

Untersuchung von Messsensoren zum Einsatz in Navigationssystemen für Fußgänger

Günther Retscher und Georg Skolaut

Zusammenfassung

Moderne Navigationssysteme wurden hauptsächlich für die Fahrzeugnavigation entwickelt. Durch die Entwicklung von neuen, immer kleineren, leichteren und auch genaueren Sensoren wird seit einiger Zeit auch vermehrt an der Entwicklung von Navigationssystemen für Fußgänger gearbeitet. In dieser Arbeit werden Sensoren analysiert, mit denen eine kontinuierliche Positionierung von Fußgängern möglich ist. Das Ziel ist die Entwicklung eines Systemaufbaus für ein Navigationssystem für Fußgänger, das die möglichst genaue Schätzung der Position mit einfachen Sensoren ermöglicht. Dazu wurde vorerst eine Analyse bestehender Navigationssysteme und Location Based Services (LBS) durchgeführt, wobei im Speziellen auf die verschiedenen Sensoren zur Positionsbestimmung eingegangen wird. Die Sensoren werden klassifiziert und für jeden einzelnen Aufgabenbereich werden geeignete Sensoren ausgewählt. Die beschriebenen Sensoren sind u. a. GPS und Local Positioning Systeme (LPS) zur Punktbestimmung in Gebäuden, die Positionierung mit Mobilfunktelefonen und die Höhenbestimmung mit Barometern, sowie der Einsatz von Beschleunigungssensoren, Kreisel und Kompass und daneben noch zwei Matching-Ansätze.

Für die Integration der Sensoren zur gemeinsamen Auswertung und Verarbeitung der Messdaten wird der Einsatz eines Kalmanfilters vorgeschlagen, da sich dieser Filteralgorithmus besonders gut für Echtzeit-Auswertungen eignet. Anhand simulierter Beobachtungen wird in einem praktischen Beispiel die Führung eines Fußgängers von der U-Bahnstation Karlsplatz zum Institut für Geodäsie und Geophysik der TU Wien untersucht. Die Ergebnisse haben bestätigt, dass bei einer Kombination der untersuchten Sensoren nur geringe Abweichungen im Bereich weniger Meter vom bekannten Weg des Fußgängers auftreten. Ausgehend von diesen Ergebnissen kann abschließend ein Prototyp eines Fußgängernavigationssystems mit den möglichen Systemkomponenten vorgestellt werden.

Summary

Current navigation systems have mostly been developed for car navigation. Due to the development of new smaller, lightweight and even more accurate sensors, navigation systems for pedestrians are currently under development. In this paper, sensors which can perform continuous position determination for pedestrians are investigated and tested. The aim is to develop a system design for a navigation system for pedestrians that will enable the most precise estimation of the position using simple sensors. Starting with an analysis of existing navigation systems and location based services (LBS), different sensors employed for positioning are investigated. The sensors will be classified and the most adequate ones for different

tasks will be selected. The analysed sensors are GPS and local positioning systems (LPS) for indoor location determination, positioning using cellular phones and barometers for height determination, the use of accelerometers, gyros and a magnetic compass as well as two matching approaches.

The integration of these sensors is performed using a Kalman filter since this filter is particularly suited for on-line evaluation. Using simulated observations in a practical example the guidance of a pedestrian from the underground station Karlsplatz to the Institute of Geodesy and Geophysics of the Vienna University of Technology will be analysed. The results have confirmed that the deviations from the known path are within the range of a few meters if all possible observations from the investigated sensors are combined. Finally a prototype design is presented which includes all possible system components for position determination in a pedestrian navigation system.

1 Einleitung und Motivation

Mobilität stellt in unserer Gesellschaft einen bedeutenden Wirtschaftsfaktor dar. Die Vermessung hat sich in den letzten Jahrzehnten diesem Trend immer mehr angepasst. Die rein statische Vermessung hat eine Ergänzung in Richtung schnellerer, automatischer und vor allem mobilerer Methoden erfahren. Die Messsysteme wurden immer komplexer und die Entwicklung führte zu hybriden Messinstrumenten. Der eigentliche Übergang von der statischen zur kinematischen Vermessung hat seinen Ursprung aus der Navigation genommen, die mit immer genaueren Sensoren die Bewegung im Raum erfassen kann. Erste Anwendungen bei der Vermessung von Landverkehrswegen mit Hilfe genauer inertialer Navigationssysteme (INS) waren quasi-kinematische Positionierungen der bewegten Systeme über einem Messpunkt mit Beobachtungszeiten von einigen Sekunden oder Minuten, bevor das System zum nächsten Punkt weiterbewegt wurde. Erst die Navigation mit einem *Global Navigation Satellite System* (GNSS) machte es möglich, zu jeder Zeit die Empfängerposition in einem erdfesten Referenzsystem mit gleichbleibender Genauigkeit zu erhalten. Jedoch sind die Abschattungen vor allem im bebauten Gebiet so groß, dass dieses System alleine nicht kontinuierlich die geforderte Position liefern kann. Eine Kombination mit anderen Messsystemen, wie zum Beispiel dem inertialen Messsystem oder der Koppelnavigation, bietet sich daher an. Es wurden vor allem in der automobilen Navigation zahlreiche Multisensorsysteme entwickelt, die mit unterschiedlicher Tiefe die Integration der einzelnen Kom-

ponenten verfolgt haben (siehe z.B. Krakiwsky 1991; Bäumker et al. 1995; Kees 1995; Zhao 1997).

Aktuelle Positionierungs- und Navigationssysteme wurden hauptsächlich für die Fahrzeugnavigation entwickelt. Durch die Entwicklung hin zu neuen, immer kleineren, leichteren und auch genaueren Sensoren wird mittlerweile auch an Navigationssystemen für andere Benutzergruppen, wie zum Beispiel Fußgänger, gearbeitet. Das Hauptziel dieser Arbeit besteht in der Untersuchung von Sensoren, die geeignet erscheinen, die Positionierung von Fußgängern in einem entsprechenden Navigationssystem zu ermöglichen. Hier bedarf es einer Kombination von Sensoren, die entweder absolut oder relativ zu einem Ausgangspunkt die Ermittlung des aktuellen Standorts zulassen. Für Fußgänger spielen neben der Güte der Ortung die Größe und das Gewicht des Systems eine Rolle. Allein durch die Anforderung an die Transportfähigkeit ergeben sich Einschränkungen bei der Auswahl geeigneter Sensoren.

Ein großes Problem bei der Umsetzung eines entsprechenden Systems ist die Dynamik des Fußgängers. Einerseits stellt die geringe Geschwindigkeit hohe Anforderungen an relative Sensoren und andererseits entfällt bei Fußgängern das sog. Kartenvergleichsverfahren (*Map-Matching*). Aufgrund der großen Freiheiten im Bewegungsspielraum kann die Position selten durch Vergleich mit einer Karte, wie es in Autonavigationssystemen erfolgt, verbessert werden. Das System soll weiterhin so ausgelegt sein, dass es sowohl im Freien als auch in Gebäuden entsprechende Positionsdaten liefern kann. Ein ungestörter und kontinuierlicher Übergang zwischen verschiedenen Bereichen muss gewährleistet sein, um keine Sprünge oder Lücken in der Positionierung zu erhalten. Das Verwenden bzw. die einfache Adaption von Autonavigationssystemen kommt daher nicht in Frage.

2 Prinzipieller Aufbau eines Fußgängernavigationssystems

In einem Autonavigationssystem werden hauptsächlich relative Sensoren verwendet, mit denen eine Koppelortung möglich ist. GPS wird meistens nur zum Initialisieren des Systems benutzt. Die letzte Feinpositionierung erfolgt dann allerdings über die Karteneinpassung, die in einem Fußgängernavigationssystem schwer zu verwirklichen sein wird, da ein Fußgänger einen viel größeren Bewegungsfreiraum besitzt als ein Autofahrer. Deshalb wird die absolute Positionierung in einem Fußgängernavigationssystem hauptsächlich mit den Beobachtungen eines GNSS erfolgen. Ein Ausfall der Satellitensignale darf trotzdem nicht zu einem Stillstand des Systems führen und daher müssen geeignete absolute und relative Sensoren, wie zum Beispiel ein Schrittzähler oder ein digitaler Kompass, wie sie vergleichbar auch in einem Autonavigationssystem zur Koppelnavigation eingesetzt

werden, integriert werden. Für die Positionsbestimmung in Gebäuden wurden in den letzten Jahren spezielle Systeme entwickelt, z.B. das sogenannte *Local Positioning System (LPS)*, dessen Prinzip ähnlich dem eines GNSS ist, wobei jedoch die Verfügbarkeit des Systems nur in einem örtlich begrenzten Einsatzgebiet gegeben ist.

