zuverlässig zu analysieren ist, weil weder der GPS-Ausfall einwandfrei detektiert noch eine hinreichend große Zahl von Befahrungen vorgenommen werden kann, wird das Verfahren der Simulation für die Erprobung gewählt. Dazu werden für reelle Fahrtverläufe, für die die tatsächlichen Standorte im Sekundentakt vorliegen, Ausfälle während der Fahrten von Radfahrern simuliert. Um die Ergebnisse auch für die seltener auftretenden größeren Ausfallzeitlücken (größer 30 sek.) zu erhalten, treten die Ausfalldauern nicht stochastisch zu zufälligen Zeitpunkten mit zufälliger Länge auf, sondern es wird innerhalb der Tour ein (jeweils zufälliger) Startpunkt gewählt, an dem das GPS ausfällt. Diese Ausfalldauer ist für jede Simulation im Bereich zwischen 3 und 600 Sekunden vorab festgelegt. Es sollen dazu zu jeder Ausfalldauer 100 gültige Simulationsläufe durchgeführt werden, um eine hinreichend große Zahl von Ergebnissen zu erhalten. Durch die beschriebene Methode können die Simulationsläufe sehr rationell abgewickelt werden, weil nur die Zeitbereiche mit GPS-Ausfall und nicht der gesamte Fahrtverlauf nachgebildet werden müssen.

Durch Anwendung des Algorithmus nach Ablauf der Ausfalldauer des GPS wird überprüft, wie groß die Abweichung zwischen dem aus der Aufzeichnung bekannten Standort und dem mittels Algorithmus ermittelten Standort ist.

6.2 Einschränkungen des Verfahrens

Das eingesetzte Verfahren vermag eine Optimierung nur insoweit sicherzustellen, wie die technischen Randbedingungen dies zulassen. Es ist potenziell mit

exakte Positionsbestimmung ist nur bei lokaler GPS-Messung z. B. mit Hilfe einer geodätischen Einmessung möglich.

bestimmten Fehlergrößen behaftet, die sich im Wesentlichen aus den folgenden Komponenten zusammensetzen:

- Ungenauigkeit der GPS-Ortung,
- Ungenauigkeit der Odometermessung,
- Ungenauigkeit im Netzmodell.

Neben diesen technischen Ursachen kommen die Fehler hinzu, die durch den Einfluss der Nutzers selbst entstehen. Dazu zählen u. a. Abweichungen des Nutzers von der geplanten Route, wie beispielsweise durch Verlassen der Route („Abstecher“, Fehlentscheidung) oder (mehrmaliges) Wenden auf der Route („Warten“ auf Mitfahrer, Unsicherheit über korrekte Route).

Dem Nutzer sollte deshalb dementsprechend signalisiert werden,

- dass das Ortungssignal ausgefallen ist,
- dass die ermittelte und angezeigte Position mit Hilfe eines Ersatzverfahrens berechnet wurde,
- in welchem Rahmen die signalisierte Position brauchbar ist, wie groß also die statistische Zuverlässigkeit ist und
- was der Nutzer selbst zu einer optimierten, korrigierten Standortbestimmung beitragen kann.

6.3 Simulationsergebnisse

Ein Bestandteil der Optimierung ist die Projektion des letzten bekannten Standortes auf die geplante Tour. In bestimmten Fällen kann der dermaßen bestimmte Projektionsvektor aber fehlerhaft sein, z. B. falls die Strecke in der Karte nicht präzise dargestellt oder die Solltour ungenau digitalisiert wurde. In diesem Fall wäre nach der Abwicklung der zurückgelegten Wegstrecke auf die Solltour eine Verschiebung des so bestimmten negativen Vektors sinnvoll, um den vermeintlich korrekten Standort zu ermitteln. Dazu wurden die Ergebnisse der Simulati-

onen zunächst ohne (Abschnitt 6.3.1) und anschließend mit Berücksichtigung des Verschiebungsvektors ausgewertet (Abschnitt 6.3.2).

6.3.1 Ergebnisse ohne Einbezug des Verschiebungsvektors

Es wurde angestrebt, für verschieden lange Ausfalldauern 100 gültige Simulationsläufe zu erhalten, um eine statistisch belastbare Menge N von Simulationsläufen zu erhalten. Da ein Teil der Durchläufe zu unplausiblen Ergebnissen führt, wurden jeweils 120 Simulationsläufe pro Ausfalldauer durchgeführt. Zu den ungültigen Simulationen zählen diejenigen, die außerhalb der vorgesehenen Route enden. Die tatsächliche Anzahl der gültigen Simulationsläufe liegt pro Simulationsdauer zwischen 90 und 108. Die Ausfalldauern wurden nicht zufällig erzeugt, sondern für jede Reihe von Simulationsläufen vorab einheitlich festgelegt (siehe Anhang A-7). Die simulierten Ausfalldauern der Simulationsreihen wurden an die im Betrieb beobachteten Ausfalldauern angelehnt (vgl. Abbildung 3-11).

Für die Simulationsläufe jeder Ausfalldauer sind jeweils gesondert der Mittelwert und die Standardabweichung des Projektionsvektors bzw. Verschiebungsfehlers berechnet worden. Mit Verschiebungsfehler wird der Vektor bezeichnet, der den kleinsten Abstand zwischen dem Standort zur Zeit des (simulierten) GPS-Ausfalls und seiner Projektion auf die Route darstellt. Da die Größe des Verschiebungsvektors von

- der Ungenauigkeit der GPS-Messung,
- der Ungenauigkeit des Radwegenetzes,
- der Wegebreite in der Realität und
- Abweichungen des Radfahrers senkrecht zur Route

abhängt, ist diese Größe zufällig und korreliert nicht mit der Ausfalldauer: Die Mittelwerte des Verschiebungsfehlers über die verschiedenen Ausfalldauern bewegen sich unabhängig von der Ausfalldauer zwischen 6,20 m und 10,25 m, der Korrelationskoeffizient r beträgt -0,336.

Für die Simulation mit dem Radumfang, der bei dem bei den Messungen eingesetzten Fahrrad in der Größenordnung von 212 cm gemessen wurde, sind für jede Ausfalldauer-Gruppe die Mittelwerte und die Standardabweichungen der einzelnen Simulationsergebnisse bestimmt worden. Um diese Ergebnisse in Relation zur Länge der während der simulierten GPS-Ausfalldauer zurückgelegten Wegstrecke zu bringen, wurde die Auswertung ergänzt: Für jede Gruppe wurde die relative Abweichung zwischen dem mittleren Fehler (zwischen errechnetem Standort und tatsächlichem Standort) und der mittleren, simulierten Weglänge bestimmt. Zudem wurde die Häufigkeit innerhalb jeder Gruppe bestimmt, in der die relative Abweichung ein Maß von 10 % nicht überschreitet. Eine relative Abweichung von 10 % bedeutet für eine simulierte Fahrstrecke von 48 sek. (entspricht etwa 240 m) eine mittlere Abweichung der Position in einem Radius von etwa 24 m.

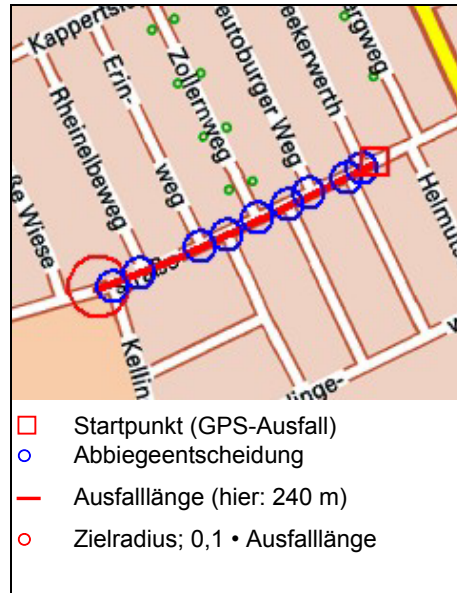


Abbildung 6-3: Mögliche Entscheidungspunkte bei 48-sekündigem Fahrtverlauf in städtischem Umfeld¹⁴⁶

Die zwei nachfolgenden Beispiele sollen für die gewählte 10 %-Relation zwischen Wegstrecke und Abweichungsfehler die Größenordnung der Abbiegehäufigkeiten und die damit verbundene Wahrscheinlichkeit einer korrekten Standortbestimmung eines Nutzers an praktischen Fällen exemplarisch darstellen:

Das erste Beispiel (siehe Abbildung 6-3) zeigt eine entsprechend abgewinkelte Strecke der Länge 240 m projiziert auf eine Topografische Karte 1:10.000 am Beispiel eines städtischen Bereichs in der Stadt Essen. Ausgehend vom Startpunkt (Ausfall des GPS-Signals) sind nach 240 m Fahrt neun Abbiegeentscheidungen zu treffen. Bei einer zufälligen Entscheidung für einen n-armigen Knoten, auf den der Nutzer trifft, beträgt die Wahrscheinlichkeit für die korrekte

¹⁴⁶ Hintergrundkarte: Landesvermessungsamt NRW: CD-ROM TOP 10 NRW.

Wahl n^{-1} . Folgen m Knoten aufeinander, beträgt die Wahrscheinlichkeit, bei einem GPS-Ausfall an jedem Knoten die richtige Entscheidung zu treffen und damit der geplanten Route zu folgen,

$$p^{\text{kor.}} = \prod_{i=1}^m n_i^{-1} \quad \text{Formel 6-1}$$

mit m : Anzahl der Knoten
 n : Armigkeit des Knotens i

Die Wahrscheinlichkeit für den Nutzer, bei an jedem Knoten zufälliger Entscheidung die richtige Route zu wählen, beträgt im vorliegenden Beispiel demzufolge 2^{-9} (jeweils einfache, also zweiarmige Routenwahl), also weniger als 0,2 %. In der Realität ist die Wahrscheinlichkeit, die richtige Route zu wählen, durchaus größer, weil sich der Nutzer auf einer Karte orientieren kann. Die Wahrscheinlichkeit einer korrekten Einzelentscheidung kann dann mit $p > n^{-1}$ angesetzt werden.

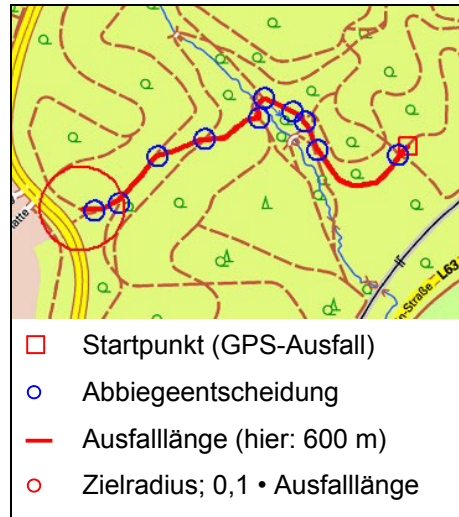


Abbildung 6-4: Mögliche Entscheidungspunkte bei 120-sekündigem Fahrtverlauf in ländlichem Umfeld¹⁴⁷

In einem zweiten Beispiel (siehe Abbildung 6-4) mit einer Abwicklungslänge von 600 m (entspricht einem GPS-Ausfall von 120 sek.) in einer topografisch bewegten Umgebung ergeben sich zehn Abbiegeentscheidungen während der GPS-Ausfalldauer. Infolge der komplexeren Knoten mit teils mehrarmiger Routenwahl ergibt sich in diesem Beispiel eine Wahrscheinlichkeit für eine komplett korrekte Routenwahl von $2^{-6} \cdot 3^{-3} \cdot 4^{-1} \approx 0,014 \%$.

Aus praktischer Erfahrung kann unterstellt werden, dass insbesondere in Bereichen wie dem hier gewählten Waldstück eine eindeutige Zuordnung des erreichten Knotenpunktes zu dem in den Karten dargestellten Knoten selbst durch einen einigermaßen erfahrenen Nutzer nicht eindeutig bewerkstelligt werden kann. Wird dem Nutzer dagegen der vermeintliche Knotenpunkt, an dem er sich befindet, auf der Karte angezeigt, kann er durchaus die in der Karte dargestellte

¹⁴⁷ Hintergrundkarte: Landesvermessungsamt NRW: CD-ROM TOP 10 NRW.

Geometrie auf die Wirklichkeit übertragen und so zu einer korrekten Abbiegeentscheidung gelangen.

Vor der Auswertung selbst steht zunächst einmal die Frage nach einem geeigneten Indikator für die Qualität der Ergebnisse.

Für den Nutzer ist von Bedeutung, ein bestimmtes Maß an Ungenauigkeit nicht zu überschreiten. Ein geeignetes Maß wäre dementsprechend ein festgelegtes Perzentil der Abweichungen zwischen Prognose- und Ist-Standort.

Für die Bewertung der Simulationen erscheint dagegen der Rückgriff auf die Mittelwerte der Abweichungen sinnvoller. Der Abweichungsfehler ergibt sich als räumliche Differenz zwischen Modellrechnung und vom GPS ermittelten Standort. Der mittlere Fehler wird anschließend als Mittelwert der Abweichungsfehler aller Simulationsläufe derselben GPS-Ausfalldauer bestimmt.

Da die Abweichungen bei längeren Simulationsstrecken im Vergleich zu den kürzeren anwachsen, werden zusätzlich die Abweichungen im Verhältnis zu den Simulationslängen betrachtet:

$$\text{rel. Abweichung} = \frac{\text{mittl. Fehler}}{\text{mittl. Wegstrecke}}$$

Formel 6-2

Die Simulationen mit verändertem Radumfang dienen der Kontrolle, ob der am Rad gemessene Radumfang von 212 cm dem während der Fahrt abgewickelten Umfang entspricht. Dadurch ist es möglich, Ungenauigkeiten des Parameters „Radumfang“ zu erkennen. Es wurden dazu vereinfacht zwei vom gemessenen Radumfang abweichende Umfänge angenommen, und zwar ein um 4 cm erhöhter und ein um 4 cm verminderter Umfang.

Als Ergebnis des vorliegenden Vergleichs lässt sich festhalten, dass die Variation des Radumfangs auf 208 cm bzw. auf 216 cm zu tendenziell schlechteren Ergebnissen als bei Simulationen mit dem korrekten Radumfang von 212 cm führt (siehe Abbildung 6-5). Der angesetzte Umfang von 212 cm kann damit als

in gewissen Grenzen korrekt eingestuft werden. Auf eine weitere Eingrenzung des exakten Umfangs über Abrollmaße von z. B. 210 und 214 cm wurde verzichtet, da die Abweichungskurven für den reduzierten und den verringerten Umfang nahezu gleich sind (siehe Abbildung 6-5) und somit die Korrektheit des dazwischenliegenden Umfangs von 212 cm stützen.

Mit zunehmender Ausfalldauer bildet sich für den mittleren simulierten Radumfang die beste Fehlerkurve (blaue Kurve) heraus. Im Folgenden werden daher ausschließlich die zugehörigen Ergebnisse für einen simulierten Radumfang von 212 cm untersucht.

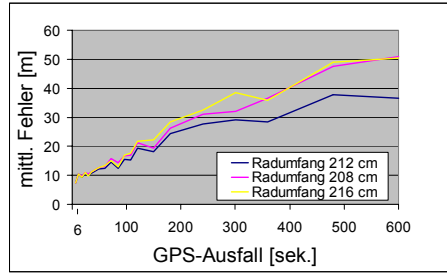


Abbildung 6-5: Mittlere Fehler in Abhängigkeit von zurückgelegter Wegstrecke für verschiedene Radumfänge

Die Auswertung der Simulationsergebnisse ergibt, dass der Fehler der Standortbestimmung mit zunehmender GPS-Ausfalldauer degressiv zunimmt. Wie die obige Abbildung zeigt, steigt der mittlere Fehler von etwa 7,5 m bei 6 simulierten Fahrtsekunden bis auf 36,5 m bei 600 simulierten Fahrtsekunden an. Die dabei zurückgelegte mittlere Wegstrecke steigt von 19,7 m auf 1.812 m an. Ursächlich für den im Abschluss fallenden Verlauf im Graphen (fallende blaue Linie von $x = 480$ [sek.] auf 600 [sek.]) sind vermutlich Ausreißer nach oben an der Stelle $x = 480$, die bei dem effektiven Simulationsumfang von $N = 96$ zu einem erhöhten Mittelwert von $y = 37,92$ m für $x = 480$ m und auch zu einer er-

höhten Standardabweichung von $s = 51,41$ m führen. Diese Ausreißer sind einerseits vermutlich auf die ungenaue Abbildung der Tour bzw. mangelnde Einhaltung der Fahrlinie, andererseits auf Fehler im GPS-Signal zurückzuführen.

Die mittleren durchschnittlichen Geschwindigkeiten, die aus den aufgezeichneten GPS-Signalen ermittelt wurden, bewegen sich zwischen 10,6 und 12,2 km/h. Die gegenüber der angenommenen Fahrtgeschwindigkeit von 18 km/h deutlich niedrigere Fahrgeschwindigkeit während der Messfahrt resultiert aus den Zwischenstopps, in denen der korrekte Messablauf überprüft wurde. Die Abweichung der Fahrgeschwindigkeit ist ohne Einfluss auf die Testergebnisse.

