

Marc Schelewsky

Zusammenfassung

Es werden der Forschungsstand sowie der Stand der Technik im Hinblick auf die Potenziale der automatischen Wegeerfassung zusammengefasst. Im Fokus stehen dabei vor allem die großen Haushaltssurveys aus den Vereinigten Staaten zu Beginn der 2000er-Jahre sowie weitere Arbeiten zu Methoden der Nutzung von GPS für die Verkehrsforschung. Jedes der traditionellen Lokalisierungsverfahren besitzt dabei Defizite, die auf die technische Konzeption und infrastrukturellen Grundlagen zurückgeführt werden können. Über Smartphone-Tracking kann hingegen über mehrere Tage hinweg bei der Wegeerfassung durchaus eine so hohe Datengenauigkeit erreicht werden, dass es als innovatives Tool für Verkehrsplanung und Mobilitätsforschung große Erwartungen hervorruft.

2.1 Einleitung

Der Verkehrsteilnehmer ist nur sehr schwer zu beobachten. Wenig wissen wir darüber, wie er sich fortbewegt, noch weniger, warum. Er ist ein unbekanntes Subjekt, soweit besteht Konsens. Aktuelle Fragen zu Veränderungen von Verkehr und Mobilität können so nur unzureichend beantwortet werden. Diese betreffen die Mobilitätsbeteiligung, die Aktivitäts-, Reise- und Wegehäufigkeiten, die zurückgelegten Distanzen und deren Verteilung auf die Verkehrsmittel, die ursächlichen Aktivitäten, deren räumliche und zeitliche Verteilung und die sich daraus ableitenden Routinen (vgl. Scheiner 2007, S. 690). Besondere Herausforderungen bestehen auch bei der Analyse von Veränderungen des Verkehrsverhaltens aufgrund neuer Angebotsformen und den daraus erwachsenden Mobilitätsmus-

M. Schelewsky (✉)
InnoZ GmbH, Torgauer Str. 12–15, 10829 Berlin, Deutschland
E-Mail: Marc.schelewsky@innoz.de

tern. Die zu beobachtenden Effekte verlieren sich im Grundrauschen der Daten, die oft im Nachhinein und auf Grundlage subjektiver Einschätzungen erhoben werden.

Dabei sind genau diese Fragen von hoher Aktualität. Ein Blick auf die Straßen großer Städte offenbart das bunte Bild einer neuen Mobilität, die nicht mehr vom privaten Automobil und dem klassischen ÖPNV dominiert wird, sondern alle möglichen Verkehrsmittel mit variierenden Nutzungsmöglichkeiten miteinbezieht. Neben der zunehmenden Nutzung von Fahrrad und Motorroller lassen sich auch Fahrzeuge mit neuen Antriebstechnologien beobachten, die wiederum zu innovativen Angebotsformen führen. Die Spanne reicht von klassischen stationsgebundenen Carsharing- und Leihfahrradangeboten über flexibles Carsharing mit Elektromotor bis hin zum Peer-2-Peer-Carsharing. Auch Pedelecs, privat oder gewerblich betrieben, erfreuen sich zunehmender Beliebtheit. Die Nutzungsformen passen sich dieser Vielfalt an. Die Kombination mehrerer Verkehrsmittel auf einem Weg oder die Wahl unterschiedlicher Angebote je nach Wegezweck gehören inzwischen für viele Stadtbewohner zur gewohnten Praxis. Bei gutem Wetter nimmt man das Fahrrad, bei Regen steigt man in den Bus. Möchte man auf dem Weg nach Hause noch einen Einkauf erledigen, dann springt man in das nächste Carsharing-Fahrzeug, das oft nur ein paar Schritte entfernt steht. Allein in Berlin hat sich die Flotte der Fahrzeuge, die im *free-float-Modus*, also stationsungebunden, betrieben werden, in den letzten drei Jahren auf 2.350 erhöht. Intermodalität und Multimodalität lauten die Stichwörter zur Beschreibung dieser neuen, flexiblen, urbanen Mobilität.