2.1 Anforderungen

Die Anforderungen an ein Fußgängernavigationssystem steigen hiermit deutlich an. Es muss an jedem Ort funktionieren, egal ob sich der Benutzer gerade auf einer Straße, in einem Park, im Gebirge oder in einem Haus befindet. Weiterhin müssen wesentlich kleinere und leichtere Messsensoren zum Einsatz kommen. Die einfache Adaption von Autonavigationssystemen kommt zusätzlich aus folgenden Gründen nicht in Frage:

- In einem Autonavigationssystem liegt mehr Betonung auf der grafischen Darstellung der Position in einer digitalen Karte sowie bei der Zielführung des Autofahrers.
- Die Datenbank dieses Systems konzentriert sich mehr auf Straßenmerkmale und nicht auf entsprechende Einrichtungen für Fußgänger.
- Zur Positionierung werden hauptsächlich GNSS und Koppelnavigationssensoren in Verbindung mit Kartenvergleichstechniken eingesetzt. Für Fußgänger müssen andere Sensoren eingesetzt werden, wie zum Beispiel Schrittzähler oder digitale Kompass.

Um ein entsprechendes System für Fußgänger entwickeln zu können, ist eine Kombination zwischen Sensoren anzustreben, die sowohl im Freien als auch in Gebäuden arbeiten. In dieses System sollte außerdem ein Sprachsynthesizer für die Zielführung integriert werden. In einem Fußgängernavigationssystem müssen nun folgende Ziele verwirklicht werden:

- Integration von verschiedenen Sensoren, die jeweils unterschiedliche Genauigkeiten und Verfügbarkeiten aufweisen,
- Entwicklung eines Systems zur Führung auf einer optimalen Route und
- Entwicklung einer Datenbank, die speziell auf die Bedürfnisse von Fußgängern Bedacht nimmt.

2.2 Einsatzmöglichkeiten

Ein Navigationssystem für Fußgänger kann für verschiedene Aufgaben eingesetzt werden. Es hängt jedoch davon ab, ob nur die Positionsbestimmung gefragt ist, oder ob zusätzlich auch die tatsächliche Navigation, also die Führung zu einem bestimmten Ziel, umgesetzt werden soll. Ein anderer Gesichtspunkt ist die Positionierungsgenauigkeit, die von einigen hundert bis zu wenigen Metern reichen kann. Eine Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten er-

geben sich für derartige Systeme, wobei eine klare Unterteilung in verschiedene Gebiete aufgrund von Überschneidungen nur schwer möglich ist, zur besseren Übersicht aber dennoch versucht wird:

- a) *Anwendungen mit Mobiltelefonen:*
 - *Notruf:* Die Lokalisierung eines Notrufgesprächs wird durchgeführt.
 - *Pannen:* Im Falle einer Autopanne wird die Position des Fahrzeugs bestimmt.
 - *Überwachung von Personen:* Kleinkinder, ältere Menschen oder Häftlinge können lokalisiert werden.

- b) *Ortsbezogene Dienste (sog. Location Based Services LBS):*
 - *Standortbezogene Informationen:* Bereitstellung von Informationen zu Produkten, Branchen und Ereignissen in Abhängigkeit vom Standort.
 - *Tourismus:* Mobile Stadtführer zur Führung von Touristen in einer fremden Stadt auf kürzestem Weg zu bestimmten Sehenswürdigkeiten.
 - *Veranstaltungen und Messen:* Gezieltes Auffinden von ausgewählten Messeständen ohne Umwege.
 - *Wanderung:* Führung auf gesicherten Pfaden zu Hütten oder Gipfeln.

- c) *Navigation von behinderten oder sehbehinderten Personen:*
 - Navigation und Zielführung in bekannter oder unbekannter Umgebung.

- d) *Einsatz bei öffentlichen Einrichtungen:*
 - *Sicherheitsaspekt:* Polizei, Feuerwehr oder Rettung (z. B. Notarzt, Bergrettung) können gezielter und vor allem schneller an den Einsatzort geführt werden.
 - *Militär:* Der Einsatz eines Fußgängernavigationssystems erlaubt gezielte strategische Manöver im Feld.

In der Tabelle 1 sind einige Beispiele für die oben aufgezählten Einsatzmöglichkeiten angeführt. Eine Gliederung in drei Teilbereiche wird vorgenommen: Anwendungen mit Mobiltelefonen, ortsbezogene Dienste (LBS) und Navigationssysteme für sehbehinderte Personen. Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass Systeme, die eine Navigation ermöglichen, hauptsächlich auf ein GNSS vertrauen. Die Systeme, die nur eine grobe Positionierung zum Ziel haben, verwenden die Ortung mittels Mobiltelefonen. Ausnahme ist das System Lol@, das zwar eine grobe Positionierung mit dem Mobiltelefon herstellt, aber zusätzlich noch eine manuelle Verfeinerung (z.B. durch ma-

Anwendung/System		Allgemeine Kriterien				Sensoren zur Positionsbestimmung						
		Navigation	GIS/Datenbank	Mobiltelefon für Datenübertragung	Kompass für Orientierung	GNSS	LPS (Indoor)	Mobiltelefon für Positionierung	Koppelnavigation	Kompass für koppelnavigation	Kartenvergleichstechnik	Beschleunigungssensoren
Anwendung mit dem Mobiltelefon	Notrufgespräch			✓				✓				
	Pannennotruf			✓				✓				
	Überwachung			✓				✓				
	Friend Finding		✓	✓				✓				
Location Based Service	A1-Mobilguide		✓	✓				✓				
	Lol@	✓	✓	✓				✓				
	VISPA	✓	✓	✓	✓	✓						
Systeme für sehbehinderte Personen	MoBIC	✓	✓	✓	✓	✓						
	Nottingham	✓	✓		✓	✓						
	Drishti	✓	✓			✓			✓	✓	✓	
	MERL	✓	✓			✓	✓					✓

Tab. 1: Vergleich von verschiedenen Systemen zur Positionierung und Navigation von Fußgängern (nach Hein et al. 2000; T-Mobile 2002; Retscher 2002; Magenschwab 2002; Mobilkom 2002; Lola 2002; Reinhardt et al. 2002; Petrie et al. 1996; Dodson et al. 1999; Helal et al. 2001; MERL 2002)

nuelle Eingabe der Adresse des Standortes) verlangt. Eine »on-line«-Navigation ist zwar nicht möglich, aber doch eine Führung mittels einer Karte, die sich stetig der aktuellen Position anpasst. Das Mobiltelefon wird in vielen Fällen zur Datenübertragung benötigt, um vor allem in LBS entsprechende ortsbezogene Informationen aus einer Datenbank zur Verfügung stellen zu können. Die Verwendung einer Datenbank, um mittels Kartenvergleichstechnik die Position zu verbessern, ist ungeeignet, da die Zuverlässigkeit dieses Verfahrens nicht ausreichend ist.

Neben dem Mobiltelefon und einem GNSS sind nur wenige weitere Sensoren in den einzelnen Systemen integriert, die einen Ausfall dieser Sensoren überbrücken könnten. Die Koppelnavigation ist nur im System Drishti verwirklicht, hier allerdings wird der zurückgelegte Weg und die Richtung nur mit einer vorweg angenommenen Durchschnittsgeschwindigkeit und einem Kompass abgeleitet. Der Kompass wiederum dient hauptsächlich der Orientierung und wird in den seltensten Fällen für eine verfeinerte Positionsbestimmung eingesetzt. Folgende Schlüsse können weiterhin aus Tabelle 1 gezogen werden:

- Die Positionierung in Gebäuden wird stark vernachlässigt.
- Eine gesonderte Höhenbestimmung abseits von einem Satellitennavigationssystem ist in keinem System verwirklicht; ein Altimeter würde sich hierfür gut eignen.
- Der Einsatz von Beschleunigungssensoren oder einem INS wird nur in Ansätzen im System MERL verwirklicht.

Generell kann man sagen, dass bei den vorgestellten Systemen bis jetzt nur versucht wurde, für die gestellte Aufgabe eine hinreichend zufriedenstellende Lösung zu finden, die jedoch noch nicht für ein vollwertiges Fuß-

gängernavigationssystem ausreichend ist. Im Folgenden wird daher auf die Entwicklung eines Systems eingegangen, das die Mängel der einzelnen vorher beschriebenen Systeme eliminieren und so eine kontinuierliche Positionsbestimmung eines Fußgängers ermöglichen soll.

3 Messsensoren zur kinematischen Positionsbestimmung

Im Fall der Positionsbestimmung von Fußgängern kommen nur mitgeführte Messinstrumente in Frage. Die Sensoren sollten sich gegenseitig in der Schätzung der Sensor- und Systemfehler ergänzen und den Ausfall einzelner Sensoren überbrücken können. Daher ist die Kombination von Sensoren sinnvoll, die in ihrer physikalischen Wirkungsweise komplementär sind. Folgende Aspekte müssen weiterhin berücksichtigt werden:

- Die Sensoren sollen in ihrer Anschaffung nicht viel kosten, damit sie später eventuell für einen weit verbreiteten Einsatz geeignet sind.
- Sie sollen klein und leicht sein, um von einem Fußgänger eingesetzt werden zu können.
- Es müssen Sensoren verknüpft werden, die es ermöglichen, sowohl im Freien als auch in Gebäuden eine Positionsbestimmung durchzuführen.