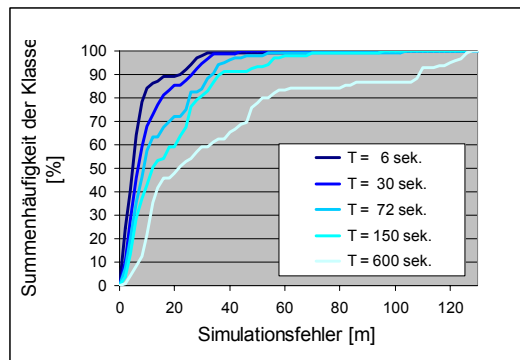


Abbildung 6-6: Häufigkeitsverteilung des Positionsfehlers für ausgewählte Ausfalldauern

Die Häufigkeitsverteilung der Abweichungsfehler der einzelnen Simulationsläufe im Vergleich fünf ausgewählter Gruppen (vgl. Abbildung 6-6 wobei die Gruppen für die simulierten Ausfalldauern stehen zeigt einerseits die exponentielle Verteilung der Fehler (Verlauf der einzelnen Kurven, hier als Summenlinien dargestellt) und andererseits die Verschiebung hin zu größeren Fehlerraten mit zu-

nehmender Ausfalldauer (Verlauf von den dunkel- hin zu den hellblauen Graphen).

Die relativen Abweichungen sinken mit zunehmender GPS-Ausfalldauer von 38 % (t = 6 sek.) bis auf fast 2 % (t = 600 sek.), wie aus Abbildung 6-7 erkennbar wird. Der Grund dafür ist, dass die mit in den Fehler eingehenden Ungenauigkeiten aus der GPS-Messung weitgehend unabhängig von der Simulationsdauer sind und ihr Anteil an der zurückgelegten Wegstrecke folglich mit zunehmender Fahrtstrecke sinkt. Die Kurve weist einen negativ degressiven Verlauf auf.

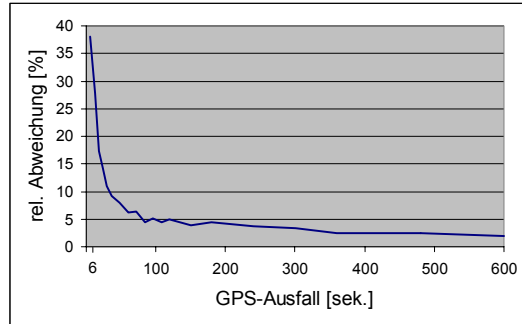


Abbildung 6-7: Relative Abweichung (des Positionsfehlers von der Abwicklungslänge) bei verschiedenen GPS-Ausfalldauern

Um die Extrema unter den Ausreißern identifizieren zu können, wurde der Anteil der relativen Abweichungen $\leq 10\%$ für die unterschiedlichen Simulationsdauern festgestellt. Der 10 %-Wert leitet sich aus der Ungenauigkeit von ca. 2 % bei einer Simulationsdauer von 120 Sekunden bei einer theoretischen Fahrtgeschwindigkeit von 18 km/h ab. Die daraus berechneten Ungenauigkeitsradien in Höhe von 60 Metern ($18 \text{ km/h} \times 120 \text{ sek.} \times 10\% = 60 \text{ m}$) stellen, wie in Abbildung 4-27 gezeigt wurde, eine noch vertretbare Größenordnung im Hinblick auf die mögliche Mehrdeutigkeit des Standortes dar. Mit weiter abnehmender Radiengröße sinkt die Zahl möglicher Alternativstandorte.

Diese Grenze wurde basierend auf den folgenden Auswertungen als sinnvolle Obergrenze für die Ungenauigkeit der Positionsbestimmung festgelegt:

- Auswertung zur Ermittlung der GPS-Ausfallhäufigkeiten und -dauern (siehe Abschnitt 3.4: „Ausfallhäufigkeiten und -wahrscheinlichkeiten“) und
- Auswertung der Untersuchungen von Standortarealen mit variierenden Radien entlang einer Musterroute in einem realen, modellmäßig abgebildeten Radwegenetz auf die Mehrdeutigkeit der Standortzuordnung (siehe Abschnitt 4.5: „Auswirkungen einer fehlerhaften Ortung auf die Interpretation des aktuellen Standortes (Kantenfehlinterpretation)“).

Die durchschnittliche Grenze von 10 % relativer Abweichung wird nach 36 Simulationssekunden erreicht (vgl.

Abbildung 6-7), nach der maximalen Simulationsdauer von 600 sek. erreicht sie den Wert von 2 %. Bei einer Simulationsdauer von 600 sek. beträgt die erwartete Fahrtstrecke bei $v = 18 \text{ km/h}$ genau 3.000 m (die tatsächliche mittlere Fahrtstrecke beträgt 1.812 m). Der sich aus der Simulation ergebende Fehler bei einer Fahrt ohne GPS von 600 sek. beträgt 36,57 m und liegt damit unter der angestrebten Ungenauigkeit von 60 m.

Der Anteil der relativen Abweichungen $\leq 10 \%$ steigt entsprechend des in Abbildung 6-8 dargestellten Verlaufs von knapp 20 % der Simulationen (bei einer Simulationsdauer von 6 Sekunden) auf 100 % (bei einer Simulationsdauer von 600 Sekunden) an.

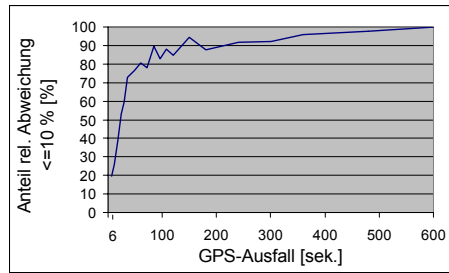


Abbildung 6-8: Anteil der relativen Abweichungen (des Positionsfehlers von der Abwicklungslänge) $\leq 10\%$ bei verschiedenen GPS-Ausfalldauern

Das bedeutet, dass bei der maximal durchgeführten Simulationsdauer sämtliche Messfehler aller gültigen Einzelsimulationen maximal 10 % der jeweils simulierten Messstrecke betragen. Der Mittelwert der relativen Abweichungen der Einzelmessungen liegt bei der maximalen Simulationsdauer bei 2,02 %.

6.3.2 Ergebnisse unter Einbezug des Verschiebungsvektors

Der Verschiebungsvektor ergibt sich als Abweichung zwischen realem (durch das GPS ermittelten) Standort bei (simuliertem) Ausfall des GPS-Signals und auf die Route projizierter, als korrekt vermuteter Position. Er wird durch die horizontale und die vertikale Abweichung (bezogen auf das Grid) in der x -/ y -Ebene dargestellt. Da die Projektion ein notwendiges Mittel darstellt, um sinnvoll eine Abwicklung der tatsächlich gefahrenen Wegstrecke vornehmen zu können, der wahre Standortfehler zum Zeitpunkt des GPS-Ausfalls t_1 aber nicht bekannt ist, kann es durchaus vorkommen, dass die ermittelte GPS-Position zum Zeitpunkt t_1 korrekt ist.

Wird diesem Ansatz gefolgt, wäre die daraus ableitbare Hypothese, dass auch der Standort bei Wiedereinsetzen des GPS-Signals zum Zeitpunkt t_2 korrekt ist. Die Hypothese erscheint insbesondere für kurze zeitliche Ausfälle des Signals

$\Delta t = t_2 - t_1$ plausibel, weil Fehler des GPS-Signals – wie beschrieben – unter anderem einem zeitlichen Verlauf folgen, bzw. weil die topografischen Einflüsse i. d. R. nicht sprunghaft wechseln. Damit würde durch die Projektion erst ein Fehler entstehen, der anschließend – nach Abwicklung auf das Netz – wieder eliminiert werden müsste. Ein Beispiel für die Verteilung der GPS-Fehler zur rechten und linken Seite der geplanten Tour ist in der Abbildung 6-9 dargestellt.

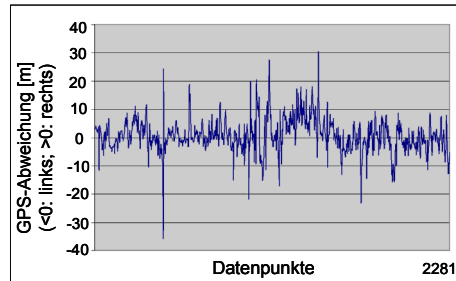


Abbildung 6-9: Exemplarische Verteilung der Abweichungen des GPS-Fehlers rechts und links der Tour

Eine mögliche Ursache für ein Abweichen von der (vorgegebenen) Route durch den Nutzer könnte beispielsweise darin begründet liegen, dass

- das Netz ungenau modelliert ist,
- er auf einem Straßenbegleitenden Radweg – also versetzt zur Netzkante – fährt,
- die Wegoberfläche z. B. aufgrund von Nässe schlecht befahrbar ist o. Ä.

Um den Einfluss der Verschiebung des vom GPS ermittelten Standortes auf die Route hinsichtlich der Genauigkeitsaussage zu überprüfen, wurde der Verschiebungsvektor für jede Einzelsimulation gespeichert und nach Standortberechnung der Standort wieder um den negativen Vektor verschoben (siehe Abbildung 6-1). Der so ermittelte Standort wurde mit der (bekannten) GPS-Position des Nutzers verglichen und somit eine korrigierte Abweichung ermittelt.

Diese korrigierten Abweichungen wurden für den Radumfang von 212 cm mit dem unkorrigierten Fehler verglichen.

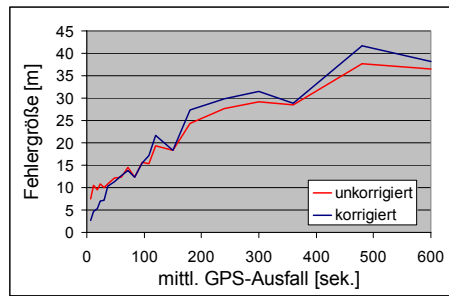


Abbildung 6-10: Auswirkungen der Routenprojektion auf die Genauigkeit der Standortprognose

Als Ergebnis der Untersuchung zeigt sich (siehe Abbildung 6-10), dass der Einfluss des Verschiebungsvektors bis zu einer GPS-Ausfalldauer von etwa 100 Sekunden das Ergebnis verbessert (blaue Linie). Bei sehr kurzen GPS-Ausfällen ($\Delta t = 6$ sek.) ist eine Verbesserung der Positionsbestimmung von 10 m auf 4 m Genauigkeit durch Rückverschiebung des Standortes zu verzeichnen. Steigt die simulierte Zeitdauer des GPS-Ausfalls weiter (über 100 Sekunden) an, tritt eine Verschlechterung durch die Rückverschiebung ein. Diese liegt in einer Größenordnung bis zu 4 m, was einem Fehleranteil von etwa 10 % entspricht.

Nach den vorliegenden Untersuchungen kann unterstellt werden, dass der Einbezug eines entsprechenden Korrekturvektors bis zu einer Fahrtstrecke von etwa 500 m geeignet ist, die Standortprognose bei einem GPS-Ausfall zu verbessern. Bei darüber hinaus gehenden Strecken sollte eine Standortbestimmung bei GPS-Ausfall durchgeführt werden, ohne auf den oben beschriebenen Ansatz zurückzugreifen. Um die Übertragbarkeit der vorgestellten Ergebnisse auf Strecken mit verschiedenen Einflüssen zu gewährleisten, ist eine fundierte Un-

tersuchung sinnvoll, die auch eine Variation verschiedener Einflussparameter, wie beispielsweise der Umgebungen, der Satellitenkonstellation, des Netzes oder des Fahrprofils des Nutzers mit einbezieht.

6.4 Verbesserungspotenzial der Standortbestimmung

6.4.1 Verbesserungspotenzial bei GPS-Ungenauigkeit

Die Simulationen des Nutzers im Netz – sei es im virtuellen oder im reellen Netz – haben gezeigt, dass bei Vorliegen von Unsicherheit und gleichzeitigem GPS-Ausfall die Wahrscheinlichkeit für eine fehlerhafte Routenwahl mit zunehmender GPS-Ausfalldauer steigt.

Um die Unsicherheit des Nutzers abzubilden, wurde die Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F eingeführt (vgl. Abschnitt 4.3.1). Ein Wert $p_F = 1$ repräsentiert einen Nutzer unter vollständiger Unsicherheit, der seine Entscheidungen ausschließlich zufällig trifft. Der Wert $p_F = 0$ stellt einen Radfahrer dar, der vollständige Kenntnis des Netzes hat und der, unabhängig von der GPS-Verfügbarkeit, an jedem Entscheidungspunkt die korrekte Wahl trifft. Ein Nutzer in der Realität wird jeweils individuell einen Wert $0 < p_F < 1$ annehmen; „den“ idealtypischen Nutzer gibt es nicht.

Die Simulationen zeigen, dass eine positive Korrelation zwischen p_F und der Zielerreichung nicht zwingend vorliegt: Tatsächlich hat das Modell das Wegehahlverhalten nur unzureichend abgebildet. Ein Großteil der Simulationsläufe, die das Ziel nicht erreicht haben, konnten in die Auswertungen (z. B. der zurückgelegten Wegstrecke oder der überwundenen Höhenmeter) nur durch Annahme eines Mehrweganteils einbezogen werden. Eine positive Korrelation zwischen der Umwegigkeit und der Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit ist danach sowohl bei Rundtouren als auch bei Etappen zu beobachten. Eine un-

terschiedliche Ausprägung der Zunahme an zurückgelegter Wegstrecke mit steigendem p_F zwischen Rundtour und Etappe ist nicht feststellbar.

Der Zielerreichungsanteil im Modell ist prinzipiell mit zunehmender Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F abnehmend. Damit weicht das Modell deutlich von der Realität ab, in dem ein Zielerreichungsanteil von annähernd 100 % unterstellt werden kann, denn tatsächlich nutzen Radfahrer in der Realität das Kartenwissen ergänzende Methoden, um ihr Ziel zu erreichen, so z. B.

- das Fragen nach dem Weg,
- die Orientierung anhand von Wegweisern und Beschilderungen,
- die Orientierung anhand von topografischen Merkmalen (Fluss, Berg),
- die Orientierung anhand von (klassifizierten oder beschilderten) Straßen,
- die Orientierung anhand von Wegpunkten (POIs),
- die Himmelsrichtung.

Ein stark abnehmender Zielerreichungsanteil in den Simulationen ergibt sich bei der Verwendung von Navigationssystemen mit zunehmender GPS-Ausfallrate.

Auch wenn der hohe Anteil an Ziel-Nichterreichern in dieser Form nicht auf die Realität übertragbar ist, zeigt die hohe Zahl dieser Gruppe, dass das Vorliegen eines fehlerhaften GPS-Signals bei gleichzeitiger Unsicherheit zu einem stark ausgedehnten Mehraufwand hinsichtlich der zurückzulegenden Wegstrecke führt. Dies lässt sich aus der Tatsache ableiten, dass diese Nutzergruppe im Modell nicht auf die vorgesehene Route zurückgefunden und auch das Ziel nicht erreicht hat. Der Kantenbefahrungsanteil nimmt mit zunehmender Unsicherheit in Abhängigkeit von der GPS-Ausfallrate unterschiedlich stark, aber in allen untersuchten Fällen mehr oder weniger ausgeprägt ab.

In dem gewählten, relativ ebenen Netz führte die Zunahme an Mehr-Weg in etwa proportional zu einer Erhöhung der Steigungsmeter. Ziel einer Standortoptimierung ist es insbesondere, dem Radfahrer nicht nur Umwege, sondern

vor allem zusätzliche Steigungen zu ersparen, für die er besonders sensibel ist. In Regionen mit ausgeprägteren Höhendifferenzen als im Modellnetz wird die Umwegstrecke überproportional die Steigungsmeter erhöhen. Ursächlich dafür ist, dass die für Radtouren vorgeschlagenen bzw. genutzten Wegstrecken in der Regel bevorzugt steigungsarme Streckenelemente beinhalten.

Mit den entwickelten Optimierungsalgorithmen können sowohl GPS-Ungenauigkeiten als auch GPS-Ausfälle wirkungsvoll kompensiert werden. Die Analyse der Modellstrecke hinsichtlich fünf verschieden großer Ausfallradien zwischen 20 und 100 Metern hat gezeigt, dass bereits Ungenauigkeiten in der Größenordnung von 20 m potenziell in bis zu einem Viertel der Fälle vom Nutzer missinterpretiert werden können (vgl. Abschnitt 4.5). Eine solche Möglichkeit der Missinterpretation wurde in den Fällen unterstellt, in denen sich bei Erreichen eines Knotens ein oder mehrere weitere Knoten im Fehlerradius befinden. Mit Hilfe mathematischer Korrekturverfahren kann eine ungenaue Standortbestimmung deutlich verbessert werden. Voraussetzung ist, dass im System ein Netz hinterlegt ist, das vollständig ist. Die Analysen der Netzdichten haben gezeigt, dass z. Zt. jedoch keine annähernd vollständigen Netze existieren.

6.4.2 Verbesserungspotenzial bei GPS-Ausfall

Wesentlich schwerer als die Ungenauigkeit des GPS-Signals wiegt ein Ausfall des Signals. Bei Ausfall ist der Nutzer mit zunehmender zurückgelegter Wegstrecke orientierungslos. Die Orientierung auf der Karte ist üblicherweise nur möglich,

- falls der Nutzer sich gut anhand von Karten orientieren kann,
- bei entsprechendem Kartenmaterial (Rasterkarte),
- bei korrekter Weiterfahrt und
- während der unmittelbaren Zeitspanne nach GPS-Ausfall.

Mit zunehmender Weiterfahrt unter Unsicherheit wächst die Gefahr von Fehlentscheidungen. Diese werden oft begünstigt durch einen attraktiv erscheinenden Verlauf der Fehlrouten (z. B. Gefällestrecken), die im weiteren Verlauf zu Umwegen, zusätzlichen zu überwindenden Höhenmetern und infolgedessen zu Zeitverlust und Verdruss führen.

Mit den vorgestellten Ersatzverfahren der Positionsbestimmung kann ein GPS-Ausfall auch über eine längere Strecke zuverlässig überbrückt werden. Die beiden simulierten Verfahren sind nur mittels technischer Hilfsmittel – Odometer einerseits, Altimeter andererseits – umsetzbar. Zudem ist das Vorliegen einer Tour oder sogar des Netzes in digitaler Form erforderlich.