Einen Überblick über mögliche Sensoren, die in einem Fußgängernavigationssystem eingesetzt werden können, gibt Tabelle 2. Unterteilt sind die einzelnen Sensoren in drei verschiedene Bereiche: Absolute und relative Sensoren sowie Matching-Ansätze zur Positionsbestimmung. In weiterer Folge werden die wesentlichen Gesichtspunkte für die einzelnen Sensoren kurz besprochen.

Messsensoren und -methoden für Fußgängernavigationssysteme		
Absolute Sensoren	Relative Sensoren	Matching-Ansätze
GPS, DGPS	Pedometer	Kartenvergleichstechnik
Local Positioning Systems	Kompass/Kreisel	Multipath Fingerprint
Mobilfunktechnologie	Geschwindigkeitsmesser	
Altimeter	Beschleunigungssensoren	
	Neigungsmesser	
	Low Cost INS	
	Barometer	

Tab. 2: Überblick der Sensoren und Methoden, die für die Positionsbestimmung in einem Fußgängernavigationssystem in Frage kommen

3.1 Absolute Sensoren

Absolute Sensoren liefern direkt eine oder mehrere Komponenten der aktuellen 3D-Position des Nutzers. In einem Navigationssystem wird für eine absolute Positionierung standardmäßig GPS eingesetzt, jedoch muss für Fußgänger auch nach anderen absoluten Positionierungstechniken gesucht werden, um auch in abgeschatteten Häuserschluchten bzw. in Gebäuden eine kontinuierliche Positionierung zu ermöglichen. Für die Positionierung in Gebäuden eignen sich die bereits erwähnten *Local Positioning Systeme (LPS)*, die jeweils dreidimensionale Koordinaten liefern, alternativ dazu sowohl in Gebäuden als auch im Freien die Mobilfunktechnologie, die meist nur 2D-Koordinaten bereitstellt, sowie ein Altimeter, das nur eine Höhenangabe zulässt.

Das Messprinzip eines LPS entspricht klassischen, terrestrischen Navigationsverfahren, die mittels Distanzmessung zwischen mehreren Sendern und Antennen eine Positionslösung bestimmen. Ein LPS, das nach diesem Prinzip arbeitet, ist zum Beispiel das *HF Local Positioning System LPS 007* der Firma SypTech Corporation (Sypniewski 2002). Bei diesem System werden Antennen im Gebäude installiert und das zu positionierende Objekt trägt einen Sender. Laut Herstellerangaben lassen sich Positionierungsgenauigkeiten im dm-Bereich mit Reichweiten über mehrere hundert Meter erzielen. Weitere Informationen dazu und über ähnliche Systeme findet man auch in Hightower et al. (2001).

Die Positionierung mit Mobiltelefonen kann verwendet werden, wenn andere absolute Positionierungsmethoden, im speziellen GPS, nicht zur Verfügung stehen. Die Entwicklung der Mobiltelefonpositionierung steckt allerdings erst in den Anfängen und erreicht noch nicht die Genauigkeiten einer Positionierung mit GPS. Trotzdem kann beim Ausfall der Positionsbestimmung mittels GPS versucht werden, die absolute Position in der Lage über die Positionierung mit Mobiltelefonen zu erhalten. Weitere Informationen zum Messprinzip und dem Leistungspotential dieser Verfahren findet man z.B. in Retscher (2002).

Die Höhenbestimmung mit Hilfe eines Druckaufnehmers kann während eines GPS-Ausfalls zum Beispiel die meist zweidimensionalen Positionsdaten aus der Mobilfunkpositionierung ergänzen, um so zu einer dreidimensionalen Positionierung unabhängig von GPS zu gelangen. Dabei muss jedoch eine Unterscheidung zwischen Altimeter und Barometer, die beide mit Druckaufnehmern ausgestattet sind, vorgenommen werden. Altimeter liefern direkt eine absolute Höhe, indem sie über Normatmosphärenmodelle eine Umrechnung des Drucks in eine Höhe vornehmen. Da es diese Normatmosphäre in natürlicher Umgebung nicht gibt, ist es zweckdienlicher, Höhendifferenzen mittels Barometern zu bestimmen. Die Höhendifferenzen werden aus der Messung von Druckdifferenzen abgeleitet. Es handelt sich somit eigentlich um ein relatives Messverfahren. Physikalisch betrach-

tet ergeben sich barometrisch bestimmte Höhendifferenzen aus der Bestimmung von Potentialdifferenzen des Schwerefeldes der Erde. Detaillierte Zusammenhänge werden in der Literatur beschrieben (siehe z. B. Jordan et al. 1956, Kahmen 1997). Bei der barometrischen Höhenmessung werden somit dynamische Höhenunterschiede ermittelt. Mit dem GPS werden dagegen rein geometrisch definierte, auf ein Ellipsoid bezogene Höhenunterschiede bestimmt. Im regionalen Bereich ist jedoch die Differenz vernachlässigbar gering. Änderungen der Wetterlage und somit des Luftdrucks verfälschen die Messung. Temperaturschwankungen werden von den Geräten ausgeglichen. Zur Umwandlung der barometrisch bestimmten Höhenänderung in absolute Höhen ist als Referenzhöhe die GPS-Höhe zu verwenden und wiederholt zu korrigieren. Diese Korrekturen können in so großen zeitlichen Abständen durchgeführt werden, dass von einem absoluten Sensor gesprochen werden kann. Für den Einsatz in einem Fußgängernavigationssystem eignen sich kleine, leichte Sensoren mit einer digitalen Signalausgabe, um die Daten weiter verarbeiten zu können. Die relativen Genauigkeiten betragen im Schnitt 0,1–0,3 mbar, das entspricht ungefähr einer Höhenänderung von 1–3 m.

3.2 Relative Sensoren

Zu den relativen Sensoren zählen Messsensoren mit denen der zurückgelegte Weg, die Geschwindigkeit, die Richtung sowie die räumliche Lage und die Beschleunigung eines Fußgängers bestimmt werden können. Eine absolute Position wird somit mindestens einmal am Startpunkt benötigt, um diese Messungen zur Bestimmung der dreidimensionalen Positionskordinaten heranziehen zu können. Der große Nachteil beim Einsatz relativer Sensoren liegt jedoch darin, dass im Laufe der Zeit das Fehlerverhalten sich sehr ungünstig fortpflanzt, was zu einem typischen Abdriftverhalten der Positionslösung führt.

Wird die Positionslösung aus einer Messung des zurückgelegten Weges und der Richtung abgeleitet, dann spricht man in der Regel von Koppelnavigation. Die Bestimmung des zurückgelegten Weges erfolgt – wenn nicht direkt messbar – nach klassischer Art über die Messung der Geschwindigkeit oder der Längsbeschleunigung. Distanz und eventuell Geschwindigkeit werden dann durch Integration nach der Zeit berechnet. Diese Methode ist aber in einem Fußgängernavigationssystem mit Low Cost-Sensoren nicht erfolgversprechend, da der Gang eines Fußgängers viel zu unruhig ist und somit das Signal vom Messrauschen kaum zu trennen ist. Eine Technik, die vielfach angewandt wird und bessere Ergebnisse liefert, basiert auf der Schritterkennung mittels Beschleunigungssensoren, die von Levi et al. (1996) entwickelt wurde.

3.2.1 Messung des zurückgelegten Weges

Die Schritterkennung erfordert zunächst eine kurze Betrachtung der Dynamik des menschlichen Gehens. Der Körperschwerpunkt wird beim Gehen ähnlich der Bewegung eines eckigen Rades bewegt. Diese ungleichförmige Translation erfordert einen Energiebeitrag, der in Abstimmung mit der Bewegung sämtlicher Gliedmaßen bei optimalem Gehen einen minimalen Aufwand bedeutet (vgl. Talkenberg 1999). An der Optimierung des Bewegungsablaufs sind verschiedene Körperteile beteiligt. Die Bewegungen des Beckens lassen sich als Überlagerungen von Translationen und Rotationen beschreiben. Die Abstimmung der einzelnen Bewegungsanteile erfolgt bei gesundem Gang entsprechend dem beschriebenen Prinzip minimalen Aufwandes in Abhängigkeit des Gehzustandes. Eine Bewegungsanalyse wurde von Stokes et al. (1989) anhand mehrerer Testpersonen durchgeführt. Es wurde nachgewiesen, dass die Bewegungsform des Beckens Informationen über den Gehzustand, im Speziellen vor allem die Abfolge der Schritte und auch die Geschwindigkeit enthält. Es genügt somit eine einfache Auswertung der Translationen des Beckens, um eine zuverlässige Schätzung von Geschwindigkeit und Distanz zu gewährleisten. Da die Translationen nur schwer zu messen sind, wird auf die Beschleunigung des Beckens übergegangen. Ein zweiachsiger Beschleunigungsmesser wird hierfür an der Hüfte befestigt, wobei eine Achse (= z-Achse) vertikal angeordnet werden muss, die andere normal dazu in Längsrichtung (= x-Achse). Damit kann der Gehzyklus, der genau zwei Schritte dauert, abgeleitet werden. Zur Berechnung der Geschwindigkeit wird allerdings noch die Länge des Schrittes benötigt. Verschiede-

ne Ansätze sind in der Literatur angegeben. Talkenberg (1999) führt z. B. eine Kalibrierung der Schrittlänge anhand einer Referenzinformation durch, in diesem Fall ein DGPS-Empfänger. Andere Ansätze verwenden nur eine durchschnittliche Schrittlänge, wobei allerdings ein erheblicher Genauigkeitsverlust zu erwarten ist. Bei einer Kalibrierung mit GPS Beobachtungen kann laut Jirawimut et al. (2001) die Geschwindigkeit mit einer Genauigkeit von $\pm 5\%$ bestimmt werden.