6.5 Optimierungsggrad der Standortbestimmung

Abschließend soll eine Einschätzung abgegeben werden, inwieweit die Implementierung eines Optimierungsalgorithmus in ein mobiles Radfahrernavigationssystem die Ortung verbessert bzw. dafür sorgen kann, dass der Nutzer sein Ziel auf dem geplanten bzw. vom System vorgegebenen Weg erreicht.

Dazu ist von drei Situationen auszugehen (siehe nachfolgende Tabelle):

- Die klassische Radtour erfolgt ohne GPS-Unterstützung, bzw. ein Radfahrer bewegt sich mit GPS-Empfänger, aber ohne Satellitenempfang (Zelle a).
- Ist das GPS empfangbar, ist dieses zunächst einmal als fehler- bzw. ausfallbehaftet anzusehen (b).
- Durch den Einsatz geeigneter Verfahren (siehe Kapitel 4) kann der korrigierte Standort ermittelt und dargestellt werden (c).

		Signal	
		unkorrigiert	korrigiert
GPS	nein	(a)	
	ja	(b)	(c)

Tabelle 6-1: Untersuchte Kombinationen von GPS-Verfügbarkeit und Signalkorrektur

Anhand der entwickelten Optimierungsalgorithmen soll der Nutzervorteil herausgearbeitet werden, der sich aus der Korrektur des fehlerbehafteten GPS-Signals ergibt.

Zur Beurteilung des Veränderungspotenzials, das mit einem lückenlos bzw. fehlerfrei empfangenen Signal verbunden ist, werden geeignete Parameter gesucht, mit deren Hilfe eine möglichst quantitative Bewertung der Verbesserungsgrades des Standortes bzw. der Güte des Algorithmus vorgenommen werden kann. Neben den quantitativ bewertbaren Fortschritten ergeben sich infolge der Optimierung zudem auch qualitativ bewertbare Einflüsse (z. B. Erholungswert der Tour), die im Folgenden nicht betrachtet werden.

6.5.1 Indikatoren zur Ermittlung des Verbesserungspotenzials

Nach der Beobachtung und Befragung von Radfahrern haben sich die nachfolgenden quantitativen Kriterien angeboten, als Indikator für das Optimierungspotenzial des Algorithmus herangezogen zu werden und damit die Qualität des Algorithmus zu beschreiben:

- Fehlentscheidungsrate,
- der Anteil von Mehrstreckenlängen,
- Kantenbefahrungsgrad (Anteil ordnungsgemäß befahrener Kanten).

Die Fehlentscheidungsrate gibt – bezogen auf die Anzahl insgesamt zu treffender Entscheidungen des Radfahrers – an, wie oft der Nutzer an Verzweigungspunkten eine fehlerhafte Entscheidung trifft, also nicht der Route folgt. Strittig ist die Zuordnung, sobald der Nutzer die geplante Route verlassen hat, weil zunächst einmal definiert werden muss, welche der möglichen Entscheidungen als korrekt gilt, falls mehrere mögliche Wege zur Sollroute zurückführen oder nicht zurückführen.

Die Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F , die in den Simulationen dazu genutzt wurde, das Verhalten des Nutzers über eine Bandbreite verschiedener Informations- bzw. Verhaltensmuster festzulegen (vgl. Abschnitt 4.3), ist zur Beurteilung der Simulationsergebnisse nicht geeignet, da der Parameter p_F eine Eingangsgröße darstellt.

Der Anteil der Mehrstreckenlängen gibt an, wie groß der zurückgelegte Weg auf nicht geplanten Kanten war. Mit diesem Indikator wird der Umfang der zusätzlichen Wegstrecke beschrieben, die der Radfahrer entgegen der Planung zurücklegen muss. In topografisch bewegten Regionen bietet sich der Einbezug der Höhe in Form des Indikators „Anteil der Mehrhöhenmeter“ an.

Der Kantenbefahrungsgrad stellt den Anteil an Kanten der geplanten Route dar, die vom Nutzer befahren wurde. Je höher der Wert, desto weniger oft wurde die Tour verlassen bzw. im Falle des Verlassens um so schneller wieder erreicht. Ein hoher Grad stellt nicht unbedingt die Präferenzen des Nutzers dar, weil häufig auch Wege abseits der geplanten Route ihren Reiz haben, aber zur Beurteilung der Wirkung des Algorithmus ist der Indikator sehr geeignet. Der Kantenbefahrungsgrad stellt einen sehr einfach handhabbaren, gleichzeitig aber sehr aussagekräftigen Indikator dar, mit dem die Wirkung des Optimierungsalgorithmus bewertet werden kann.

Um den Nutzen eines korrigierten GPS-Signals für die drei in Tabelle 6-1 dargestellten Zustände (kein GPS, fehlerhaftes GPS, korrigiertes GPS) beschrei-

ben zu können, wird daher der Indikator Kantendeckungs- bzw. Kantenbefahrungsgrad gewählt. Nicht berücksichtigt werden können damit der Zielerreichungsgrad, die Anzahl der Fehlentscheidungen oder zusätzliche, außerhalb der Sollstrecke zurückgelegte Knoten, Streckenlängen oder Höhenmeter.

6.5.2 Kantenbefahrungsgrad ohne GPS-Unterstützung

Der Nutzer ohne Navigationsunterstützung (Tabelle 6-1, Fall a) wird durch die Ergebnisse der Beobachtungen verschiedener Nutzer während des Befahrens einer Solltour repräsentiert. Sein beobachteter Kantenbefahrungsgrad beträgt im Durchschnitt 89,1 % (156/175 Kanten; siehe Tabelle 4-1). Die Bandbreite an Kantenbefahrungsgraden liegt zwischen 63 % (111/175 Kanten) und 99 % (174/175 Kanten; Tabelle 4-1).

6.5.3 Kantenbefahrungsgrad mit fehlerhafter GPSUnterstützung

Der Nutzer mit Navigationsgerät, aber fehlerhaftem Signal (Fall b) wird durch die Simulationen von Fahrten im Netz abgebildet. Die Ergebnisse der Simulationen werden im Wesentlichen durch die Genauigkeit des GPS-Signals und durch die Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F des Nutzers bestimmt.

Die Genauigkeit des GPS-Signals wurde für drei verschiedene Qualitäten aus den GPS-Aufzeichnungen ermittelt (siehe Abbildung 4-23).

Der Parameter p_F gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein Nutzer bei Unkenntnis seines Standortes die Wegewahl zufällig vornimmt. p_F variiert zwischen 0 und 1. Der Wert ist abhängig von der Fertigkeit der Nutzers, die Karte zu lesen, von der Qualität (Genauigkeit, Vollständigkeit, Detaillierungsgrad, Ablesbarkeit) der verwendeten Karte und von der Komplexität (Armigkeit der Knotens, Topografie, Orientierungsmerkmale) der Umgebung des Standortes.

Die aus den Simulationen ermittelten Kantenabdeckungsgrade schwanken zwischen 100 % (für $p_F = 0$) und – je nach GPS-Empfänger – 32 bis 94 % (für $p_F = 1$). Es ist davon auszugehen, dass ein Nutzer mit fehlerbehaftetem GPS

beim Zurücklegen einer Tour keinen schlechteren Kantendeckungsgrad erzielt als ein Nutzer ohne GPS. Das sich daraus ergebende Band an Fehlentscheidungswahrscheinlichkeiten ist nachfolgend in der an Tabelle 4-1 angelegten Darstellung eingetragen:

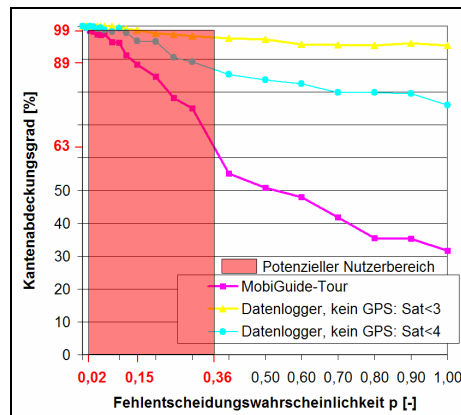


Abbildung 6-11: Bereich möglicher Fehlentscheidungswahrscheinlichkeiten p_F für Nutzer ohne GPS

Für einen mittleren Kantendeckungsgrad von 89,1 % (siehe Abbildung 6-11) ergibt sich bei ungünstigstem GPS-Empfang eine maximale, also ungünstigste Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit von $p_F = 0,15$ (Projektion des Schnittpunkts der rosa Kurve mit $y = 89,1$ % auf die Abszisse). Dies bedeutet, dass die Probanden der durchgeführten Befahrungen im Mittel einen Wert von $p_F < 0,15$ aufweisen. Die Bandbreite der Parameter p_F streut zwischen $p_F < 0,36$ und $p_F < 0,02$ (siehe Abbildung 6-11). Es ist zu erwarten, dass sich bei ungünstigeren Nutzer-/Tourkombinationen schlechtere Kantendeckungsgrade und damit höhere Parameter p_F ergeben.

Unter Einsatz eines leistungsfähigen GPS-Empfängers mit fehlerhaftem GPS-Signal kann also von einem Nutzer mit einer schlechten Orientierungsfähigkeit

ein Kantendeckungsgrad von über 97 % (Schnittpunkt der gelben Kurve mit $p_F = 0,36$ projiziert auf die Ordinate) erreicht werden.

6.5.4 Kantenbefahrungsgrad mit korrigierter GPS-Unterstützung

Für den Nutzer mit Navigationsgerät und korrigiertem Signal, d. h. für diejenigen Fahrer, denen der GPS-Ausfall mitgeteilt wird, denen aber dennoch ihr vermeintlicher, ersatzweise berechneter Standort in der Karte dargestellt wird (Tabelle 6-1, Fall c), sind konkrete Kantenabdeckungsgrade nicht ermittelt worden. Diese werden daher näherungsweise berechnet. Dazu wird für die Anteile der GPS-Ausfalldauern (siehe Abbildung 3-11) die zugehörige Genauigkeit der Standortbestimmung über ein Ersatzverfahren (siehe Abbildung 6-5) bestimmt. Die zu der erzielbaren Genauigkeit gehörige Wahrscheinlichkeit einer möglichen Fehlinterpretation des Standortes wird aus Abbildung 4-27 abgelesen. Sie wird mit der Wahrscheinlichkeit dieser Ausfalldauer multipliziert. Die anschließende Aufsummierung über die verschiedenen Ausfalldauern ergibt die Wahrscheinlichkeit für eine fehlerhafte Entscheidung innerhalb einer Tour.

Um den Kantenabdeckungsgrad für Touren mit korrigierter Positionsbestimmung zu erhalten, werden für die Zeitanteile einer Tour mit unsicherer Standortzuordnung die Kantendeckungsgrade angesetzt, die sich aus den beobachteten fehlerhaft gefahrenen Touren ergeben haben.

Der Ablauf der Ermittlung des Kantendeckungsgrades für Nutzer eines Optimierungsverfahrens bei Ausfall des GPS stellt sich wie folgt dar:

- a) Ermittlung der GPS-Ausfalldauern:
„Wie oft und wie lange fällt das GPS aus?“ (Abbildung 3-11);
- b) Ermittlung des mittleren möglichen Standortfehlers:
„Wie groß ist die mittlere Abweichung zwischen meinem Standort und dem aus dem Optimierungsalgorithmus ermittelten Standort?“ (Abbildung 6-5);
- c) Abschätzung der Häufigkeit einer Fehlinterpretationsmöglichkeit des vom Algorithmus berechneten und angezeigten Standortes in der Karte für den aus b) ermittelten mittleren Fehler:

„In wie vielen Fällen ist ein anderer Standort als der angezeigte innerhalb des Fehlerradius möglich?“;

- d) Verknüpfung der Ergebnisse aus a) und c) zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit einer entsprechenden Situation:

„Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, auf einer Tour in eine Situation zu kommen, in der der eigene Standort falsch interpretiert werden könnte?“;

- e) Übernahme der empirisch ermittelten Kantenabdeckungsgrade für die in d) berechneten Fälle (Tabelle 4-1);¹⁴⁸

- f) Annahme, dass für die restliche Strecke ein fehlerfreies GPS-Signal vorliegt oder der GPS-Ausfall nicht zu einer Fehlentscheidungsmöglichkeit führt; hierfür Ansetzung des Kantenabdeckungsgrads von 100 %;

- g) Zusammenführung der Kantenbefahrungsanteile aus e) und f) unter Berücksichtigung der entsprechenden Zeitanteile aus a):

„Wie groß ist der mittlere Anteil befahrener Kanten der Solltour bei Einsatz eines korrigierten GPS-Signals?“.

Auf der Grundlage dieses Berechnungsansatzes ergeben sich für die drei systemkomponentenabhängigen Ausfallverteilungen bzw. -dauern die in der Tabelle 6-2 aufgeführten Kantenabdeckungsgrade.

Ausfallhäufigkeit und -verteilung des GPS	mittl. Kantenbefahrungsanteil
MobiGuide	99,478 %
Datenlogger, < 4 Sat.	99,998 %
Datenlogger, < 3 Sat.	99,999 %

Tabelle 6-2: Kantenabdeckungsgrade für Fahrten mit korrigiertem GPS-Signal

¹⁴⁸ Für die Streckenanteile, auf denen eine mehrdeutige Positionsbestimmung möglich und damit eine Entscheidung unter Unsicherheit zu treffen ist, wird auf die empirisch beobachteten Kantenabdeckungsgrade aus Abschnitt 4.2.2 zurückgegriffen.

Der Indikator „Kantenbefahrungsanteil“ kann von einem mittleren Wert von 89,1 % ohne GPS auf einen Wert von über 97 % mit Einsatz eines Navigationssystems (in Abhängigkeit der Empfangsqualität des Systems) erhöht werden (siehe Tabelle 6-3). Mit Hilfe der Optimierungsalgorithmen, die die gefahrene Wegstrecke bei GPS-Ausfall zur Bestimmung des Standortes heranziehen, kann der Kantenbefahrungsanteil in Abhängigkeit von der Präzision des GPS-Empfängers auf 99,48 bis über 99,99 % gesteigert werden (vgl. Anhang A-8).

		Signal	
		unkorrigiert	korrigiert
GPS	nein	89,1 %	
	ja	> 97,0 %	> 99,47 %

Tabelle 6-3: Kantenabdeckungsgrade der untersuchten Kombinationen von GPS-Verfügbarkeit und Signalkorrektur

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Erarbeitung eines algorithmischen Ansatzes zur Optimierung der Standortgenauigkeit, insbesondere beim Ausfall des GPS-Signals.

Für die Optimierung der Standortgenauigkeit wurden im ersten Schritt Touren hinsichtlich ihrer Ausprägung und der Genauigkeit der aufgezeichneten GPS-Signale untersucht. Anschließend wurden verschiedene Lösungsansätze für eine Optimierung der Standortbestimmung vorgestellt und die Brauchbarkeit für ihren Einsatz im Radfahrerrouting bewertet. Für drei der Ansätze wurden algorithmische Lösungen erarbeitet. Dabei handelt es sich um

- einen vereinfachten algorithmischen Ansatz, der das Befahren einer Tour durch den Radfahrer (Projektionsverfahren, Kreisbogenverfahren) bzw. eine Kontinuität hinsichtlich des Bewegungsvektors des Radlers (Extrapolationsverfahren) voraussetzt;
- ein Verfahren, das auf dem Vorhandensein eines Netzes mit Höhendaten und eines Höhenmeters am Fahrrad aufsetzt und die Plausibilität möglicher Standorte im Netz bzw. entlang der Tour anhand der z-Koordinate überprüft;
- einen Ansatz, der beim GPS-Ausfall die zurückgelegte Wegstrecke von einem Odometer abgreift und auf die geplante Route abwickelt, um den Standort unter Unsicherheit zu bestimmen.

Der erste Ansatz wurde exemplarisch hinsichtlich seiner Eignung untersucht: Als einfaches Korrekturverfahren ist es bei Ungenauigkeit der empfangenen GPS-Signale, nicht aber für einen – evtl. auch längeren – Ausfall des Systems verwendbar.

Das Verfahren mit Einbezug der Höhendaten kann dagegen auch beim Ausfall des GPS-Signals genutzt werden. Es wurde stochastisch anhand des real verfügbaren Netzes aufgezeigt, welche Verteilungen für die potenzielle Standortbestimmung in Abhängigkeit von der zurückgelegten Wegstrecke möglich sind. Ein pauschales Urteil über die Qualität des Verfahrens kann hier nicht gegeben werden. Sie wird im Wesentlichen von der Präzision des Netzmodells – und zwar von seinen z-Koordinaten – und dem eingesetzten Altimeter bestimmt.

Im dritten Ansatz wurde anhand einer Simulation auf der Basis des Radwegernetzes von Essen unter Zuhilfenahme reeller Fahrtaufzeichnungen (GPS- und Odometermessung) gezeigt, welche Genauigkeiten bei der ersatzweisen Standortbestimmung mittels der Planroute und der zurückgelegten Wegstrecke möglich sind. Das Verfahren hat sich im vorliegenden Modellnetz für die untersuchte Tour als brauchbar auch für zeitlich größere Ausfälle im Bereich bis zu 600 Sekunden erwiesen. Voraussetzung für die Methode ist der strikte Fahrtverlauf des Nutzers entlang der Tour, weil die Messungen der Wegstrecke durch das Odometer sonst verfälscht werden. Der Ansatz zeichnet sich insbesondere durch seine Einfachheit und extrem geringe Kosten aus. Erweiterungen des Verfahrens – beispielsweise um eine Kompassmessung – könnten die Genauigkeit der Methode bei allerdings deutlich höherem finanziellen und algorithmischem Aufwand vermutlich noch steigern.