3.2.2 Richtungsbestimmung

Das Verfahren der Koppelnavigation benötigt neben der zurückgelegten Wegstrecke bzw. der Geschwindigkeit des Fußgängers auch noch die Fortbewegungsrichtung, um eine Lagebestimmung durchführen zu können. Die Bestimmung der Richtung kann mit unterschiedlichen Sensoren erfolgen. Die jeweiligen Vor- und Nachteile der einzelnen Sensoren werden in Tabelle 3 dargestellt. Auch hier ist zu beachten, dass nur Sensoren eingesetzt werden können, die den allgemeinen Anforderungen in einem Fußgängernavigationssystem (s. Abschnitt 2.1) entsprechen.

Der Einsatz eines magnetischen Kompasses zur Azimutbestimmung erfordert die geringsten Kosten. Die Genauigkeit hängt allerdings von mehreren Faktoren ab, wie zum Beispiel von der Temperatur, der Sensorneigung und der Anwesenheit von magnetischem Material. Die beiden ersteren Effekte können modelliert bzw. kalibriert werden, der letzte Effekt beeinträchtigt die Leistung deutlich. Beim Einsatz eines magnetischen Kompasses in einem Fußgängernavigationssystem muss dieser Effekt eliminiert werden, ansonsten liefert dieser Sensor unbrauchbare Daten. Ein Vorteil wäre jedoch, dass magne-

Sensor	Vorteile	Nachteile
Magnetischer Kompass	Absolutes magnetisches Azimut	Magnetische Störeinflüsse
	Langzeitgenauigkeit	Keine Vorhersage möglich
	Wiederholbarkeit der Messung	Einfluss von Temperatur/Neigung
	Kompakter leichter Sensor	
	Geringe Kosten	
Kreisel	Kurzzeitgenauigkeit	Relatives Azimut
	Keine Störungen von außen	Drift
	Wiederholbarkeit der Messung	Größe
GPS	Absolutes geographisches Azimut	Azimut nur bei Bewegung
	Mit Codephasenmessung möglich	Abschattungsprobleme
	Sensor standardmäßig vorhanden	
	Geringe Kosten	
GPS Twin Antenne	Absolutes geographisches Azimut	Abstand der Antennen
	Messung auch bei Stillstand	Mit Codephasenmessung unmöglich
		Abschattungsprobleme
		Hohe Gerätekosten

Tab. 3: Vor- und Nachteile möglicher Sensoren zur Richtungsbestimmung

tische Sensoren ein absolutes magnetisches Azimut liefern, das durch Anbringen der Deklination sehr einfach in ein geografisches Azimut umgewandelt werden kann.

Die Richtungsbestimmung mit einem Kreisel erreicht diese Langzeitgenauigkeit nicht, da Kreisel mit der Zeit sehr große Driftraten aufweisen. Diese können bereits Werte von bis zu 3° in einer Zeitspanne von nur fünf Minuten betragen. Der Einsatz eines Kreisels ist daher nur mit einer zusätzlichen Richtungsinformation möglich. In Frage kommen dafür Richtungsbestimmungen aus GPS-Messungen oder ein magnetischer Kompass. Der Vorteil des Kreisels liegt aber darin, dass er auf Störungen von außen relativ unempfindlich ist und hervorragende Genauigkeiten über kurze Zeitspannen liefert. Ausführliche Beschreibungen sind z. B. in Jekeli (2001) zu finden.

Das Azimut kann auch mit Hilfe von GPS-Beobachtungen bestimmt werden. In diesem Fall handelt es sich um ein absolutes geografisches Azimut. Wie bei jeder GPS-Messung ist auch hier das Problem der Abschattung der Satellitensignale der limitierende Faktor. Für eine kontinuierliche Richtungsbestimmung kommt dieser Sensor daher nicht in Frage, sehr wohl aber zur Echtzeitkorrektur von Daten der anderen Richtungssensoren. Zwei Möglichkeiten stehen zur Auswahl, wobei bei der ersten Methode eine Einzelantenne eingesetzt wird und bei der zweiten eine sog. Twin-Antenne. Bei der GPS Messung mit einer Antenne entstehen keine zusätzlichen Kosten, da ein derartiger Sensor ohnedies schon verwendet wird. Die Bestimmung des Azimuts erfolgt dabei aus den Differenzen zweier aufeinanderfolgender Positionen, die mit Hilfe der Codephasenmessung bestimmt wurden. Der Einsatz einer GPS Twin-Antenne eignet sich jedoch nur für aufwändige Systeme, wie z. B. bei der Maschinensteuerung und bei Mobile Mapping Systemen, bei denen eine besonders hohe Genauigkeit für die Richtungsbestimmung gefordert wird. Hierbei erfolgt die Richtungsbestimmung über die Auswertung der Trägerphasenmessung, wobei die Genauigkeit des Systems mit der Länge der Basislinie zwischen den beiden Antennen steigt. Aufgrund der großen Abstände (mindestens 0,5 m) zur Erreichung einer annehmbaren Genauigkeit und dem Einsatz genauerer Antennen, die zusätzliche Kosten verursachen, ist dieses System aber für ein Fußgängernavigationssystem nicht geeignet.

3.2.3 Geschwindigkeits- und Beschleunigungsmessung

GPS kann weiterhin zu einer Bestimmung der Geschwindigkeit eingesetzt werden. Die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung beträgt für gängige Navigationsempfänger in Richtung der Lagekoordinaten x und y jeweils $\pm 0,05$ m/s bei gleichmäßiger Bewegung. Die Genauigkeit der Vertikalkomponente beträgt ca. $\pm 0,2$ m/s. Aufgrund der hohen Genauigkeit ist eine Geschwindigkeitsmessung in Lage mittels GPS auf jeden Fall auszuführen, da eine Kalibrierung der individuellen Parameter in einem Pedometer somit erfolgen kann.

Beschleunigungssensoren sind Bewegungsaufnehmer mit denen Strecken, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen oder noch höhere Ableitungen nach der Zeit bestimmt werden können. Die physikalische Wirkungsweise der Beschleunigungssensoren soll hier nicht näher behandelt werden, sie kann zum Beispiel in Jekeli (2001) nachgelesen werden. Allerdings müssen die Entwicklungen der letzten Zeit erwähnt werden, die einen Einsatz der Beschleunigungssensoren in einem Fußgängernavigationssystem erst möglich gemacht haben.

Der Fortschritt in der Herstellungstechnologie von Halbleitern hat zur Entwicklung von neuen Sensoren geführt, die mikroskopische elektromechanische Strukturen verwenden; diese Strukturen werden iMEMS® (*Integrated Micro Electro Mechanical Systems*) genannt. Diese Technologie erlaubt die Herstellung von winzigen Sensoren mit integrierter Signalverarbeitung auf einem einzigen Chip. Beschleunigungssensoren, die nach diesem Prinzip gefertigt werden, zeichnen sich durch ihre geringe Größe, den niedrigen Preis und die Robustheit aus. Allerdings weisen sie eine etwas verminderte Leistung im Vergleich zu den herkömmlichen Sensoren auf, die aber für den Einsatz bei Fußgängern ausreichend ist. Grundsätzlich können diese Sensoren die Beschleunigungen eines Fußgängers in drei Richtungen messen, vorzugsweise in vertikaler, Längs- und Querrichtung. In den meisten Fällen werden sie allerdings nur zur Schritterkennung eingesetzt (siehe Abschnitt 3.2.1). Andere Möglichkeiten für den Einsatz von Beschleunigungssensoren sind die Neigungsmessung und die Verwendung in Inertialen Navigationssystemen (INS), wobei hier die Beschleunigungsmesser neben Kreiseln zum Einsatz kommen.

3.3 Matching-Ansätze

Neben den absoluten und relativen Sensoren gibt es noch zwei weitere Möglichkeiten, um die Position in einem Fußgängernavigationssystem zu bestimmen: die Kartenvergleichstechnik und die »Multipath Fingerprint«-Methode. Diese beiden Verfahren benötigen jeweils eine Datenbank, anhand der eine Zuordnung (sog. Matching) zu einer bestimmten Position vorgenommen wird.