Im Anschluss an die simulative Erprobung der Algorithmen wurde das Verbesserungspotenzial einer optimierten Standortbestimmung abgeschätzt. Dazu wurden auf der Basis von Simulationen in fiktiven und realen Netzen die Auswirkungen einer ungenauen Positionsermittlung auf die Abbiegeentscheidungen bzw. die Ausprägung der Zielerreichbarkeit bestimmt. Im Vergleich dazu wurde anhand von Befahrungen untersucht, wie sich Radfahrer in einem ihnen unbekanntem Netz unter Unsicherheit verhalten, indem ihre Fahrten aufgezeichnet und ausgewertet wurden. Aus den Beobachtungen, zusätzlichen Befragungen

und den Simulationen wurde das Potenzial abgeschätzt, das sich aus einer Optimierung des GPS-Signals ergibt.

Als Indikator zur Beschreibung der Wirkung wurde der Kantenbefahrungsgrad gewählt. Er gibt an, wie viel Prozent der vorgesehenen Kanten vom Nutzer befahren wurden. Ausgehend von einem Kantendeckungsgrad von 89 % für Radfahrer ohne GPS-Unterstützung steigt der Anteil der befahrenen Kanten mit (fehlerbehaftetem) GPS auf 97 % an; durch den Einsatz eines Korrekturalgorithmus sind Abdeckungsquoten von über 99,5 % erzielbar.

Die ermittelten Werte sind allerdings wesentlich von den Faktoren

- Hardware (GPS-Empfänger),
- Daten (Netzmodell) und
- Nutzerverhalten

abhängig.

Relevant für die GPS-Genauigkeit sind die Qualität der GPS-Antenne, die Ausrichtung der Antenne, das Umfeld in Form möglicher Abschirmungen sowie das Zeitfenster, welches in Abhängigkeit vom Standort die Anzahl maximal sichtbarer Satelliten bestimmt.

In den vorliegenden Berechnungen wurde das Datenmodell als fehlerfrei angenommen. Die Untersuchungen zum Netz haben aber gezeigt, dass bereits die gängigen Netze des motorisierten Individualverkehrs Ungenauigkeiten beinhalten; dies gilt umso mehr für den Radverkehr.

Letztendlich muss der Nutzer die ihm während der Fahrt signalisierten Informationen wahrnehmen, inhaltlich erfassen, richtig deuten und die daraus resultierenden Entscheidungen treffen. Mit Hilfe geeigneter Methoden – wie beispielsweise mittels Abbiegehinweisen – kann zwar das Aufmerksamkeitsdefizit des Nutzers reduziert und sein Fehlverhaltensanteil gesenkt, aber keine völlig fehlerfreie Entscheidung herbeigeführt werden.

7.2 Ausblick

Zu den Ansätzen, die aus den Ergebnissen dieser Arbeit hervorgehen, ist die Beobachtung von Nutzern beim Einsatz eines Navigationssystem mit einem die Ortung optimierenden Algorithmus zu zählen. Dazu müssten Nutzer ausgewählte Strecken ohne GPS-, mit fehlerbehaftetem GPS- und mit korrigiertem GPS-Signal befahren. Dabei müsste ihr Verhalten, insbesondere an Verzweigungspunkten, beobachtet werden und ihre subjektiven Eindrücke, die sich aus der Unterstützung durch die Navigation ergeben, müssten erfasst werden.

Neben Untersuchungen zum vorgestellten Ansatz mit Hilfe eines Wegstreckensignals erscheint die Entwicklung von Algorithmen zum Einsatz von Kompass oder Höhenmessung denkbar. Diese müssten nach der Entwicklung durch Simulationen oder praktische Tests hinsichtlich ihrer Eignung überprüft werden. Dazu ist es allerdings erforderlich, für einen geeigneten Untersuchungsraum ein vollständiges Radwegenetz zu generieren, und für Praxistests ein Navigationssystem mit entsprechenden Komponenten auszustatten.

Der erarbeitete Optimierungsalgorithmus für Radfahreravigationssysteme könnte moderne Navigationssysteme für den Freizeitbereich, zu denen neben Radwandern auch fußläufige Aktivitäten wie Wandern zu zählen sind, erheblich verbessern.

Einzig und allein durch eine genauere Standortbestimmung entsteht aber kein gutes Navigationssystem. Vielmehr spielen eine Vielzahl von Komponenten zusammen, um eine nutzergerechte Lösung zu erstellen. Während in den vergangenen Jahren die GPS-Detektion selbst schneller und leistungsfähiger geworden ist, wurde die Ausrichtung der Geräte auf eine universelle Nutzergruppe beibehalten. Lösungen, die speziell die Bedürfnisse von Radfahrern und Wandernern abdecken, sind im Großen und Ganzen nicht entstanden.

Im Verlauf der Arbeit konnten zahlreiche Navigationslösungen, die auch – wenngleich nicht speziell – für den Markt der Radfahrer geeignet sind, getestet werden. Anhand von Befragungen von Radfahrern nach ihren Anforderungen

und Erwartungen bei der Vorbereitung und Durchführung von Radtouren konnten Ansprüche an ein Radfahrernavigationssystem herausgearbeitet werden. Als wesentliche Erkenntnisse daraus lässt sich festhalten, dass einerseits die vorhandenen Hardwaresysteme meist nicht für Radfahrer geeignet sind (beispielsweise fehlt bei allen Systemen eine autonome bzw. fahrradabhängige Stromversorgung), und andererseits die Funktionalitäten bestehender Systeme nicht auf die Bedürfnisse von Radlern abgestimmt sind (z. B. wird die Kombination der Verkehrsträger Fahrrad und ÖPNV durchweg vernachlässigt).

Es fehlt insbesondere auch die für Zweiradfahrer erforderliche Datengrundlage. Die bestehenden Systeme verwenden weitgehend die auf dem Straßennetz für Kfz basierenden Vektorkarten. Finden Rasterkarten Verwendung, dann i. d. R. keine speziell für Radfahrer geeigneten Karten. Eine kombinierte Nutzung von Raster- und Vektorkarten findet nicht statt.

Der Einsatz geeigneter Netzmodelle stellt aber – wie gezeigt – eine wesentliche Voraussetzung für ein leistungsfähiges Navigationssystem dar. Abhängig davon ist nicht allein die Ortung, sondern entsprechend auch die Navigation oder die Bereitstellung von standortbezogenen Diensten (Local Based Services).

Ein modernes Navigationssystem muss daher ganzheitlich entwickelt werden, indem sämtliche Anforderungen integriert werden, die Datenbasis vervollständigt wird und radfahrgerechte Hardware Verwendung findet. Optimierungsalgorithmen für eine fehlerfreie Standortbestimmung stellen nur einen Baustein des Gesamtsystems dar.

Neben den vorgestellten Handlungsfeldern, die sich unmittelbar aus der Arbeit ableiten, haben sich weitere Forschungsfelder im Bereich der Radfahrernavigationssysteme an sich eröffnet. Dazu zählen beispielsweise Fragen nach einer geeigneten Attributierung des Wegenetzes zum Zwecke des Radfahrerroutings, nach einer optimalen Verknüpfung zwischen den Verkehrssystemen Fahrrad und ÖPNV oder nach der Entwicklung eines Algorithmus zur autonomen Generierung zuverlässiger Abbiegehinweise in Abhängigkeit vom befahrenen Wegenetz. Die auch in Zukunft steigende Nachfrage nach dem Verkehrsmittel Fahrrad hält im Bereich der Radfahrernavigation auch weiterhin ein breites Spektrum an Forschungsaufgaben bereit.

Verzeichnisse

Abkürzungen

ADFC	Allgemeiner Deutscher Fahrradclub
ARMONT	Ausgestaltung regionaler Mobilitätsdienstleistungen für Nahverkehr und Tourismus
ATKIS	Amtliches Topografisches Karteninformationssystem
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BVWP	Bundesverkehrswegeplanung
CAN-Bus	Controller Area Network Bus
dB (A)	Dezibel (A-gewichtet)
DOP	Dilution of Precision
DGM	Digitales Geländemodell
DGPS	Differential Global Positioning System
EFA	Elektronische Fahrplanauskunft
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
ERA	Empfehlungen für Radverkehrsanlagen
EWS	Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen
GDOP	Geometric Dilution of Precision
GIS	Geografisches Informationssystem
GK	Gauß-Krüger
GPS	Global Positioning System
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile
HAFAS	Communication(Mobilfunkstandard)
HBS	Hannover Consulting Fahrplanauskunftssystem
HDOP	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen

IIS	Institut für Integrierte Schaltungen (Fraunhofer-Gesellschaft)
Indygo	Individual Dynamic Guidance Opportunities
Kfz	Kraftfahrzeug, Kraftfahrzeuge
LBS	Location Based Services
Lkw	Lastkraftwagen
MDA	Mobile Digital Assistant
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MMI	Man-Machine-Interface
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
MVV	Münchner Verkehrs- und Tarifverbund
NMEA	National Marine Electronics Association
NMIV	Nichtmotorisierter Individualverkehr
OD-Matrix	Origination-Destination-Matrix
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PDA	Personal Digital Assistant
PDOP	Positional Dilution of Precision
P-km	Personen-Kilometer
POI	Point of Interest
q-v-Diagramm	Geschwindigkeits-Verkehrsstärke-Diagramm
RAS	Richtlinien für die Anlage von Straßen
RIN	Richtlinien für die integrierte Netzgestaltung
RQ	Regelquerschnitt
RWB	Richtlinien für wegweisende Beschilderung
SA	Selective Availabilitiy
StVO	Straßenverkehrsordnung

TDOP	Time Dilution of Precision
TMC	Traffic Message Channel
TOP-Karte	Topografische Karte
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UTM	Universal Transverse Mercator
VDOP	Vertical Dilution of Precision
WGS-84	Wold Geodetic System 1984
WLAN	Wireless Local Area Network
WPS	WLAN Positioning System

Abbildungen

Abbildung 2-1:	Beispiele für Lücken im Essener Radwegenetz	21
Abbildung 2-2:	Vergleich der Vollständigkeit verschiedener Freizeitwegenetze	22
Abbildung 2-3:	Tourarten.....	27
Abbildung 2-4:	Vergleich von Tourlängen von 89 Fahrradtouren in Deutschland	29
Abbildung 2-5:	Beispiel für eine Karte mit Tourenvorschlag	33
Abbildung 2-6:	Beispiel für eine Karte mit Darstellung des mit Wegweisung versehenen Radwegenetzes	34
Abbildung 2-7:	Fahrgeschwindigkeit von Radfahrern bei verschiedenen Längsneigungen.....	41
Abbildung 2-8:	Häufigkeiten von Fehlentscheidungen bei der Tour	44
Abbildung 2-9:	Anzahl der sichtbaren Satelliten am 10.11.2005 an der Station Düsseldorf.....	49
Abbildung 2-10:	Prinzip der Positionsbestimmung mit GPS, 3- dimensionale Darstellung	50
Abbildung 2-11:	UTM-Grid, Projektion für das Gauß-Krüger oder German-Grid System	53
Abbildung 2-12:	Anzeige sichtbarer Satelliten auf dem GPS-Empfänger.....	64
Abbildung 2-13:	Beispiel für eine Rasterkarte im Maßstab 1:25.000 am Beispiel eines Ausschnitts aus Cochem-Zell.....	69
Abbildung 2-14:	Beispiel für eine Vektorkarte im Maßstab 1:25.000 am Beispiel eines Ausschnitts aus Cochem-Zell.....	71
Abbildung 3-1:	Beispiel für einen unterbrochenen GPS-Empfang (Raum Stuttgart)	77
Abbildung 3-2:	Differenzierung von Präzision und Richtigkeit	78

Abbildung 3-3:	Genauigkeit verschiedener Global Positioning Systeme	84
Abbildung 3-4:	Punktwolke einer stationären Positionsbestimmung	85
Abbildung 3-5:	Genauigkeit abh. vom Breitengrad (Wuhan-China 31°N).....	87
Abbildung 3-6:	Genauigkeit abh. vom Breitengrad (Casey-Antarktis 66°N).....	88
Abbildung 3-7:	Mehrwegeeffekt (Störungen durch Reflexion der Signale)	89
Abbildung 3-8:	Beispiel für die Streuung des GPS-Signals	90
Abbildung 3-9:	Atmosphärischer Effekt	91
Abbildung 3-10:	Genauigkeitsanalyse verschiedener topografischer Einflüsse.....	97
Abbildung 3-11:	Häufigkeit und Dauer von GPS-Ausfällen	98
Abbildung 4-1:	Verteilung der Minderstrecken entlang und der Mehrstrecken außerhalb der Tour	108
Abbildung 4-2:	Anzahl der Halte in Relation zur Streckenlänge außerhalb der Solltour.....	110
Abbildung 4-3:	Antworten auf die Frage nach dem besseren Erholungswert bei Reduzierung der Orientierung anhand der Karte.....	113
Abbildung 4-4:	Antworten auf die Frage nach dem besseren Erholungswert bei Reduzierung der Fehlentscheidungen	114
Abbildung 4-5:	Zusammenhang zwischen Ortskenntnis bzw. Kartenerfahrung des Fahrers und Fehlentscheidungsrate	115
Abbildung 4-6:	Auswahlmöglichkeiten der Weiterfahrt nach einer Fehlentscheidung des Fahrers	116
Abbildung 4-7:	Methode der Weiterfahrt nach einer Fehlentscheidung	117
Abbildung 4-8:	Ausschnitt des Modellnetzes im Essener Süden.....	119

Abbildung 4-9:	Ergebnisse der Simulation für Tour 1 (kurze Tour).....	123
Abbildung 4-10:	Ergebnisse der Simulation für Tour 2 (mittlere Länge).....	124
Abbildung 4-11:	Ergebnisse der Simulation für Tour 3 (lange Tour).....	124
Abbildung 4-12:	Ausschnitt des Untersuchungsraums mit Rundtour	130
Abbildung 4-13:	Ausschnitt des Untersuchungsraums mit Etappe.....	131
Abbildung 4-14:	Mögliche Auswahlentscheidungen im Fall einer fehlerhaften Abbiegeentscheidung	133
Abbildung 4-15:	Einfache und komplexe Sackgassen.....	134
Abbildung 4-16:	Zielknotenerreichung in Abhängigkeit von der Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F für eine Rundtour im realen Netz	137
Abbildung 4-17:	Tourlänge aller „Ziel nach Fehlentscheidung erreicht“-Touren [Knoten] in Abhängigkeit der Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F für eine Rundtour im realen Netz	138
Abbildung 4-18:	Häufigkeit des Abkommens von der Tour in Beziehung zur Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F für eine Rundtour im realen Netz	140
Abbildung 4-19:	Tourlänge [Knoten] aller Touren in Abhängigkeit von der Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F für eine Rundtour im realen Netz	141
Abbildung 4-20:	Kantenbefahrungsanteil der Tour in Abhängigkeit von der Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F für eine Rundtour im realen Netz	143
Abbildung 4-21:	Tourlänge [Knoten] aller Touren in Relation zur Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F für eine Etappe im realen Netz	144

Abbildung 4-22:	Häufigkeit des Abkommens von der Tour in Beziehung zur Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F für eine Etappe im realen Netz.....	145
Abbildung 4-23:	Kantenbefahrungsanteil der Tour in Abhängigkeit von der Fehlentscheidungswahrscheinlichkeit p_F für eine Etappe im realen Netz.....	145
Abbildung 4-24:	Schematische Darstellung des Effekts des Verfahrens bei der Rundtour (links) und bei der Etappe (rechts).....	146
Abbildung 4-25:	Radienfolge möglicher Fehlstandortbestimmungen entlang der Tour (Ausschnitt).....	149
Abbildung 4-26:	Möglichkeiten der Fehlinterpretation des Standortes	150
Abbildung 4-27:	Anteile von Standorten mit Alternativstandorten innerhalb Untersuchungsradien verschiedener Größe.....	151
Abbildung 5-1:	Einfache Projektion des GPS-Standortes auf die Solltour	157
Abbildung 5-2:	Fehlerhafte Projektion beim Projektionsverfahren.....	158
Abbildung 5-3:	Kreisbogenverfahren	160
Abbildung 5-4:	Problematische Konstellationen beim Kreisbogenverfahren	161
Abbildung 5-5:	Extrapolationsverfahren	162
Abbildung 5-6:	Anzahl möglicher Standorte nach Passieren zweier 4-armiger Knotenpunkte	171
Abbildung 5-7:	Mögliche Nutzerstandorte bei GPS-Ausfall nach Zurücklegung verschiedener Wegstrecken (auf der Basis der TOP 10).....	174
Abbildung 5-8:	Mögliche Nutzerstandorte bei GPS-Ausfall nach Zurücklegung verschiedener Wegstrecken (auf der Basis des Modellnetzes)	175