Wie jedoch eingangs erwähnt eignet sich das aus Autonavigationssystemen bekannte Map Matching nicht für die Zuordnung des Weges eines Fußgängers auf einen vordefinierten Pfad, da sein Bewegungsspielraum viel größer angesetzt werden muss als dies bei einem Fahrzeug der Fall wäre. Die Modellierung der möglichen Pfade eines Fußgängers wurde in verschiedenen Projektansätzen versucht. Die Hauptprobleme liegen laut den Entwicklern in der Zusammenstellung der dafür benötigten Datenbank. Umfangreiche Arbeiten sind im Bereich der individuellen Datenaufnahme durchzuführen, was einen großflächigen Einsatz dieses Verfahrens in einem allgemein verwendbaren Fußgängernavigationssystem derzeit generell ausschließt.

Das zweite in der Tabelle 2 angeführte Matching-Verfahren ist die sog. Multipath Fingerprint-Methode. Das Verfahren wurde von der Firma U. S. Wireless Corporation zur Positionierung von Mobiltelefonen entwickelt und benutzt die Informationen der sonst störenden Mehrwegausbreitung (sog. Multipath) der Funksignale zur Positionsbestimmung (USWC 2002). Laut Herstellerangabe können mit diesem Verfahren ähnliche Genauigkeiten für die Positionierung von Mobiltelefonen wie mit den anderen leistungsfähigen Verfahren erzielt werden. Eine Beschreibung dieser Methode findet man z. B. in Retscher (2002).

4 Integration der verschiedenen Sensoren

Die verschiedenen Navigationssensoren werden nicht unabhängig voneinander verarbeitet, sondern es erfolgt eine gemeinsame Aufbereitung der Messdaten und Schätzung der Positionslösung in einem Prozess. Dem Nutzer eines Fußgängernavigationssystems wird somit kontinuierlich und in Echtzeit die bestmögliche Lösung für die 3D-Position und die Geschwindigkeit mitgeteilt. Die Technik, mit der dies realisiert werden kann, ist ein diskreter Kalman Filter. Ziel hierbei ist, einen optimalen Modellansatz zu finden, der die Bewegung eines Fußgängers am besten modelliert und mit dem die Position mit den zur Verfügung stehenden Sensoren optimal, im Sinne der Statistik, bestimmt werden kann. Außerdem soll festgestellt werden, welche Sensoren sich nun tatsächlich für den Einsatz eignen und welche Sensoren am besten einen Ausfall anderer überbrücken können. Ausführliche Simulationsrechnungen wurden im Rahmen einer Dip-

lomarbeit an der Technischen Universität Wien durchgeführt (Skolaut, 2002). Die wesentlichen Ergebnisse dieser Analysen werden im Folgenden präsentiert. Ausgegangen wird von einem Navigationssystem, das die in Tabelle 4 zusammengestellten Sensoren beinhalten kann. Bei der Auswahl der Sensoren handelt es sich jeweils um Beispiele von typischen Geräten für einen bestimmten Sensortypus und die angegebenen Genauigkeitsmaße beruhen auf Herstellerangaben.

Die Positionsbestimmung eines Fußgängers ist im Freien hauptsächlich mit GPS durchzuführen, da bei freier Sicht zu den Satelliten die höchsten Genauigkeiten erzielt werden können. Hier kann man im differentiellen Modus eine Genauigkeit von 1–4 m in allen drei Koordinatenrichtungen erwarten. Zusätzlich kann die Geschwindigkeit in der Lage mit 0,05 m/s (Höhe: 0,2 m/s) bestimmt werden. Im Inneren von Gebäuden, wo GPS bekanntlich versagt, ist ein LPS einzusetzen, da es eine Echtzeitnavigation zulässt und günstige Signalausbreitungseigenschaften besitzt. Die Genauigkeit der 3D-Positionierung mit diesem Verfahren liegt im Bereich von einem halben Meter. Eine Alternative zur Lagebestimmung mittels GPS bzw. LPS ist die Mobilfunktechnologie, die jedoch erst mit Einführung des UMTS-Netzes Genauigkeiten ab 10 m erreichen wird, bis dahin sind im besten Fall 50 m zu erlangen. Die Höhe kann beim Ausfall von GPS bzw. LPS mittels eines Barometers auf ca. 1–3 m genau bestimmt werden.

Im Bereich der relativen Sensoren eignet sich eine Inertiale Messeinheit Crossbow IMU für mehrere Aufgaben. Die drei zueinander senkrecht angeordneten Beschleunigungssensoren dienen der Messung der Beschleunigung in tangentialer, radialer sowie vertikaler

Methode	Sensor	Messgröße	Genauigkeit ⁽³⁾
GPS	z.B. Garmin GPS 35 im differentiellen Modus	y, x, z	6–10 m 1–4 m
LPS	z.B. Syptech HF LPS 007	y, x, z	0,3–1 m
Mobilfunk- technologie	GSM-Mobilfunkgerät (E-ODT Verf. ⁽¹⁾) UMTS-Mobilfunkgerät (E-ODT Verf. ⁽¹⁾)	y, x y, x	> 50 m > 10 m
Barometer	z.B. Campbell Scientific Drucksensor	H	1–3 m
Pedometer	z.B. Crossbow IMU 600 CA	v ⁽²⁾	ca. 0,1 m/s
Richtung	z.B. Leica DMC-SX (Kompass) kombiniert mit Crossbow IMU 600 CA (Kreisel)	φ	ca. 1°
Geschwindigkeit GPS	z.B. Garmin GPS 35	v _y , v _x v _z	ca. 0,05 m/s ca. 0,2 m/s
Beschleunigung	z.B. Crossbow IMU 600 CA	a _{tan} , a _{rad} , a _z	> 0,1 m/s ²

Tab. 4: Zusammenfassung der Sensoren mit den erzielbaren Genauigkeiten

⁽¹⁾ E-ODT (Enhanced Observed Time Difference) stellt das genaueste Verfahren der Positionierung mit dem Mobiltelefon dar (siehe z. B. (Retscher 2002))

⁽²⁾ Geschwindigkeit v abgeleitet aus den Beschleunigungen (vgl. Abschnitt 3.2.3)

⁽³⁾ Genauigkeitsangaben nach (Garmin 2002; Sypniewski 2002; CGALIES 2002; Campbell 2002; Crossbow 2002; Leica 2002)

Richtung mit einer Genauigkeit von bis zu $0,1 \text{ m/s}^2$. Damit können die Geschwindigkeit auf $0,1 \text{ m/s}$ bestimmt und die drei Beschleunigungen zur Unterstützung der Positionsbestimmung verwendet werden. In Kombination mit einem Magnetkompass ist die Richtungsbestimmung mit Hilfe des Kreisels der IMU bis auf $\pm 1^\circ$ möglich. Die Koppelnavigation ist somit realisierbar, wodurch ein GPS-Ausfall überbrückt werden kann.

4.1 Praktisches Beispiel: Streckenführung im städtischen Bereich

Als praktisches Beispiel für die Simulationsrechnungen wurde eine realistische Streckenführung eines Fußgängers im städtischen Bereich untersucht. Es handelt sich bei dem Testbeispiel um die Führung eines Besuchers der TU Wien von der U-Bahnstation Karlsplatz zu unserem Institutsgebäude und weiter zum Sekretariat unseres Institutes im 3. Stock des Gebäudes Gusshausstraße 27–29, 1040 Wien. Eine realistische Situation soll simuliert werden, wobei durch Bebauungen Abschattungen von GPS-Signalen vorkommen sowie der Einsatz eines Indoor-Positionierungsverfahrens im Gebäude erforderlich wird. Der Fußgänger bewegt sich von der U-Bahnstation zum Institut auf einer ca. 500 m langen Strecke. Die konkrete Aufgabenstellung sieht folgendermaßen aus:

- Die Koppelnavigation wird unabhängig von anderen Positionierungsverfahren immer eingesetzt. Sie besteht aus einem Beschleunigungsmesser zur Schritterkennung, um daraus den zurückgelegten Weg zu berechnen, und der Kombination Kompass/Kreisel für die Richtungsbestimmung.
- Die Höhenbestimmung erfolgt permanent mit einem Barometer, bei Vorliegen anderer Höhenbeobachtungen (GPS bzw. LPS) werden diese mit verarbeitet.
- Zu Beginn sind noch keine Satellitensignale vorhanden, da sich der Fußgänger noch in der U-Bahnstation aufhält. Die absolute Position kann nur mit einem Mobiltelefon bestimmt werden, danach wird ein Übergang auf die GPS-Positionierung vollzogen.
- Kurze GPS-Ausfälle kann es während der Navigation auf der Straße zum Universitätsgebäude geben, die Koppelnavigation übernimmt unterdessen die Lagepositionierung.
- Bei Eintritt in das Universitätsgebäude geht die absolute Positionierung von GPS auf LPS über.