Abbildung 5-9:	Einpassung des GPS-Streckenzugs in die Sollroute zum Zeitpunkt GPS_i	182
Abbildung 6-1:	Methodisches Vorgehen der Optimierung mittels Wegstreckenmessung bei zugrunde gelegter Tour.....	188
Abbildung 6-2:	Unterteilung einer Kante in Knoten und Stützpunkte.....	190
Abbildung 6-3:	Mögliche Entscheidungspunkte bei 48-sekündigem Fahrtverlauf in städtischem Umfeld.....	196
Abbildung 6-4:	Mögliche Entscheidungspunkte bei 120-sekündigem Fahrtverlauf in ländlichem Umfeld.....	198
Abbildung 6-5:	Mittlere Fehler in Abhängigkeit von zurückgelegter Wegstrecke für verschiedene Radumfänge.....	200
Abbildung 6-6:	Häufigkeitsverteilung des Positionsfehlers für ausgewählte Ausfalldauern.....	201
Abbildung 6-7:	Relative Abweichung (des Positionsfehlers von der Abwicklungslänge) bei verschiedenen GPS-Ausfalldauern.....	202
Abbildung 6-8:	Anteil der relativen Abweichungen (des Positionsfehlers von der Abwicklungslänge) $\leq 10\%$ bei verschiedenen GPS-Ausfalldauern.....	204
Abbildung 6-9:	Exemplarische Verteilung der Abweichungen des GPS-Fehlers rechts und links der Tour.....	205
Abbildung 6-10:	Auswirkungen der Routenprojektion auf die Genauigkeit der Standortprognose.....	206
Abbildung 6-11:	Bereich möglicher Fehlentscheidungswahrscheinlichkeiten p_F für Nutzer ohne GPS.....	214

Tabellen

Tabelle 2-1:	Auswertung der Verteilung von Radtour-Streckenlängen.....	28
Tabelle 2-2:	Anspruchskriterien von Radfahrern im Stadtbereich	38
Tabelle 2-3:	Beurteilung der Relevanz von Streckenattributen durch die Nutzer	42
Tabelle 3-1:	Überblick über Fehlerarten und -größen des Global Positioning Systems	92
Tabelle 3-2:	Störeinflüsse auf die GPS-Genauigkeit	95
Tabelle 4-1:	Verteilung der gefahrenen Mehr- und Minderkanten	106
Tabelle 4-2:	Verteilung der gefahrenen Mehr- und Minderstreckenlänge	107
Tabelle 4-3:	Verteilung der Anzahl der Halte und der Standzeiten.....	111
Tabelle 4-4:	Übersicht über die Struktur des Modellnetzes	118
Tabelle 4-5:	Einteilung der NavTech-Wegeklassen	127
Tabelle 4-6:	Anteile der Straßenklassen im Untersuchungsraum	128
Tabelle 4-7:	Übersicht über die Komplexität der Knotenpunktgeometrien des Modellnetzes	129
Tabelle 4-8:	Situationsmatrix für Nutzerentscheidungen	132
Tabelle 5-1:	Verfahrensansätze zur Verbesserung der Standortbestimmung	154
Tabelle 5-2:	Statistische Verteilung der Anzahl potenzieller Standorte.....	175
Tabelle 5-3:	Mittelwert aller Standardabweichungen der z- Koordinaten potenzieller Standorte	176
Tabelle 5-4:	Statistische Verteilung der Höhendifferenzen zwischen Standort und potenziellen Standorten	177

Tabelle 6-1:	Untersuchte Kombinationen von GPS-Verfügbarkeit und Signalkorrektur	211
Tabelle 6-2:	Kantenabdeckungsgrade für Fahrten mit korrigiertem GPS-Signal	216
Tabelle 6-3:	Kantenabdeckungsgrade der untersuchten Kombinationen von GPS-Verfügbarkeit und Signalkorrektur	217

Literatur

Akademie für Umwelt und Energie (Hrsg.): Perspektiven des Fahrradverkehrs. Internationales Planungsseminar, 30. Mai - 01. Juni 1985. Heft 6, Tagungsbericht, Schloss Laxenburg.

Allgemeiner Deutscher Fahrrad-Club: Radreiseanalyse 2003. Stand 25.09.2003.

Allgemeiner Deutscher Fahrrad-Club: Radreiseanalyse 2006. Stand 20.02.2007.

Allgemeiner Deutscher Fahrrad-Club: Radreiseanalyse 2007. Stand 02.06.2007.

Alrutz, Dankmar: Wegweisung für den Radverkehr. Aus: Straßenverkehrstechnik, Heft 4/2000, S. 168-174.

Alrutz, Dankmar; Bohle, Wolfgang; Willhaus, Elke: Bewertung der Attraktivität von Radverkehrsanlagen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik. Heft V 56, Wirtschaftsverlag NW. Bremerhaven 1998.

Alrutz, Dankmar; Fechtel, Hans W.; Krause, Juliane: Dokumentation zur Sicherung des Fahrradverkehrs. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft 74. Bergisch-Gladbach, 1989.

Alrutz, Dankmar; Teichgräber, Wolfgang: Ermittlung der zu erwartenden Nachfrage im Fahrradverkehr in Abhängigkeit vom Ausbau des Radwegenetzes. Reihe: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 412. Bonn – Bad Godesberg, 1984.

Bär, Wolfgang: Konzeption und Entwicklung von Software-Komponenten für ein Routenplanungssystem mit mobilen Endgeräten. Diplomarbeit, Vechta, 2002.

Bauer, Manfred: Aktueller Stand und Modernisierungskonzepte der Satellitenavigation. Tagungsband zum 4. Rostocker GPS-Tag am 29. März 2001 an der Universität Rostock, Seiten 5-10. Rostock, 2001.

Bauer, Manfred: Vermessung und Ortung mit Satelliten. Heidelberg, 1997.

Berke, Wolfgang: Radfahren und entdecken! Ruhrgebiet. Essen, 2004.

Bieger, Thomas; Laesser, Christian (Hrsg.): Attraktionspunkte. Multioptionale Erlebniswelten für wettbewerbsfähige Standorte. Haupt-Verlag, Bern, 2003.

Bill, Ralf: Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 2: Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen. Heidelberg, 1999.

Bortz, Jürgen: Statistik für Sozialwissenschaftler. Springer-Verlag, Berlin, 1993.

Bracher, Tilman; Haase, Michael: Radverkehrsplanung für Alltagsverkehr und Tourismus außerhalb städtischer Gebiete. Aus: Straßenverkehrstechnik 5/2002, S. 255-261.

Brög, Werner; Förg, O. G.; Küffner, B.: Das Potential des Fahrrads im Außerortsverkehr. Forschungsberichte aus dem Forschungsprogramm des Bundesministers für Verkehr, Heft 368. München, 1982.

Brög, Werner; Erl, Erhard: Kenngrößen für Fußgänger- und Fahrradverkehr. Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.). Heft M 109. Wirtschaftsverlag NW. Bremerhaven, 1999.

Brunsing, Jürgen: Zusammenspiel von ÖPNV und Fahrradverkehr. In: Nahverkehrspraxis, Ausgabe 10-2002, S. 32-34.

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt; Hrsg.): Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr. Symposium Unfallforschung '87. Heft 63. Bergisch-Gladbach, 1987.

Bundesministerium der Justiz (Hrsg.): Straßenverkehrsordnung (StVO). Berlin, aktuelle Fassung.

- Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): Erster Bericht der Bundesregierung über die Situation des Fahrradverkehrs in der Bundesrepublik Deutschland. Bericht der Bundesregierung. 1998.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): Nationaler Radverkehrsplan 2002-2012 – Maßnahmen zur Förderung des Radverkehrs in Deutschland. Bericht der Bundesregierung, 2002.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): Telematik im Verkehr. Berlin, 2004.
- Buur, Jacob; Windum, Jesper: MMI-Design – Man-Machine Interface (Originaltitel: MMS Design – Menneske-Maskin samspil). Kopenhagen, 1994.
- Czommer, Renate: Leistungsfähigkeit fahrzeugautonomer Ortungsverfahren auf der Basis von Map-Matching-Techniken. Dissertation, erschienen in der Reihe C der Deutschen Geodätischen Kommission, Heft Nr. 535. München, 2001.
- Diekmann, Andreas: Empirische Sozialforschung. Grundlagen, Methoden, Anwendungen. 4. Auflage, April 1998. Hamburg, 1995.
- Diestel, Reinhard: Graphentheorie. Heidelberg, 2006.
- Domschke, Wolfgang: Logistik: Transport. München, 1995.
- Eckstein, Thorsten; Kahrau, Marco; Witte, Patricia; et al: Schlussbericht zum Verbundvorhaben ArMont (Ausgestaltung regionaler Mobilitätsdienstleistungen für Nahverkehr und Tourismus). Schlussbericht der Firma ISB, Mainz. Mainz, 2004.
- Erke, H.; Latzel, M.; Ellinghaus, D.; Seidenstecher, K.: Grundlagen für Beschilderung. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 15. Braunschweig, 1994.
- Evers, Harry; Kasties, Günther: Kompendium der Verkehrstelematik. Technologien, Applikationen, Perspektiven. 4. aktuelle Lieferung, August 1999. TÜV-Verlag, 1999, Köln.

Fasold, Eva-Maria: System test of ArMont MapServer. Hauptseminararbeit am Fachgebiet für Verkehrswesen und Verkehrsbau der Universität Duisburg-Essen. Essen, 2004.

Feldkötter, Michael: Das Fahrrad als städtisches Verkehrsmittel: Untersuchung zur Fahrradnutzung in Düsseldorf und Bonn. Werner-Verlag, Mannheim 2003.

Flade, Antje: Mobilitätsverhalten. Bedingungen und Veränderungsmöglichkeiten aus umweltspsychologischer Sicht. Weinheim, 1994.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Empfehlungen für Fußgängerkehrsanlagen (EFA). Ausgabe 2002. Köln, 2002.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Empfehlungen für Radkehrsanlagen (ERA 95). Ausgabe 1995. Köln, 1995.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS). Aktualisierung der RAS-W 86. Ausgabe 1997. Köln, 1997.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Richtlinien für die Anlage von Straßen – Querschnitt (RAS-Q 96). Ausgabe 1996. Köln, 1996.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Handbuch zur Bemessung von Straßenkehrsanlagen (HBS 2001). Ausgabe 2001. Köln, 2001.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Hinweise zum Fahrradparken. Ausgabe 1995. Köln, 1995.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Hinweise zum Radkehr außerhalb städtischer Gebiete (H RaS 02). Ausgabe 2002. Köln, 2002.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Hinweise zur Beschilderung von Radkehrsanlagen nach der allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Straßenkehrs-Ordnung. Ausgabe 1989. Köln, 1989.

- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Richtlinien für die integrierte Netzgestaltung (RIN 2007). Ausgabe 2007 (Entwurf). Köln, 2007.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Richtlinien für die wegweisende Beschilderung außerhalb von Autobahnen/auf Autobahnen (RWB-2000 / RWBA 2000). Köln, 2000.
- Frerichs, Michael: Verfahren zur Genauigkeitsbeurteilung GPS-gestützter Ortungsergebnisse bei Landfahrzeugen. Schriftenreihe des Instituts für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung der TU Braunschweig (Hrsg.), Band 59. Braunschweig, 1998.
- Friedrichs, Jürgen: Methoden empirischer Sozialforschung. 13. Auflage, 1985. Opladen, 1980.
- Garmin Corporation (Hrsg.): eTrex Legend personal navigator, Benutzerhandbuch und Referenzen. 2001.
- Garmin Corporation (Hrsg.): Garmin MapSource, Benutzerhandbuch und Referenzen. 2001.
- Göpfert, Wolfgang: Raumbezogene Informationssysteme. Karlsruhe, 1991.
- Güting, Ralf: Datenstrukturen und Algorithmen. Stuttgart, 1992.
- Hagemeister, Carmen; Schmidt, Anne: Wie wichtig sind welche Kriterien für die Routenwahl von Alltagsradfahrern? Aus: Straßenverkehrstechnik, 06/2003.
- Halbritter, Günter; et al: Verkehr in Ballungsräumen – Mögliche Beiträge von Telematiktechniken und -diensten für einen effizienteren und umweltverträglicheren Verkehr. Aus der Serie: Beiträge zur Umweltgestaltung, Band 149 A. Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt. Berlin, 2002.
- Hansen, Uwe; Büssemaker, Guido; Köhne, Stefan: Schlussbericht der Fachhochschule Koblenz zum AP 7 des Verbundvorhabens ArMont. Remagen, 2005.

Hart, Peter; Nilsson, Nils; Raphael, Bertram: A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Transactions on Systems Science and Cybernetics SSC4 (2). California (USA), 1968.

Hass-Klau, Carmen, Alrutz, Dankmar, et al: Sicherheit des Fahrradverkehrs. Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft 263. Bergisch-Gladbach, 1992.

Hoffmann, Timo; Keul, Martina: Internetportale für den Fahrradtourismus. In: Monheim, Heiner: Fahrradförderung mit System. Bonn, 2004.

Holst, Ralph; Noosten, Dirk: Radverkehrsförderung – Überlegungen aus der Sicht des Marketing. Aus: Straßenverkehrstechnik, 06/2003.

Hurn, Jeff: GPS – A Guide to the Next Utility. Sunnyvale, USA, 1989.

Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (Infas; Hrsg.): Mobilität in Deutschland. Ergebnisbericht. Bonn, 2002.

Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (infas); DIW Berlin: Personentabellenband für Deutschland. Mobilität in Deutschland. KONTIV-Bericht. Juli 2003.

Jugel, Henri: Aufbereitung von Rasterkarten als Grundlage thematischer Kartenansichten. Diplomarbeit. Dresden, 2006.

Kagermeister, Andreas (Hrsg.): Verkehrssystem- und Mobilitätsmanagement im ländlichen Raum. Aus der Reihe „Studien zur Mobilitäts- und Verkehrsforschung, Band 10. Mannheim, 2004.

Keller, Hartmut; Neuherz, Martina: Das Projekt BayernInfo – Projektbewertung –. Technische Universität München. München, 2002.

Karcher, Thomas; Rutkowski, Martin; et al: Gesamtkonzept für ein mobiles ÖPNV-Informationssystem (Indygo II). Projektseminar am Fachgebiet Verkehrswesen und Verkehrsbau der Universität Duisburg-Essen. Essen, 2004.

Karcher, Thomas; Wiekhorst, Holger: Mobiles Eventmanagementsystem auf der Basis von Indygo (Indygo IV). Projektseminar am Fachgebiet Verkehrswesen und Verkehrsbau der Universität Duisburg-Essen. Essen, 2005.

Ketterer, Werner: Sicherheitsprobleme des Radverkehrs psychologisch betrachtet, Forschungsberichte des Psychologischen Instituts der Albert-Ludwig-Universität Freiburg. Freiburg, 1990.

Kolbe, Thomas: Fußgängeravigation und Routenplanung in Innenstädten und Gebäuden mit Videos und Panoramas. Bonn, ohne Jahr.

Kolbe, Thomas; Middel, Ariane; Plümer, Lutz: 3D-Kartographie für die Fußgängeravigation: Virtuelle Wegweise in Panoramen. Bonn, ohne Jahr.

Krause, Juliane (Bearbeiterin): Radfahren in der Stadt. Die Bedeutung der Umwegempfindlichkeit für die innerstädtische Radverkehrsplanung. Technische Universität Braunschweig. Braunschweig, 1984.

Lanzendorf, Martin: Freizeitmobilität. Unterwegs in Sachen sozial-ökologischer Mobilitätsforschung. Band 56. Trier, 2001.

Lechner, Wolfgang; Baumann, Stefan: Grundlagen der Verkehrstelematik; Kapitel 05100. In: Kompendium der Verkehrstelematik. Technologien, Applikationen, Perspektiven. Hrsg. von Harry Evers. Braunschweig, 1999.

Listl, Gerhard: Genauigkeit von GPS-Empfängern zur Positions- und Geschwindigkeitsermittlung. Aus: Straßenverkehrstechnik, Heft 10/2005, Seite 526-530.

Luda, Helmut, et al: Zusammenfassende Auswertung von Forschungsarbeiten zum Radverkehr in der Stadt. Reihe: Forschung Stadtverkehr, Heft A7. Bundesminister für Verkehr. Bergisch Gladbach/Berlin/Bonn, 1991.

- Megger, Lothar: Innovatives eTicketing in Nordrhein-Westfalen (NRW). Erfahrungen aus Sicht des ÖPNV. Powerpoint-Präsentation, in:
http://www.austriatech.org/fileadmin/documentvault/vortraege/Megger_Alpbach.pdf; 11.02.2007.
- Mehldorn, Gerhard (Hrsg.): Verkehr. Straße, Schiene, Luft. Kassel, 2001.
- Microsoft Encarta Enzyklopädie Professional 2005 (Digitale Enzyklopädie).
- Ministerium für Verkehr, Energie und Landesplanung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Ab in die Pedale! Düsseldorf, 2003.
- Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Energie und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Fahrrad in NRW! (Broschüre). Düsseldorf, 2002.
- Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Energie und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Fahrradfreundliches Nordrhein-Westfalen. NRW-Radverkehrsförderung (Broschüre). Düsseldorf, 2004.
- Monheim, Heiner (Hrsg.): Fahrradförderung mit System. Elemente einer angebotsorientierten Radverkehrspolitik. Aus der Reihe „Studien zur Mobilitäts- und Verkehrsforschung, Band 8. Mannheim, 2005.
- Naumann und Göbel Verlagsgesellschaft mbH (Hrsg.): Rad- und Wanderführer Deutschland. Köln, 2002.
- NavTech: Beschreibung der Klassifizierung der Straßenklassen. Ohne Ort und Jahr.
- Neumann, Klaus; Ohse, Dietrich: Operations Research. Optimierung in Graphen. Kurseinheit 1: Grundlagen der Graphentheorie. Skript der Fernuniversität Hagen, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Fachgebiet Operations Research. Hagen, 2004.
- Nossum, Ase: Stated preference surveys on internet – an effective method for finding passenger’s preferences? Summary report. Oslo, 2005.

Rase, Wolf-Dieter: Liniengeometrie und Liniengraphik. Algorithmen und Programme für die Liniendarstellung mit GKS-Funktionen. Karlsruhe, 1993.

Rat der Europäischen Gemeinschaft (Hrsg.): Richtlinie 90/270/EWG über die Mindestvorschriften bezüglich der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes bei der Arbeit an Bildschirmgeräten (Fünfte Einzelrichtlinie im Sinne von Artikel 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG). 29. Mai 1990.

Reiter, H.; Schmidt, Lieselotte; Snizek, Sepp: Bewertung von Radverkehrsanlagen durch Radfahrer. Untersuchung im Auftrag des Magistrates der Stadt Wien. Wien, 1987.

Rosinak, Werner: Ein Bewertungsverfahren für Radwegenetze. In: Österreichische Ingenieur-Zeitschrift 129, Heft 9, S. 306-310. Wien, 1984.

Schlingelhof, Marius: Ortungsverfahren. Skript zur Lehrveranstaltung Ortungsverfahren (Satellitenortung II) im Studiengang Systems Engineering / Verkehrstelematik der Universität Duisburg-Essen. Essen, 2005.

Schönharting, Jörg; Bruckmann, Dirk: Verkehrstechnik I. Ausgabe Oktober 2005. Skript des Fachgebiets Verkehrswesen und Verkehrsbau der Universität Duisburg-Essen. Essen, 2005.

Schönharting, Jörg; Bruckmann, Dirk; Stöcker, Konrad, et al: Untersuchung der Auswirkungen ausgewählter politischer Entscheidungen auf Verkehr und Umwelt. Studie des Institut für Mobilitätsforschung ifmo (Hrsg.). Berlin, 2000.

Schönharting, Jörg; Brandt, Thorsten; Tetzner, Stefan: Konzept MobiGuide. Lastenheft im Rahmen des Verbundprojektes „Ausgestaltung regionaler Mobilitätsdienstleistungen im Nahverkehr und Tourismus (ArMont)“. Teilbericht B zum AP 400 der Universität Essen. Essen, 2003.

Schönharting, Jörg; Tetzner, Stefan: Evaluation MobiGuide. Teilbericht D zum AP 460 im Gesamtprojekt ArMont. Essen, 2005.

Schönharting, Jörg; Tetzner, Stefan: Untersuchung zur Wirtschaftlichkeit des Navigationssystems MobiGuide als Teil des Gesamtsystems ArMont. Teilbericht E zum AP 460 im Gesamtprojekt ArMont. Essen, 2005.

Schöttler, Frank: Fahrzeugsensorik; Kapitel 05410. In: Kompendium der Verkehrstelematik. Technologien, Applikationen, Perspektiven. Hrsg. von Harry Evers. Braunschweig, 1999.

Schrat, Michael: Umgebungserfassung auf Basis lernender Digitaler Karten zur vorausschauenden Konditionierung von Fahrerassistenzsystemen; Lehrstuhl für Real-Computersysteme der Technischen Universität München; 2000.

Sommer, Carsten: Telematikbasiertes Verfahren zur Erhebung des Verkehrsverhaltens in: Heureka 2002 – Optimierung in Verkehr und Transport, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln, 2002.

Sommer, Carsten: TTS (TeleTravel System) - Ein Telematiksystem zur automatischen Erfassung des Verkehrsverhaltens in: Heinicke, Gunter; Diemel, Hans-Liudger (Hrsg.): Mobilitäts- und Verkehrsforschung – Neuere empirische Methoden im Vergleich, Schriftenreihe des ZTG, TU Berlin, Berlin, 2001.

Sporenberg, René: Genauigkeitsanalyse von GPS-Daten. Hauptseminararbeit im Studiengang Systems Engineering am Fachgebiet Verkehrswesen und Verkehrsbau der Universität Duisburg-Essen. Essen, 2005.

Steierwald, Gerd, Künne, Hans-Dieter: Stadtverkehrsplanung. Berlin, 1994.

Steierwald, G., Künne, H.-D.: Stadtverkehrsplanung. Berlin, 1994.

Steierwald, Schönharting und Partner (Hrsg.): Stuttgart Transport Operation by Regional Management (STORM) – Regionales Verkehrsmanagement Stuttgart. Wirkungsmodellierung – Teilprojektübergreifende Gesamtbewertung. Abschlussbericht, Februar 1996. Stuttgart, 1996.

Süselbeck, Edwin: Mit dem Fahrrad durch das westliche Ruhrgebiet. Die 12 schönsten Radtouren zwischen Duisburg und Gelsenkirchen. Köln, 2005.

- Thomas, Ralf: Navigationsmöglichkeiten im Radverkehr mit GPS-Handgeräten. Diplomarbeit an der Universität Stuttgart. Stuttgart, 2001.
- T-Mobile (Hrsg.): T-D1 NaviGate, Bedienungsanleitung, Version 3.5. Bonn, 2002.
- TomTom (Hrsg.): TomTom Navigator, PalmTop, Bedienungsanleitung; 2002.
- Trimble Navigation Limited (Hrsg.): Trimble Planning Software 2.7 (Freeware).
- Verband deutscher Verkehrsunternehmen (VdV), Hrsg.: Telematik im ÖPNV in Deutschland. Düsseldorf, 2001.
- Welker, Natalie: Entwicklung eines mobilen Fahrgast-Assistenzsystems (Indy-go V). Hauptseminararbeit am Fachgebiet Verkehrswesen und Verkehrsbau der Universität Duisburg-Essen. Essen, 2006.
- Wermuth, Manfred: Verfahrensschritte der Verkehrsplanung. In: Verkehr. Straße, Schiene, Luft. Hrsg. von Mehlhorn, Gerhard. Berlin, 2001.
- Wermuth, Manfred: Telematiksystem zur automatischen Erfassung des Verkehrsverhaltens - Projekt TTS - TeleTravel System Zukunftsfähige Mobilität in Stadt und Region, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen. Köln, 2000.
- Zimber, A.: Heidelberger Radwege im Urteil ihrer Nutzer. Arbeit am psychologischen Institut der Universität Heidelberg. Heidelberg, 1994.
- Zimmermann, Michael: Angebotsplanung für den Radverkehr in topografisch bewegten Räumen. Ein Beitrag zur Frage der Zweckmäßigkeit. Dissertation. Wuppertal, 1994.
- Zhao, Yilin: Vehicle Location and Navigation Systems. Intelligent Transportation Systems Artech House. London, 1997.

Internetquellen

<http://de.wikipedia.org/wiki/Altimeter>; 03.02.2007.

<http://gps.faa.gov/FAQ/faq-gps.htm>; 02.06.2007.

<http://www.aufdemlandmobil.de/Downloads/adlm-Papier7.pdf>; Verbundprojekt „Auf dem Land Mobil“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung; 10.02.2007.

<http://www.bahn.de/p/view/index.shtml>; Deutsche Bahn AG; 27.01.2007.

<http://www.bakom.ch/glossar/index.html?lang=de&action=id&id=40>;
Schweizerisches Bundesamt für Kommunikation; 17.12.2006.

<http://www.bgc.de/kunden/sirf/sirfstar3.htm> (Firma Sirf, deutsche Seite);
25.01.2007.

<http://www.buss-yachtshop.de>; 2002.

<http://www.destatis.de> (Statistisches Bundesamt); 01.12.2003.

<http://www.garmin.de>; Firma Garmin; 08.02.2007.

<http://www.geoinformatik.uni-rostock.de>; 02.11.2007.

<http://www.gps-world.net>; GPS-Routen-Datenbank; 21.02.2007.

<http://www.iis.fraunhofer.de/bf/ec/nl/omf/index.jsp> (Institut für Integrierte Schaltungen des Fraunhofer Instituts); 30.01.2008.

http://www.iis.fraunhofer.de/fhg/Images/PI_WLAN_Testbed_tcm97-103946.pdf
(Institut für Integrierte Schaltungen des Fraunhofer Instituts); 30.01.2008.

http://www.itwissen.info/definition/lexikon/___radio%20cell_funkzelle.html;
03.02.2007.

<http://www.kowoma.de/gps/Fehlerquellen.htm>; 20.06.2004.

http://www.kowoma.de/gps/Praktische_Hinweise.htm; 20.06.2004.

- <http://www.kowoma.de/gps/zusatzerklaerungen/Praezision.htm>; 11.10.2005.
- <http://www.magellangps.com>; Firma Magellan; 08.02.2007.
- <http://www.medion.de>; Firma Medion; 08.02.2007.
- <http://www.mobile-navigation.de>; 2002.
- <http://www.mobile-navigation.de>; DataSend Route; 2003.
- <http://www.mobitell.de>; Firma MobiTell; 28.01.2007.
- <http://www.mountainbike-gps.de>; 08.02.2007.
- <http://www.muenchen.de/verticals/Mobilitaet/Fahrrad/radfahren/143166/index.html>; Mobinet München; 15.01.2007.
- <http://www.mvv-muenchen.de/de/home/fahrgastinformation/efa/mobiledienste/online-handy-fahrplan/index.html>; Münchner Verkehrs- und Tarifverbund; 28.01.2007.
- <http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/sigspec/gpssps1.pdf>; 14.12.2006.
- <http://www.navteq.com>; 27.01.2007.
- http://www.ngs.noaa.gov/FGCS/info/sans_SA/world/cas1.gif; National Geodetic Survey (U.S. Department of Commerce), USA; 01.05.2007.
- http://www.ngs.noaa.gov/FGCS/info/sans_SA/world/wuhn.gif; National Geodetic Survey (U.S. Department of Commerce), USA; 01.05.2007.
- http://www.pocketnavigation.de/article/view_479_1164__Logiball-Plus-Karte/3.5.43.html; 16.06.2006.
- <http://www.radtouren.nrw.de> bzw. <http://www.radverkehrsnetz.nrw.de>; Ministerium für Bauen und Verkehr des Landes NRW; 08.02.2007.
- <http://www.quantenwelt.de/technik/GPS/almanach.html>; 2006.
- <http://www.sphinx-electronics.de/deutsch/bluetooth/bluetooth.htm>; 14.06.2004.

<http://www.stua-si.nrw.de/htm/service/links/leitfaden.pdf>; 21.02.2007.

http://www.suedbadenbus.de/pdf_dyn/Flyer%20RadBus%202006.pdf;
Verkehrsunternehmen SGB SüdbadenBus GmbH; 10.02.2007.

<http://www.teleatlas.com/Pub/Home>; 27.01.2007.

<http://www.vrr.de/de/fahrplanauskunft/index.html>; Fahrplanauskunft des Verkehrsverbundes Rhein-Ruhr; 28.01.2007.

http://www.zdf.de/ZDFde/inhalt/1/0,1872,2063457_HOME,00.html; 14.06.2004.

<http://www.zdnet.de>; Blecher, Joni: Testbericht zum T-Mobile MDA; 08/2002.

<http://www.zdnet.de>; Prat, Damien: Testbericht zum Compaq iPaq 3850; 02/2002.

Daten- und Kartenquellen

Kommunalverband Ruhrgebiet: Radtour. Regionale Radwanderstrecken, Mittleres Ruhrgebiet; Maßstab 1:40.000. Essen, ohne Jahr.

Kommunalverband Ruhrgebiet: Radtouren durch den Regionalen Grünzug E; Maßstab 1:20.000. Essen, 1999.

Landesvermessungsamt Baden-Württemberg: Amtliche Topografische Karten 1:25.000 (TOP 25), Version 2. CD-ROM. Stuttgart, 2003.

Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz: Gedruckte Topografische Karte im Maßstab 1:25.000, Blatt 5808. Koblenz, 2002.

Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz: Amtliche Topografische Karten 1:50.000 (TOP 50). CD-ROM. Koblenz, 1999.

Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen: Amtliche Topografische Karten 1:10.000 (TOP 10). CD-ROM. Bonn, 2004.

Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen: Amtliche Topografische Karten 1:50.000 (TOP 50). CD-ROM. Bonn, 2001.

Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Produkte und Dienstleistungen 2006/2007. Broschüre. Bonn, 2006.

Logiball (Hrsg.): Forstwegekataster. Auszug dem Forstwegekataster im Bereich (R 2565000, H 5697000); (R 2581000, H 5713000) (Gauß-Krüger, 2. Meridianstreifen). Herne, 2006.

NavTech: Ausschnitt aus NavTech-Netz. Firma Navigation Technologies, Stand 2002.

Stadt Essen: Amtliche Fahrradkarte der Stadt Essen; Maßstab 1:20.000. Essen, 2006.

Stadt Essen, Amt für Geoinformation: Höhendaten. Auszug aus dem Höhenmodell der Stadt Essen. Essen, 2006.

Statistisches Bundesamt: www.destatis.de/basis/d/evs/budtab3.htm.

Anhang

Anhang A-1: Fragebogen zur Befahrung der Strecke	255
Anhang A-2: Ergebnisse der Befahrungen	256
Anhang A-3: Ergebnisse der Befragungen	257
Anhang A-4: Modellnetz der Stadt Essen für die Simulation (schematisch).....	258
Anhang A-5: Algorithmus der Optimierung mittels Wegstreckenmessung bei zugrunde gelegter Tour (schematische Darstellung, vereinfacht)	260
Anhang A-6: Algorithmus der Optimierung mittels Wegstreckenmessung bei zugrunde gelegter Tour (Programmablaufplan, vereinfacht).....	264
Anhang A-7: Aggregierte Ergebnisse der Simulationen zum Optimierungsalgorithmus mittels Wegstreckenmessung bei zugrunde gelegter Tour für drei verschiedene Radumfänge	266
Anhang A-8: Berechnung der infolge der Optimierung erzielbaren Kantenbefahrungsanteile	267

1) ZUR PERSON:

Geschlecht:

 weiblich männlich

Alter: _____ Jahre

Beruf: _____

Wohnort:

 Essen Nachbarstadt von Essen

2) ZUR TOUR:

Datum: ____ . ____ . 2007

Startzeit (ca.): _____ Uhr

Wie hoch war der Erholungs- bzw. Erlebniswert der Tour für dich?

 Hoch Mittel Niedrig

Wie gut kanntest du dich im Bereich der Tour aus?

 Eher gut Mittelmäßig Eher schlecht

Hättest du die Tour „mehr genossen“, wenn du nicht so viel auf die Karte hättest blicken müssen?

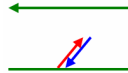
 Ja Nein Weiß ich nicht

Hast du dich während der Tour verfahren?

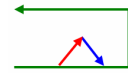
 Ja, mindestens 3 Mal Ja, 1- bis 2- Mal Nein Weiß ich nicht

Falls „Ja“ (verfahren):

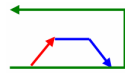
Falls „Ja“: Welche Methode (siehe oben) hast du bevorzugt, nachdem du dich verfahren hast?

 Meth. a Meth. b Meth. c Meth. d zufällig weitergefahren situationsabhängig

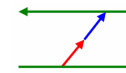
„zurück“



„weiter“



„parallel“



„abkürzen“

Hättest du die Tour „mehr genossen“, wenn du dich seltener verfahren hättest?

- Ja Nein Weiß ich nicht

3) ZUR KARTE:

Wie erfahren schätzt du dich im Lesen von Karten ein?

- Eher gut Mittelmäßig Eher schlecht

Wie gut war die Karte für dich zur Orientierung geeignet?

TOP-Karte (DIN A4-Blätter):

- Eher gut Mittelmäßig Eher schlecht, weil _____

Fahrradkarte (Faltplan):

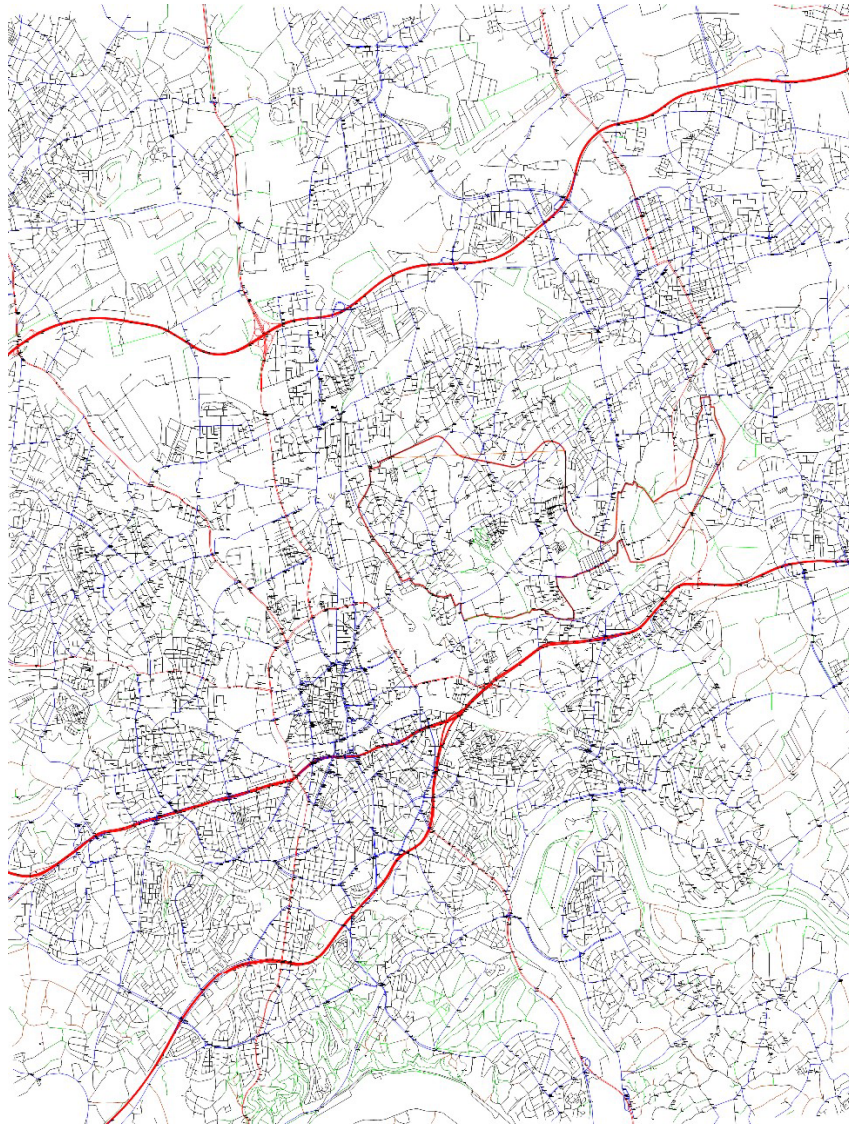
- Eher gut Mittelmäßig Eher schlecht, weil _____