Auf eine planliche Darstellung des Weges von der U-Bahnstation zum Institut wurde aus Gründen der Darstellungsmöglichkeiten in diesem Beitrag verzichtet und es werden im Folgenden nur zwei Problembereiche grafisch dargestellt (siehe Abbildung 1 und 2). Um eine Lageübersicht des Gebietes zu erhalten, sei der interessierte Leser auch auf die on-line Version des Stadtplans der Stadt Wien¹ verwiesen. Die Strecke befindet sich die ersten 30–35 m im abgeschatteten Bereich der U-Bahnsta-

tion Karlsplatz. Eine erste absolute Positionsbestimmung, die nur mit einem Mobiltelefon durchgeführt werden kann, ergibt eine Abweichung von 23 m von der Solltrasse. Danach kann mit Hilfe der Koppelnavigation die Position weiter berechnet werden, allerdings nur relativ zu diesem Ausgangspunkt, wodurch die Qualität der Positionierung nicht verbessert wird. Eine Standardabweichung von der Solltrasse von 23,5 m wird in diesem Abschnitt erreicht. Auf dem freien Platz vor der U-Bahnstation setzt die absolute Positionierung mittels GPS ein und naturgemäß wird die Genauigkeit besser, es ergibt sich eine Standardabweichung von rund 2,3 m während der gesamten GPS-Verfügbarkeit. Dazwischen werden zwei unterschiedlich lange GPS-Ausfälle simuliert, um das Verhalten der Koppelnavigation zu erkunden. Der erste Ausfall erstreckt sich über eine Länge von 27 m, der zweite ist 90 m lang. Beide treten in der Karlsgasse auf, in der die Häuser (maximale Gebäudehöhen von rund 25 m) auf beiden Seiten die Satellitensignale abschatten. Die Ergebnisse zeigen, dass ein leichtes Abdriften von der Solltrasse bei reiner Koppelnavigation stattfindet, jedoch bleibt die maximale Abweichung mit 3,2 m in diesem Abschnitt gering. Die absoluten Positionen sind allerdings von der letzten GPS-Messung abhängig, da danach nur relative Sensoren zum Einsatz kommen. In den letzten 40 m zum Sekretariat des Institutes befindet sich der Fußgänger bereits im Gebäude der Technischen Universität Wien in der Gusshausstraße, wo ein LPS die aktuelle Position bestimmt. Die Standardabweichung von der Solltrasse in diesem Abschnitt beträgt nur rund 0,8 m.

Abbildung 1 zeigt die Positionierung am Anfang der Teststrecke in der U-Bahnstation Karlsplatz und Abbildung 2 den Übergang zw. der GPS-Positionierung in der Karlsgasse und dem Indoor-Positionierungssystem im Institutsgebäude Gusshausstraße 27–29. Wie bereits erwähnt kommt es zu einer sofortigen Korrektur der fehlerhaften absoluten Positionierung beim Vorliegen der ersten GPS Messwerte beim Verlassen der U-Bahnstation (siehe Abb. 1). Hingegen ist beim Übergang von GPS und Koppelnavigation auf LPS beim Eintritt in das Institutsgebäude nahezu kein Sprung in der Positionierung feststellbar (siehe Abb. 2).

Die Höhenbestimmung entlang der gesamten Trasse erfolgt in Abhängigkeit der jeweiligen Verfügbarkeit mittels GPS bzw. LPS und permanent mit einem Barometer. Der tatsächliche Höhenverlauf wurde der Mehrzweckkarte der Stadt Wien entnommen (siehe Abbildung 3). Er beginnt im Bereich der U-Bahnstation Karlsplatz mit einer absoluten Höhe von rund 169 m und steigt am Ende der Trasse aufgrund der Liftfahrt zum Institut in den 3. Stock des Gebäudes Gusshausstraße 27–29 um 13 m an. Weiterhin ist das Ergebnis der Filterung des Höhenverlaufs aus den Messungen aller verfügbaren Senso-

¹ Stadtplan von Wien mit Adressensuche unter <http://www.wien.gv.at/wiengrafik/suche.htm> (Adresse oder Objektbezeichnung: Gusshausstraße 27–29).

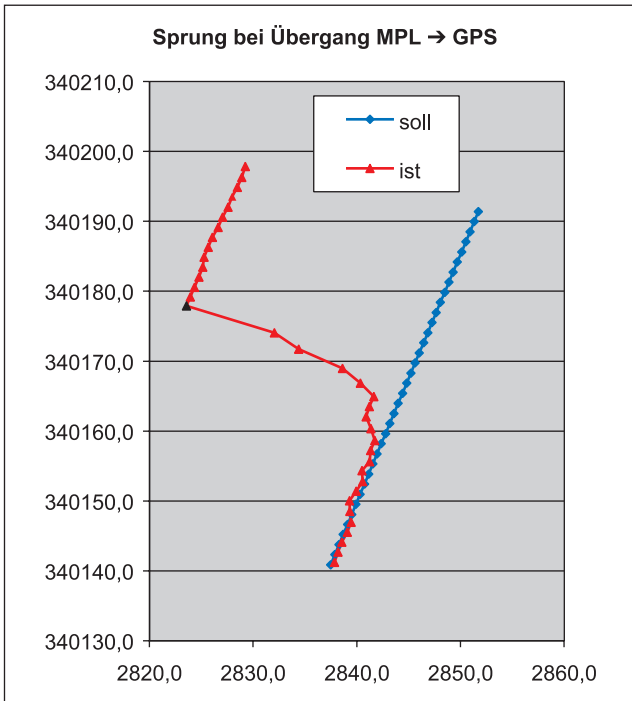


Abb. 1: Positionierung am Anfang der Strecke bei der U-Bahn Station Karlsplatz (Darstellung nicht maßstäblich)

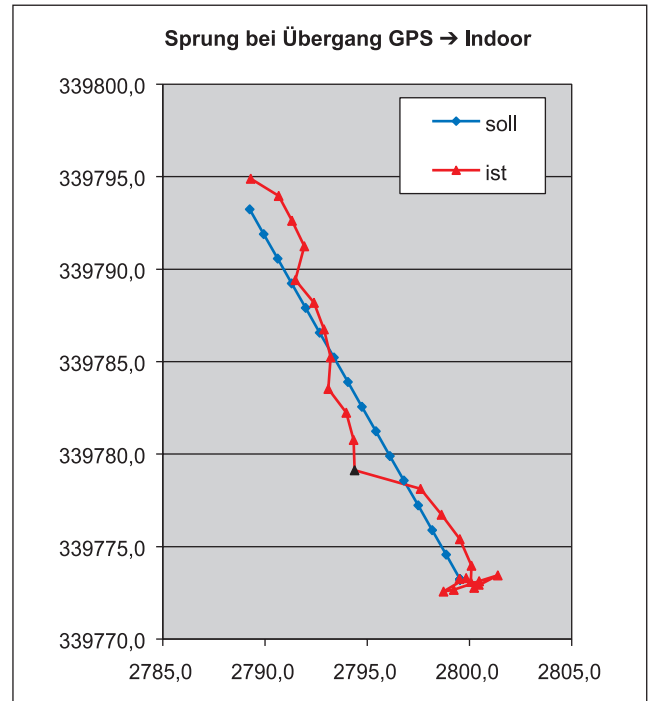


Abb. 2: Positionierung beim Eintritt in das Institutsgebäude (Darstellung nicht maßstäblich)