Anhang A-1: Fragebogen zur Befahrung der Strecke

zurückgelegte Steigung außerhalb der Solltour	[m]	16,55	90,84	136,36	19,96
zurückgelegte Steigung im Bereich der Solltour	[m]	112,65	194,78	282,22	40,51
Steigung der Solltour	[m]	112,65	194,78	282,22	40,51
Verfahrenen	[Anzahl]	4	8	13	21
Standzeit/Reisezeit	[%]	12,6%	27,2%	19,1%	6,7%
Standzeit	[sek.]	550	2610	610	450
Anzahl Halte > 6 sek.	[Anzahl]	10	48	14	18
Durchschnitts-Geschwindigkeit	[km/h]	11,74	8,94	16,17	13,96
Tourdauer	[hh:mm:ss]	01:12:29	02:40:01	00:53:20	01:51:30
Nicht gefahrene km der Solltour	[km]	1,90	3,95	2,30	0,20
Gefahrene km der Solltour	[km]	12,97	19,65	12,73	22,60
Gefahrene Gesamt-km außerhalb Solltour	[km]	1,70	4,20	1,50	3,35
Gefahrene Gesamt-km	[km]	14,67	23,85	14,23	25,95
Gesamt-km der Solltour	[km]	14,87	23,60	13,73	23,60
Gefahrene Kanten außerhalb Soll-Tour	[Anzahl]	17	41	5	18
Gefahrene Kanten der Soll-Tour	[Anzahl]	68	128	94	167
Gesamtanzahl Kanten der Solltour	[Anzahl]	87	175	102	175
Startzeit	[hh:mm:ss]	16:03:31	16:50:07	13:00:00	10:47:30
Datum	[tt.mm.jjjj]	06.09.2006	26.04.2007	01.05.2007	04.05.2007
Lfd. Nr.	[No]	1	2	3	4
		5	6	7	8
		9	11	12	13
		14	15	16	17
		18	19	20	21
		22	23	24	25
		26	27	28	29
		30	31	32	33
		34	35	36	37
		38	39	40	41
		42	43	44	45
		46	47	48	49
		50	51	52	53
		54	55	56	57
		58	59	60	61
		62	63	64	65
		66	67	68	69
		70	71	72	73
		74	75	76	77
		78	79	80	81
		82	83	84	85
		86	87	88	89
		90	91	92	93
		94	95	96	97
		98	99	100	101
		102	103	104	105
		106	107	108	109
		110	111	112	113
		114	115	116	117
		118	119	120	121
		122	123	124	125
		126	127	128	129
		130	131	132	133
		134	135	136	137
		138	139	140	141
		142	143	144	145
		146	147	148	149
		150	151	152	153
		154	155	156	157
		158	159	160	161
		162	163	164	165
		166	167	168	169
		170	171	172	173
		174	175	176	177
		178	179	180	181
		182	183	184	185
		186	187	188	189
		190	191	192	193
		194	195	196	197
		198	199	200	201
		202	203	204	205
		206	207	208	209
		210	211	212	213
		214	215	216	217
		218	219	220	221
		222	223	224	225
		226	227	228	229
		230	231	232	233
		234	235	236	237
		238	239	240	241
		242	243	244	245
		246	247	248	249
		250	251	252	253
		254	255	256	257
		258	259	260	261
		262	263	264	265
		266	267	268	269
		270	271	272	273
		274	275	276	277
		278	279	280	281
		282	283	284	285
		286	287	288	289
		290	291	292	293
		294	295	296	297
		298	299	300	301
		302	303	304	305
		306	307	308	309
		310	311	312	313
		314	315	316	317
		318	319	320	321
		322	323	324	325
		326	327	328	329
		330	331	332	333
		334	335	336	337
		338	339	340	341
		342	343	344	345
		346	347	348	349
		350	351	352	353
		354	355	356	357
		358	359	360	361
		362	363	364	365
		366	367	368	369
		370	371	372	373
		374	375	376	377
		378	379	380	381
		382	383	384	385
		386	387	388	389
		390	391	392	393
		394	395	396	397
		398	399	400	401
		402	403	404	405
		406	407	408	409
		410	411	412	413
		414	415	416	417
		418	419	420	421
		422	423	424	425
		426	427	428	429
		430	431	432	433
		434	435	436	437
		438	439	440	441
		442	443	444	445
		446	447	448	449
		450	451	452	453
		454	455	456	457
		458	459	460	461
		462	463	464	465
		466	467	468	469
		470	471	472	473
		474	475	476	477
		478	479	480	481
		482	483	484	485
		486	487	488	489
		490	491	492	493
		494	495	496	497
		498	499	500	501
		502	503	504	505
		506	507	508	509
		510	511	512	513
		514	515	516	517
		518	519	520	521
		522	523	524	525
		526	527	528	529
		530	531	532	533
		534	535	536	537
		538	539	540	541
		542	543	544	545
		546	547	548	549
		550	551	552	553
		554	555	556	557
		558	559	560	561
		562	563	564	565
		566	567	568	569
		570	571	572	573
		574	575	576	577
		578	579	580	581
		582	583	584	585
		586	587	588	589
		590	591	592	593
		594	595	596	597
		598	599	600	601
		602	603	604	605
		606	607	608	609
		610	611	612	613
		614	615	616	617
		618	619	620	621
		622	623	624	625
		626	627	628	629
		630	631	632	633
		634	635	636	637
		638	639	640	641
		642	643	644	645
		646	647	648	649
		650	651	652	653
		654	655	656	657
		658	659	660	661
		662	663	664	665
		666	667	668	669
		670	671	672	673
		674	675	676	677
		678	679	680	681
		682	683	684	685
		686	687	688	689
		690	691	692	693
		694	695	696	697
		698	699	700	701
		702	703	704	705
		706	707	708	709
		710	711	712	713
		714	715	716	717
		718	719	720	721
		722	723	724	725
		726	727	728	729
		730	731	732	733
		734	735	736	737
		738	739	740	741
		742	743	744	745
		746	747	748	749
		750	751	752	753
		754	755	756	757
		758	759	760	761
		762	763	764	765
		766	767	768	769
		770	771	772	773
		774	775	776	777
		778	779	780	781
		782	783	784	785
		786	787	788	789
		790	791	792	793
		794	795	796	797
		798	799	800	801
		802	803	804	805
		806	807	808	809
		810	811	812	813
		814	815	816	817
		818	819	820	821
		822	823	824	825
		826	827	828	829
		830	831	832	833
		834	835</		

Block 1 - Person		Block 2 - Tour							Block 3 - Karte								
Lfd. Nr.	Geschlecht [w/m]	Alter	Beruf	Wohnort [1,2,3]	Datum [TT.MM.JJJJ]	Startzeit [hh:mm]	Erholungswert [1;1-2;2,2-3;3]	Ausgekannt [1;1-2;2,2-3;3]	Mehr genossen [1;1-2;2,2-3;3]	Verfahren [1;2;3;4]	Korrekturmethode	Mehr genossen [1;1-2;2,2-3;3]	Kartenerfahrung [1;1-2;2,2-3;3]	Eignung TOP-Karte [1;1-2;2,2-3;3]	schlecht, weil...	Eignung Radkarte [1;1-2;2,2-3;3]	schlecht, weil...
1	m	36	Bauing	2	18.09.2006	16:30	2	3	1	1	1	2	1	2	Straßennamen f.	1	
2	w	32	Lehrerin	2	26.04.2007	16:40	2	3	1	1	x	x	2	1		1	
3	w	29	Bauing	1	01.05.2007	13:00	2	1	1	1	x	1-2	1	2		1	
4	w	28	Studentin	1	02.05.2007	16:00	2	3	3	1	x	2	2	2		2	
5	w	21	Studentin	3	04.05.2007	10:50	2	3	3	2	x	2	2	2	nicht genutzt!	1	
6	m	25	Student	3	06.05.2007	12:00	2	3	1	1	x	1	2	2		2	
7	m	22	Student	1	09.05.2007	11:00	2	3	1	1	x	1	2	3	zu wenig detailliert	1	
8	m	29	Student	1	10.05.2007	11:00	2	2	3	1	x	1	2	3		1	
9	w	25	Studentin	1	13.05.2007	13:15	1	2	1	3		1	1	2		1	
10	m	28	Student	1	01.10.2006	14:00	1	3	1	1	x	3	1	2		1	
11	m	27	Student	2	14.05.2007	11:05	1	1	1	1	x	1	1	2		1	
12	m	30	Student	3	21.05.2007	08:45	2	1	1	2		2	2	2		1	

Anhang A-3: Ergebnisse der Befragungen



Anhang A-4: Modellnetz der Stadt Essen für die Simulation (schematisch)¹⁴⁹

¹⁴⁹ Logiball: Forstwegekataster.

```

Für i = 1 bis anzahl_ausfalldauern
  Für j = 1 bis anzahl_simulationen
    Ermittlung Ausfallzeitpunkt t1 = Runden [rnd * ( k - x ) + 0,5]
    Ermittle Ausfalldauer d = ausfalldauer [i]
    Berechne Ende Ausfalldauer t2 = t1 + d
    Lese letzte GPS Position gps_x, gps_y
    Lese letzten Odometer-Saldo odo1
    min_distanz = max_double
    Für k = 1 bis anzahl_kanten
      Für u = 1 bis anzahl_unterkanten [k]
        Ermittle distanz zwischen Unterkante u und gps_x, gps_y
        Falls distanz < min_distanz dann
          Speichere Kante k_proj, Unterkante u_proj, Abschnitt absch_proj,
          Kantenposition Kante_x, Kante_y
          min_distanz = distanz
        Ende (Falls)
      Nächstes u
    Nächstes k
    Ermittle Verschiebungsvektor v_x = gps_x - kante_x, v_y = gps_y - kante_y
    Ermittle Verschiebungsfehler v_f = Wurzel ( v_x^2 + v_y^2 )
    Lese Odometer-Saldo odo2 zu Zeitpunkt t2
    Lese gps_x2, gps_y2 zum Zeitpunkt t2
    Für r = 1 bis anzahl_radumfaenge
      Setze aktuelle Kante akt_k = k_proj
      Setze aktuelle Unterkante akt_u = u_proj
      Berechne Wegstrecke x = radumfang [r] * ( odo2 - odo1 )
      Während x > 0 tue
        Lese Anzahl der Unterkanten der aktuellen Kante akt_k: anz_u
        Bestimme Anfang der Unterkante akt_u: u_x1, u_y1
        Bestimme Ende der Unterkante akt_u: u_x2, u_y2
        Falls ( akt_k = k_proj ) UND ( akt_u = u_proj ) dann
          Bestimme Anfang der Unterkante akt_u: u_x1, u_y1
          Bestimme Ende der Unterkante akt_u: u_x2, u_y2
          Berechne Länge der aktuellen Unterkante:
          u_laenge = Wurzel [ (u_x2 - u_x1)^2 + (u_y2 - u_y1)^2 ]
          Verlege Startpunkt auf den Beginn der aktuellen Unterkante:
          x = x + Wurzel [ (kante_x - u_x1)^2 + (kante_y - u_y1)^2 ]
          Reduziere aktuelle Unterkante akt_u um 1

```

```

Ende (Falls)
Falls akt_u = anz_u dann
    Erhöhe aktuelle Kante akt_k um 1
    Setze aktuelle Unterkante akt_u = 1
    Lese Anzahl der Unterkanten der aktuellen Kante akt_k: anz_u
Sonst
    Falls Wurzel [ (u_x2-u_x1)2 + (u_y2-u_y1)2 ] < x dann
        x = x - Wurzel [ (u_x2-u_x1)2 + (u_y2-u_y1)2 ]
        Erhöhe aktuelle Unterkante akt_u um 1
        Falls akt_u = anz_u dann
            Erhöhe aktuelle Kante akt_k um 1
            Setze aktuelle Unterkante akt_u = 1
        Ende (Falls)
    sonst
        Berechne prognostizierten Standpunkt:
        kante_x2 = u_x1 + ( u_x2 - u_x1 ) * ( u_laenge / x )
        kante_y2 = u_y1 + ( u_y2 - u_y1 ) * ( u_laenge / x )
    Ende (Falls)
Ende (Falls)
Ende (Während)

Berechne Fehlergröße:
fehler_x1 = kante_x2 - gps_x, fehler_y1 = kante_y2 - gps_y

Schreibe in Datei: fehler_x1, fehler_y1

Nächstes r

Ermittle korrigierten Standort unter Einbezug Verschiebungsvektor:
korr_x1 = kante_x2 + v_x, korr_y1 = kante_y2 + v_y

Berechne Fehlergröße von korrigiertem Standort:
fehler_x2 = gps_x - korr_x1, fehler_y2 = gps_y - korr_y1

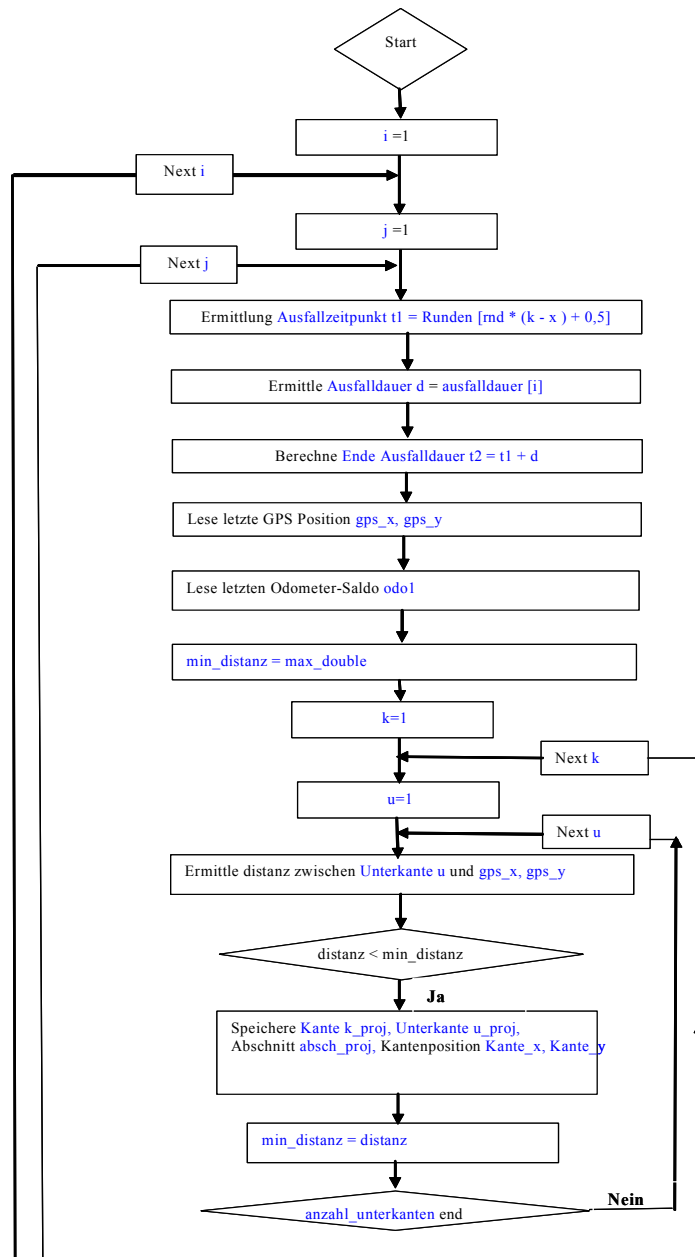
Schreibe in Datei: fehler_x2, fehler_y2

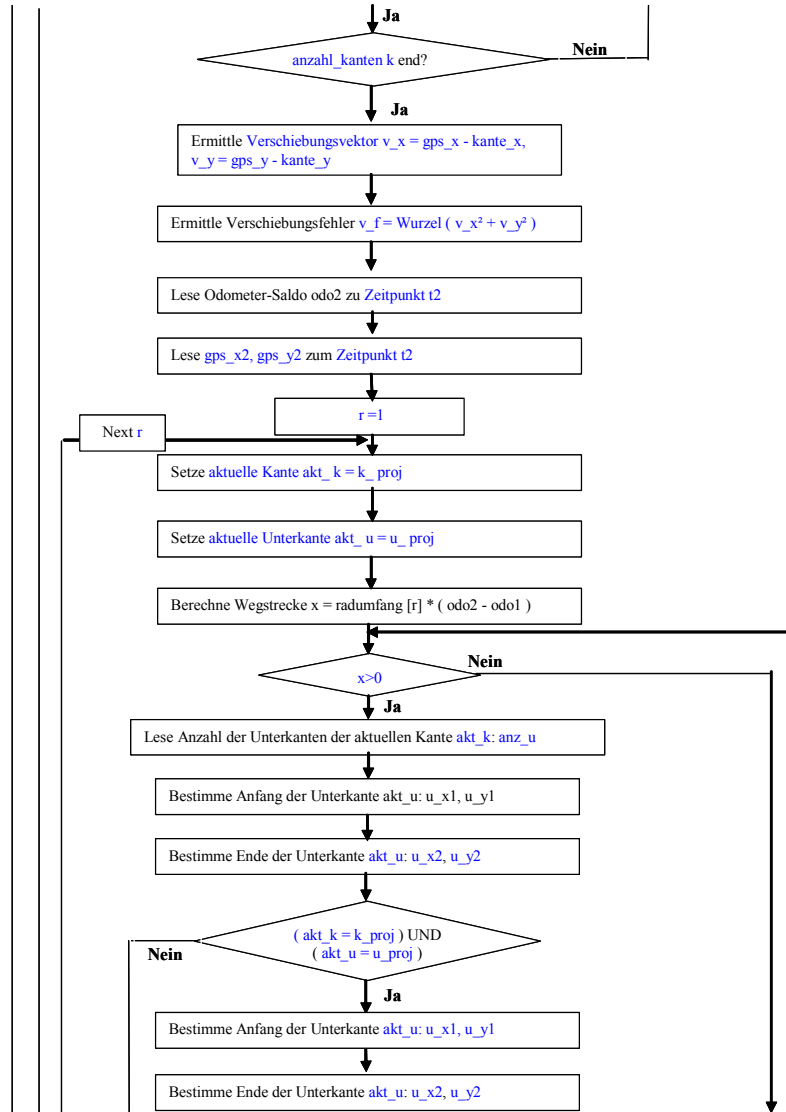
Nächstes j

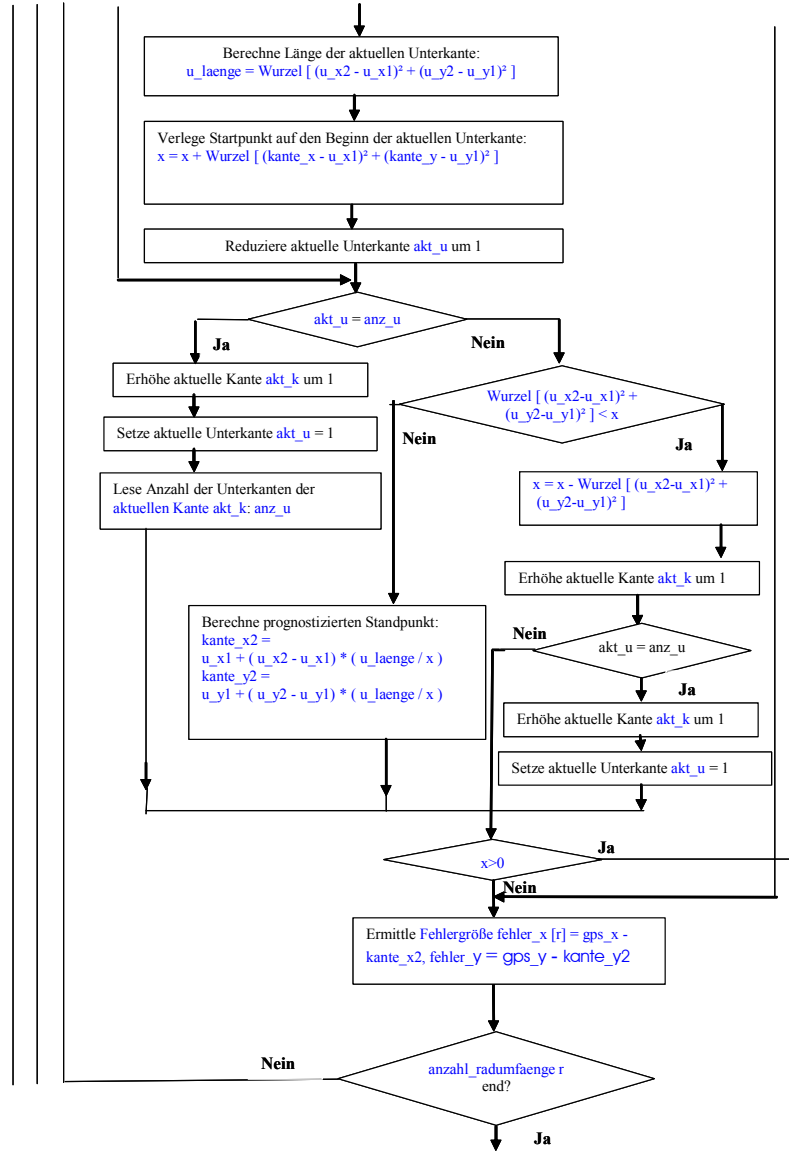
Nächstes i

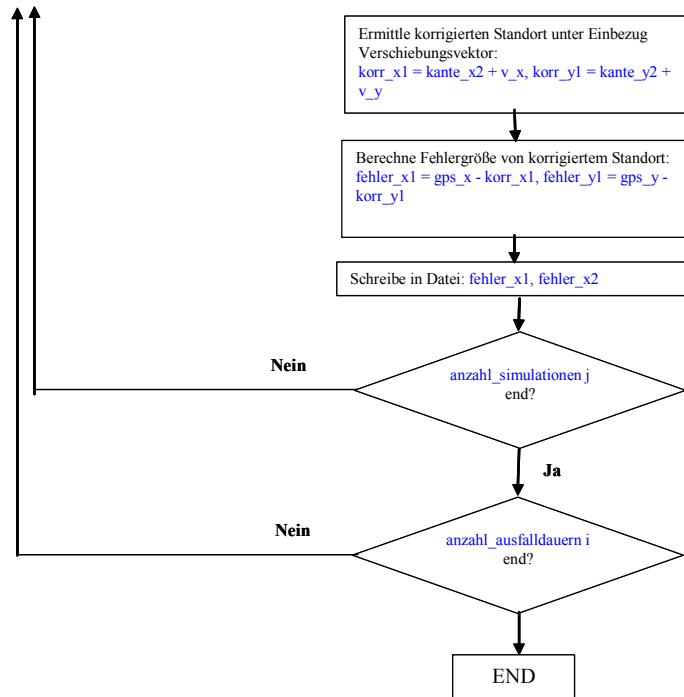
Anhang A-5:    Algorithmus der Optimierung mittels Wegstreckenmessung bei zugrunde gelegter Tour (sche-
                matische Darstellung, vereinfacht)

```









Anhang A-6: Algorithmus der Optimierung mittels Wegstreckenmessung bei zugrunde gelegter Tour (Programmablaufplan, vereinfacht)

Radumfang = 212 cm (Originalumfang):

Ausfalldauer [sek.]	gültige N [Anzahl]	Verschiebungsteher		Umfang = 212 cm		simulierte Weglänge [m]		rel. Abweich. [%]	Anteil Abw. <= 10 %	korig. um Verschiebung	
		Mittelwert [m]	Standardabw. [m]	Mittelwert [m]	Standardabw. [m]	Mittelwert [m]	Standardabw. [m]			Mittelwert [m]	Standardabw. [m]
6	101	6.93	10.26	7.48	9.50	19.70	7.09	37.97	19.8	2.65	3.35
12	96	6.52	15.95	10.54	15.14	37.92	15.32	27.80	26.0	4.68	8.21
18	97	6.87	8.85	9.44	9.06	54.33	23.97	17.37	39.2	5.37	6.95
24	96	10.25	15.95	10.78	11.73	76.07	29.61	14.18	53.1	6.94	11.99
30	96	6.20	5.64	9.96	9.20	91.15	37.83	10.93	59.4	7.09	7.28
36	100	8.52	14.30	10.83	13.19	117.44	41.98	9.22	73.0	10.41	17.73
48	107	7.28	11.12	12.18	14.43	153.60	56.68	7.92	76.6	11.31	19.64
60	99	8.46	14.45	12.40	16.00	198.04	63.97	6.26	80.8	12.69	23.09
72	104	7.76	9.88	14.49	14.91	229.66	74.47	6.31	77.9	13.79	17.21
84	95	6.41	6.91	12.41	10.40	283.69	90.03	4.37	89.5	12.36	9.54
96	100	7.05	7.48	15.65	13.98	301.00	103.03	5.20	83.0	15.55	13.43
108	108	8.55	13.70	15.36	18.40	351.37	112.45	4.38	88.0	17.14	21.94
120	98	6.49	7.38	19.36	30.38	386.67	112.50	5.01	84.7	21.62	33.32
150	105	7.84	7.99	18.29	16.77	479.76	140.98	3.81	94.3	18.33	16.98
180	99	8.01	16.33	24.29	24.18	541.34	172.83	4.49	87.9	27.27	27.34
240	108	8.69	12.19	27.75	35.26	749.23	182.51	3.70	91.7	29.78	38.08
300	90	7.65	15.89	29.24	30.56	886.44	276.33	3.30	92.2	31.46	36.14
360	95	5.96	5.74	28.46	27.62	1123.27	280.25	2.53	95.8	28.77	27.95
480	96	8.37	15.00	37.72	51.41	1479.21	286.19	2.55	97.9	41.66	52.61
600	96	5.29	5.09	36.57	36.29	1811.83	261.78	2.02	100.0	38.25	35.95

Radumfang = 208 cm (verminderter Umfang):

Ausfalldauer [sek.]	gültige N [Anzahl]	Umfang = 208 cm		simulierte Weglänge [m]		rel. Abweich. [%]	Anteil Abw. <= 10 %
		Mittelwert [m]	Standardabw. [m]	Mittelwert [m]	Standardabw. [m]		
6	101	7.49	9.49	19.33	6.96	38.74	21.8
12	96	10.59	15.09	37.20	15.03	28.47	26.0
18	97	9.71	8.95	53.31	23.52	18.21	39.2
24	96	10.95	11.63	74.63	29.05	14.68	46.9
30	96	10.49	9.12	89.43	37.12	11.73	55.2
36	100	11.25	12.81	115.23	41.18	9.77	72.0
48	107	12.60	13.98	150.70	55.61	8.36	73.8
60	99	13.13	15.26	194.30	62.76	6.76	81.8
72	104	15.78	13.96	225.33	73.06	7.00	75.0
84	95	14.34	11.56	278.34	88.34	5.15	83.2
96	100	16.81	12.85	295.32	101.08	5.69	86.0
108	108	16.99	16.17	344.74	110.33	4.93	88.9
120	98	21.27	29.31	379.37	110.38	5.61	85.7
150	105	19.36	15.39	470.71	138.32	4.11	95.2
180	99	26.30	21.78	531.13	169.57	4.95	87.9
240	108	31.18	35.50	735.10	179.07	4.24	91.7
300	90	32.05	26.91	869.72	271.11	3.69	93.3
360	95	36.67	24.35	1102.08	274.97	3.33	95.8
480	96	47.58	46.10	1451.30	280.79	3.28	99.0
600	96	50.92	25.53	1777.65	256.84	2.86	100.0

Radumfang = 216 cm (erhöhter Umfang):

Ausfalldauer (sek.)	gültige N [Anzahl]	Umfang = 216 cm		simulierte Weglänge [m]		rel. Abweich. [%]	Anteil Abw <= 10 % [%]
		Mittelwert [m]	Standardabw. [m]	Mittelwert [m]	Standardabw. [m]		
6	101	7,51	9,50	20,07	7,23	37,43	17,8
12	96	10,62	15,15	38,63	15,60	27,49	27,1
18	97	9,35	9,11	55,36	24,42	16,89	41,2
24	96	10,91	11,77	77,50	30,17	14,08	53,1
30	96	9,91	9,16	92,87	38,54	10,67	58,3
36	100	11,17	13,38	119,66	42,77	9,33	70,0
48	107	12,76	14,70	156,49	57,75	8,15	77,6
60	99	13,40	16,38	201,78	65,18	6,64	80,8
72	104	15,14	15,40	233,99	75,97	6,47	76,0
84	95	12,99	9,20	289,05	91,73	4,49	90,5
96	100	16,99	14,84	306,68	104,97	5,54	81,0
108	108	17,81	19,67	358,00	114,57	4,97	86,1
120	98	21,65	30,66	393,96	114,63	5,50	85,7
150	105	22,12	17,95	488,81	143,64	4,52	91,4
180	99	28,39	24,87	551,55	176,09	5,15	84,8
240	108	32,51	33,31	763,37	185,96	4,26	91,7
300	90	38,37	31,67	903,17	281,54	4,25	92,2
360	95	35,82	29,50	1144,46	285,54	3,13	95,8
480	96	49,06	53,90	1507,12	291,59	3,26	91,7
600	96	50,51	41,26	1846,02	266,72	2,74	96,9

Anhang A-7: Aggregierte Ergebnisse der Simulationen zum Optimierungsalgorithmus mittels Wegstreckenmessung bei zugrunde gelegter Tour für drei verschiedene Radumfänge

A	B	C	F	G	H	D	E
Dauer des GPS-Ausfalls Abbildung 3-12 [sek.]	zeitlicher Anteil des GPS-Ausfalls Abbildung 3-12 [-]	möglicher Standortfehler Abbildung 6-5 [m]	potenzielle Fehlinterpretation = E (D, C) [%]	zeitbezogene Fehlinterpretationsrate = B x F [%]		Radius vorgegeben [m]	Wahrscheinlichkeit für Alternativstandorte Abbildung 4-27 [%]
0	38,38	0,00	0,00	0,00000		0	0
3	0,00	3,74	0,75	0,00000		5	1
6	41,90	7,48	3,48	1,45812		10	6
9	5,45	9,01	5,01	0,27305		15	13
12	0,83	10,54	6,78	0,05607		20	16
15	0,00	9,99	5,99	0,00000		25	22
18	1,00	9,44	5,44	0,05440		30	29
21	0,58	10,11	6,15	0,03569		35	36
24	0,00	10,78	7,09	0,00000		40	41
45	1,25	11,83	8,56	0,10703		45	48
362	10,61	28,62	26,55	2,82070		50	53
						60	70
						70	87
						80	93
						100	
Berechnung für Ausfallrate "MobiGuide"						Kanten-deckungs-grad	
					4,80506	0,89143	Fahrt unter "Untersicherheit" (Tabelle 4-1; =156/175)
					95,19494	1,00000	Fahrt unter "Sicherheit"
						0,99478	
						99,478%	

A	B	C	F	G	H		
Dauer des GPS-Ausfalls Abbildung 3-12 [sek.]	zeitlicher Anteil des GPS-Ausfalls Abbildung 3-12 [-]	möglicher Standortfehler Abbildung 6-5 [m]	potenzielle Fehlinterpretation = E (D, C) [%]	zeitbezogene Fehlinterpretationsrate = B x F [%]			
0,0	0,0000	0,00	0,00	0,00000			
1,5	0,0025	1,87	0,37	0,00001			
4,5	0,0882	5,61	1,61	0,00142			
7,5	0,0359	8,25	4,25	0,00152			
10,5	0,0183	9,78	5,78	0,00106			
13,5	0,0112	10,27	6,37	0,00071			
16,5	0,0076	9,72	5,72	0,00043			
19,5	0,0090	9,78	5,78	0,00052			
22,5	0,0021	10,45	6,62	0,00014			
25,5	0,0047	10,59	6,82	0,00032			
31,5	0,0029	10,18	6,25	0,00018			
55,5	0,0051	12,31	9,23	0,00047			
64,5	0,0059	13,18	10,46	0,00062			
109,5	0,0101	15,59	13,35	0,00134			
148,5	0,0137	18,34	15,01	0,00205			
253,5	0,0233	28,09	25,91	0,00604			
Berechnung für Ausfallrate "Datenlogger, Sat<4"						Kanten-deckungs-grad	
					0,01684	0,89143	Fahrt unter "Untersicherheit" (Tabelle 4-1; =156/175)
					99,98316	1,00000	Fahrt unter "Sicherheit"
						0,99998	
						99,998%	

A	B	C	F	G	H		
Dauer des GPS-Ausfalls Abbildung 3-12 [sek.]	zeitlicher Anteil des GPS-Ausfalls Abbildung 3-12 [-]	möglicher Standortfehler Abbildung 6-5 [m]	potenzielle Fehlinterpretation = E (D, C) [%]	zeitbezogene Fehlinterpretationsrate = B x F [%]			
0,0	0,9143	0,00	0,00	0,00000			
1,5	0,0019	1,87	0,37	0,00001			
4,5	0,0443	5,61	1,61	0,00071			
7,5	0,0097	8,25	4,25	0,00041			
10,5	0,0019	9,78	5,78	0,00011			
13,5	0,0029	10,27	6,37	0,00016			
16,5	0,0015	9,72	5,72	0,00009			
19,5	0,0018	9,78	5,78	0,00010			
22,5	0,0000	10,45	6,62	0,00000			
105,0	0,0097	15,46	13,27	0,00128			
135,0	0,0124	18,83	14,59	0,00181			
Berechnung für Ausfallrate "Datenlogger, Sat<3"						Kanten-deckungs-grad	
					0,00468	0,89143	Fahrt unter "Untersicherheit" (Tabelle 4-1; =156/175)
					99,99532	1,00000	Fahrt unter "Sicherheit"
						0,99999	
						99,999%	

Anhang A-8: Berechnung der infolge der Optimierung erzielbaren Kantenbefahrungsanteile

Bisher in den FVV-Schriften erschienen:

- Band 1:** Festkolloquium zum 60. Geburtstag von Jörg Schönharting
- Band 2:** Metrorapid / Transrapid: Vernetzung, Umfeld und Verkehrsträger
- Band 3:** Ein neues Verfahren zur Kombination von Mehrfahrgast-Taxi und ÖPNV – Das KOMET-System
- Band 4:** Fahrzeit- und Informationsvorteile durch Dynamische Zielführung – Der Einfluß der Verkehrsmeldungsqualität unter Beachtung von Netzauslastung und Alternativrouten
- Band 5:** Containerisierung des Einzelwagenverkehrs – Entwicklung einer Methode zur Abschätzung des containerisierbaren Aufkommens im Einzelwagenverkehr und Optimierung der Produktionsstruktur
- Band 6:** Ansatz zur Verbesserung der Positionsbestimmung als ein Beitrag zur Optimierung von Navigationssystemen für Radfahrer