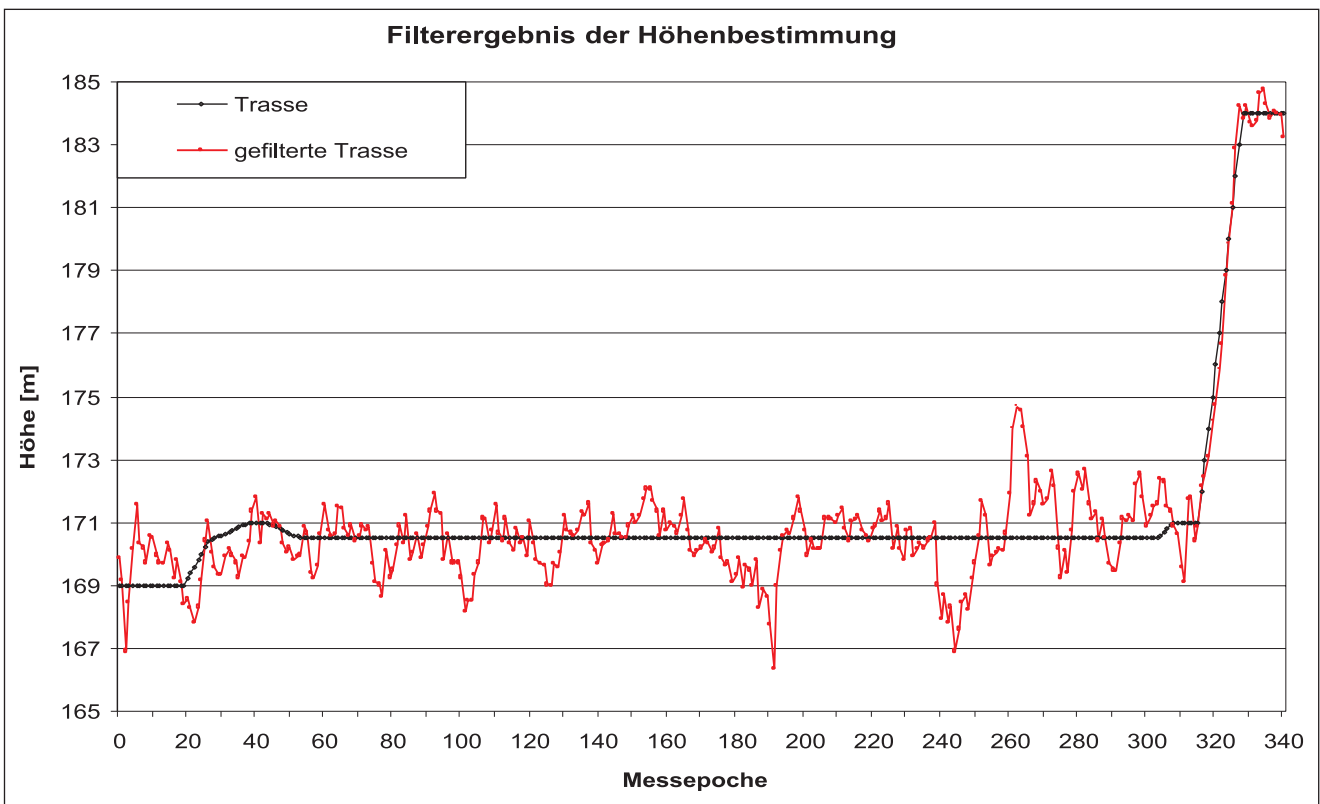


Abb. 3: Filterergebnis der Höhenbestimmung

ren in Abbildung 3 dargestellt. Mit dem Barometer alleine werden Standardabweichungen von ca. 1,8 m erzielt, GPS und Barometer in Kombination erreichen 1,3 m und das LPS in Zusammenarbeit mit dem Drucksensor am Ende der Streckenführung rund 0,7 m.

Zusammenfassend darf festgestellt werden, dass die Navigation zum Institut mit den ausgewählten Sensoren

sehr gut möglich ist, und auf dieser langen Strecke maximale Abweichungen von 3,2 m auftreten. Dabei wurde jedoch die zu Beginn schlechte absolute Positionierung mittels Mobiltelefon nicht berücksichtigt. Die Koppelnavigation erfüllt die Erwartungen und erlaubt somit eine kontinuierliche Positionsbestimmung, obwohl ein längerer Zeitraum nur bedingt überbrückt werden kann und

es zu Genauigkeitsverlusten kommt. Dabei können Strecken ohne einer absoluten Positionsbestimmung mit einer Länge von maximal 150 m mit der Koppelnavigation mit hinreichender Genauigkeit überbrückt werden. Die Höhenbestimmung erreicht mit den gewählten Sensoren eine Standardabweichung von 1,3 m bezüglich der Solltrasse. Hierbei konnten jedoch keine Veränderungen der äußeren Einflüsse auf die barometrische Höhenbestimmung berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen erlauben nun abschließend einen Vorschlag für die Entwicklung eines Prototyps eines Fußgängernavigationssystems aufzustellen. In einem derartigen Prototyp müssen folgende Messsensoren verknüpft werden:

- DGPS-tauglicher Miniaturempfänger (z.B. Garmin GPS 35 oder Trimble GPS Pathfinder Pocket) (Garmin 2002, Trimble 2002),
- Mobile Einheit eines Local Positioning System (z.B. HF LPS 007 der Firma SypTech Corporation) (Sypniewski 2002),
- Beliebige GSM-Mobilfunktelefon (oder zukünftig UMTS Handset) mit vorhandener Hard- und Software zum Auslesen der Messdaten,
- Barometer bzw. Altimeter (z.B. Barometric Pressure Sensor der Fa. Campbell Scientific Inc. oder Precision Barometer/Altimeter der Fa. NovaLynx Corp.) (Campbell 2002, Novalynx 2002),
- Digitaler magnetische Kompass (z.B. Leica DMC-SX) (Leica 2002) und
- Inertiale Messeinheit IMU (z.B. Crossbow IMU 600CA oder IMU 700CA-200) (Crossbow 2002).

Beim Einsatz eines Multisensorsystems mit diesen Komponenten können die zuvor angegebenen hohen Genauigkeiten für die Positionierung in Lage und Höhe erreicht werden. Ein Nachteil ist aber der erhebliche Anschaffungspreis des kompletten Systems. Dieser liegt in der Größenordnung von 30.000 bis 40.000 €, wobei die inertielle Messeinheit ungefähr die Hälfte dieses Betrages ausmacht und für die Positionierung in Gebäuden das Vorhandensein der Infrastruktur für ein LPS vorausgesetzt wurde. Das komplette System ist somit nicht kostengünstig, aber es sollte in dieser Studie gezeigt werden, welche Genauigkeiten in der Positionierung mit den zur Zeit verfügbaren Sensoren erreicht werden können. Bei der Zusammenstellung des Systems wurde auch auf die Bereitstellung entsprechend genauer Höhenangaben geachtet, damit bei der Positionierung des Nutzers auch eine eindeutige Zuordnung auf ein bestimmtes Stockwerk in einem Gebäude möglich wird. Werden geringere Positionierungsgenauigkeiten gefordert, kann auf einzelne Komponenten, wie zum Beispiel das INS oder LPS, verzichtet werden.

Bei der Integration der Sensoren in einem Multisensorsystem ist die eindeutige Zuordnung der Signale von entscheidender Bedeutung. Dazu müssen für die ver-

schiedenen Messgrößen zwei Voraussetzungen erfüllt sein: Zum einen muss eine zeitliche Zuordnung (Synchronisation) aller Messgrößen zueinander erfolgen, und zum anderen muss eine räumliche geometrische Zuordnung der Messgrößen möglich sein. Die Synchronisation der Sensoren muss natürlich in Echtzeit erfolgen, was zum Beispiel über das PPS-Signal von GPS erfolgen kann. Neben der zeitlichen Zuordnung der Messwerte müssen die einzelnen Sensoren auch lagemäßig zueinander erfasst werden, wobei ein definierter Nullpunkt der Zuweisung dienen kann. Bei starrer Verbindung der einzelnen Messgeräte müssen diese Größen nur einmal bestimmt werden. Diese Vorgangsweise ist zu bevorzugen, um einen möglichst flexiblen Einsatz des Geräts zu gewährleisten.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchung von Messsensoren, die sich für einen Einsatz in einem Navigationssystem für Fußgänger eignen würden, ergab anhand von Simulationsrechnungen folgendes Ergebnis:

- Die Koppelnavigation mit Pedometer und Richtungsbestimmung über Kompass und Kreisel erlaubt eine durchgehende relative Positionsbestimmung mit einer Standardabweichung von ± 2 m.
- Das Barometer kann jederzeit für eine Bestimmung der Höhe mit einer Genauigkeit von ca. $\pm 1,5$ m eingesetzt werden.

Daraus ergeben sich folgende Modi für die kontinuierliche 3D-Positionierung:

- Die reine relative Positionierung mit den oben genannten Sensoren ausgehend von einer Startposition,
- die absolute Lagebestimmung mit einem Mobilfunktelefon (im GSM-Netz noch zu ungenau, jedoch mit UMTS bereits genau genug) in Kombination mit Koppelnavigation und Barometer,
- der Einsatz von GPS, DGPS und Geschwindigkeitsbeobachtungen aus GPS, was zu einer erheblichen Verbesserung der Genauigkeit und einer Erhöhung der Zuverlässigkeit der Positionsbestimmung führt, und
- der Einsatz eines Indoor-Positionierungssystems, welches auch eine hochgenaue Positionierung in Gebäuden gewährleistet.

Anhand eines anschaulichen Beispiels wurde der Einsatz von verschiedenen Sensoren geprüft und die erzielbaren Genauigkeiten bestätigt. Dabei ist die Positionsbestimmung eines Fußgängers auf einer 500 m langen Strecke mit einer maximalen Abweichung von der Solltrasse von nur 3,2 m, mit Ausnahme einer ungenauen absoluten Positionsbestimmung mittels GSM-Mobilfunktelefon zu Beginn der Führung, bestimmt worden. Diese beachtlichen Ergebnisse lassen den Einsatz eines derartigen Multisen-

sorsystems zur Navigation von Fußgängern als sehr realistisch erscheinen. In Zukunft könnte durch einen noch weiter verbesserten Filteralgorithmus und durch den Einsatz von modernen Sensoren eine zusätzliche Verbesserung erreicht werden. Der große Nachteil eines derartigen Systems liegt heutzutage noch in der Höhe der Anschaffungskosten, da die Sensorkomponenten noch sehr kostspielig sind. Ein Anwendungsbereich, bei dem höchste Ansprüche an die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Systems gestellt werden, ist beispielsweise die Führung von sehbehinderten Personen, wo der Anschaffungspreis kein Hinderungsgrund für einen Einsatz sein sollte, um diesen Personen eine bedeutende Erleichterung in ihrem Leben zu ermöglichen. Für zukünftige Masseneinsätze in einem vielfältigen Anwendungsspektrum (z. B. Führung von Touristen, Ortsbezogene Dienste, usw.) müssen preiswertere Sensoren entwickelt und verwendet werden. Die Zukunftsaussichten derartiger Systeme sind jedoch unbestritten und es ist zu erwarten, dass eine rasante Entwicklung von Systemen zur Führung und Navigation von Fußgängern, ähnlich wie es bei der Entwicklung von Autonavigationssystemen der Fall war, einsetzen wird.

Literatur

- Bäumker, M., Fitzen, H.P.: Kinematic Positioning with Combined Inertial and GPS Measurements. in: Linkwitz, K.; Hangleitner, U. (eds.): High Precision Navigation 1995, Proc. of the 3rd Symposium on Satellite Navigation, University Stuttgart, S. 221–231, 1995.
- Campbell, J.: CS105 Barometric Pressure Sensor, Product Information, Campbell Scientific Inc., USA, 2002, <http://www.campbellsci.com/baropres.html> (Letzter Zugriff: August 2002).
- CGALIES: Co-ordination Group on Access to Location Information by Emergency Services. Work Package 1 Report, 2002, <http://www.telematica.de/cgalies/> (Letzter Zugriff: August 2002).
- Crossbow: Inertial and Gyro Systems, Product Guide, Crossbow, USA, 2002, http://www.xbow.com/Products/Inertial_Systems.htm, siehe auch CMT GmbH, Deutschland, <http://www.cmt-gmbh.de> (Letzter Zugriff: August 2002).
- Dodson, A. H., Moon, G. V., Moore, T.: A Navigation System for the Blind Pedestrian. in: Proceedings of GNSS 99, 3rd European Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Genoa, Italy, S. 513–518, 1999.
- Garmin: Garmin GPS Products, Garmin Ltd., USA, 2002, <http://www.garmin.com/products/> (Letzter Zugriff: August 2002).
- Hein, G., Eissfeller, B., Ögler, V., Winkel, J.O.: Synergies between Satellite Navigation and Location Services of Terrestrial Mobile Communication. in: Papers presented at ION GPS Meeting 2000, Salt Lake City, Utah, U.S.A., 19.–22. September, 2000.
- Helal, A. S., Moore, S. E., Ramachandran, B.: Drishti: An Integrated Navigation System for Visually Impaired and Disabled., in: Proc. of the Fifth International Symposium on Wearable Computers, S. 149–156, 2001.
- Hightower, J., Borriello, G.: A Survey and Taxonomy of Location Systems for Ubiquitous Computing. Technical Report, University of Washington, Department of Computer Science and Engineering, Seattle, USA., 2001, <http://www.cs.washington.edu/homes/jeffro/pubs/hightower2001survey/hightower2001survey.pdf> (Letzter Zugriff: August 2002).
- Jekeli, Ch.: Inertial Navigation Systems with Geodetic Applications. De Gruyter Verlag, Berlin, New York, 2001.
- Jirawimut, R., Ptasincki, P., Garaj, V., Cecelja, F., Balachandran, W.: A Method for Dead Reckoning Parameter Correction in Pedestrian Navigation System. in: Proc. of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Budapest, Hungary, S. 1554–1558, 2001.
- Jordan, W., Eggert, O., Kneissl, M.: Handbuch der Vermessungskunde, Bd. III, Höhenmessung und Tachymetrie. Metzelsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1956.
- Kahmen, H.: Vermessungskunde. De Gruyter Verlag, Berlin, New York, 19. Auflage, 1997.
- Kees, N.: Kraftfahrzeugsensoren zur Eigengeschwindigkeitsmessung, Navigation und Fahrbahnzustandserkennung. Dissertation, TU München, 1995.
- Krakiwsky, E. J.: GPS and Vehicle Location and Navigation. GPS World, Mai, S. 50–53, 1991.
- Leica: Leica DMC-SX: Digital Magnetic Compass and Vertical Angle Sensor. Produktinformation, Leica Geosystems, Switzerland, 2002, http://www.leica-geosystems.com/dk/produkt/kikkerter/dmc_oem.htm (Letzter Zugriff: August 2002).
- Lola (Local Location Assistant): Produktbeschreibung des mobilen Stadtführers Lol@, Institut für Kartographie und Geo-Medientechnik, 2002, <http://linserv1.ikr.tuwien.ac.at/forschung/lola/Navigation.html> (Letzter Zugriff: August 2002).
- Magenschwab, G.: Der Mobilguide der Mobilkom Austria als Beispiel eines LBS – Konzepte, bisherige Erfahrungen, zukünftige Entwicklungen. in: Kelnhofer, F., Lechthaler, M., Brunner, K. (eds.): Geowissenschaftliche Mitteilungen, Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessungswesen und Geoinformation, TU Wien, Heft 58, S. 155–161, 2002.
- MERL: Produktbeschreibung des Local Positioning System MERL. Mitsubishi Electric Research Laboratories, Cambridge, U.S.A., 2002, <http://www.merl.com> (Letzter Zugriff: August 2002).
- MoBIC: Das MoBIC (»Mobility of Blind and Elderly People Interacting with Computers«) Project, Institut für Simulation und Graphik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg; 2002, <http://simsrv.cs.uni-magdeburg.de/projects/mobic/mobicde.html> (Letzter Zugriff: August 2002).
- Mobilkom: Produktbeschreibung des A1-Mobilguide, Mobilkom Austria AG & Co KG, Wien, Österreich, 2002, <http://www.mobilkom.at> (Letzter Zugriff: August 2002).
- Novalynx: Portable Precision Barometer/Altimeter. Product Information, Novalynx Corporation, USA, 2002, <http://www.novalynx.com/products.html> (Letzter Zugriff: August 2002).
- Petrie, H., Johnson, V., Strothotte, T., Raab, A., Fritz, S., Michel, R.: MOBIC: Designing a Travel Aid for Blind and Elderly People. Journal of Navigation, Royal Institute of Navigation, Volume 49(1), London, S. 45–52, 1996.
- Reinhardt, W., Sayda, F., Wittmann, E.: Location Based Services für Bergsteiger und Wanderer – erste Erfahrungen mit VISPA. in: Kelnhofer, F., Lechthaler, M., Brunner, K. (eds.): Geowissenschaftliche Mitteilungen, Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessungswesen und Geoinformation, TU Wien, Heft 58, S. 163–169, 2002.
- Retscher, G.: Diskussion der Leistungsmerkmale von Systemen zur Positionsbestimmung mit Mobiltelefonen als Basis für Location Based Services (LBS). in: Kelnhofer, F., Lechthaler, M., Brunner, K. (eds.): Geowissenschaftliche Mitteilungen, Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessungswesen und Geoinformation, TU Wien, Heft 58, S. 41–58, 2002.
- Skolaut, G.: Untersuchung von Messensoren zum Einsatz in Navigationssystemen für Fußgänger. Diplomarbeit, Abteilung Angewandte Geodäsie und Ingenieurgeodäsie, TU Wien, 2002.
- Stokes, V.P., Andersson, C., Forssberg, H.: Rotational and Translational Movement Features of the Pelvis and Thorax during Adult Human Locomotion. Biomechanics Journal, Heft 22, Nr. 1, S. 43–50, 1989.
- Szyniewski, J.: HF Local Positioning System LP 007 – A new Concept of Tracking Equipment, 2002, <http://www.syptech.com/publications/publications.html> (Letzter Zugriff: August 2002).
- Talkenberg, H.: Ein Beitrag zur Koppelortung für Fußgänger. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik der TU Braunschweig, Shaker Verlag, Aachen, 1999.
- T-Mobile: Produktinformation zu Mobiltelefon-Diensten. T-Mobile Austria, Wien, Österreich, 2002, <http://www.t-mobile.at> (Letzter Zugriff: August 2002).
- Trimble: GPS Pathfinder Pocket. Product Information, Trimble Ltd., USA, 2002, <http://www.trimble.com/pathfinderpocket.html> (Letzter Zugriff: August 2002).
- USWC: Location Pattern Matching and the Radio Camera™ Network. Product Information, U.S. Wireless Corporation, USA, 2002, <http://www.uswcorp.com/> (Letzter Zugriff: August 2002).
- Zhao, Y.: Vehicle Location and Navigation Systems. Intelligent Transportation Systems, Artech House Inc., Boston, London, 1997.

Anschrift der Autoren

Ass.-Prof. Dr.-Ing. Günther Retscher

Dipl.-Ing. Georg Skolaut

Institut für Geodäsie und Geophysik

Abteilung Angewandte Geodäsie und Ingenieurgeodäsie

Technische Universität Wien

Gusshausstraße 27–29, A-1040 Wien, Österreich

gretsch@pop.tuwien.ac.at

georg.skolaut@gmx.at