Will man nun wissen, wie sich durch die neue angebotsseitige Vielfalt das Nachfrage- und Nutzungsverhalten der Verkehrsteilnehmer verändert, stößt man mit traditionellen Erhebungsmethoden wie Wegetagebücher oder Interviews zunehmend an die Grenzen der Erfassbarkeit neuer und komplexer Formen individueller Mobilität. Bei Rekonstruktion ex post wird vieles vergessen, unterlassen oder ungenau beantwortet. Dazu tragen Rundungen bei Angaben zu Länge und Dauer eines Weges ebenso bei wie die zunehmende Antwortmüdigkeit bei längeren Untersuchungszeiträumen, d. h. Wege werden nur noch selektiv oder gar nicht mehr aufgezeichnet. Hinzu treten Effekte der sozialen Erwünschtheit und systematische Fehler, die sich zum einen in einer Überschätzung der Distanzen bei Fahrrad- und Fußwegen ausdrücken und zum anderen durch das Vergessen von kurzen Wegen. Häufig werden diese gar nicht als ein Weg wahrgenommen, den es aufzuzeichnen gilt, denn um korrekte und vergleichbare Angaben machen zu können, muss der Befragte immer auch mit der zugrunde gelegten Definition von „Weg“ und „Etappe“ vertraut sein. Dieses in der Literatur als Underreporting bezeichnete Phänomen bei der Erfassung des Verkehrsverhaltens mit Wegetagebüchern ist bereits in zahlreichen Studien untersucht und beschrieben worden (vgl. u. a. Bricka 2008; Bricka und Bhat 2006a, b; Krygsman und Nel 2009; Ong 2009; Schüssler und Axhausen 2008).

Dabei scheint die Lösung denkbar einfach. Smartphones sind inzwischen in der Gesellschaft weit verbreitet. Nach Angaben von Bitkom hatten 2012 nahezu 50 % der Deutschen ein Smartphone – Tendenz weiter steigend. Besonders bei den jüngeren Altersgruppen liegt die Penetrationsrate bei fast 100 %. Ausgestattet mit vielfältiger Sensorik – Gyroskop, Accelerometer, GPS-Sensor und Kompass gehören mittlerweile zur Grundausrüstung –

sind sie in der Lage, alle erforderlichen Daten und Informationen zu erfassen, die zur Rekonstruktion des Verkehrs- und Mobilitätsverhaltens erforderlich sind. Neben Schlüssel und Portemonnaie ist das Smartphone zum alltäglichen Begleiter außerhäuslicher Aktivitäten geworden. Der Umgang mit diesem technischen Gerät ist dem Besitzer vertraut und stellt für ihn keine große Herausforderung dar. Um es für die Verkehrsforschung zu ertüchtigen, reichen kleine Programme (*Apps*), die sich in Sekundenschnelle aus den anbieterspezifischen *App-Stores* auf dem Endgerät installieren lassen. Das Programmieren dieser Apps lässt sich einfach über die jeweiligen Entwicklungsumgebungen realisieren, den sogenannten *SDKs* (*System Development Kit*). Die Bedienoberfläche kann damit ohne größere Aufwände den untersuchungsspezifischen Anforderungen angepasst werden. Der Energieverbrauch durch die Nutzung der Sensorik ist ein häufig diskutiertes Phänomen bei der Nutzung von Smartphones als Erhebungsinstrument, bereitet inzwischen jedoch weniger Grund zur Sorge, denn nicht nur die Leistungsfähigkeit der Akkus ist gestiegen, auch achtet der Nutzer selbst auf den Ladestand, um weiterhin kommunizieren oder mobil surfen zu können.

Die Prämisse für die Nutzung von Smartphones als Erhebungsinstrument besteht darin, dass die Position des Smartphones als identisch mit der Position des Probanden angenommen wird, er es also auf allen Wegen stets bei sich trägt. Wird das Smartphone ausgeschaltet oder nicht mit sich geführt, werden lücken- oder fehlerhafte Daten ermittelt. Letztlich bildet das Smartphone nur die Schnittstelle zum Nutzer bzw. Probanden und dient zunächst nur der kontinuierlichen Erfassung der Positionsdaten. An deren Prozessierung ist das Smartphone – wenn überhaupt – nur in einem geringen Umfang beteiligt. Dafür ist ein Backend-System erforderlich, auf dem die ermittelten Daten gesammelt, aufbereitet und sinnvoll interpretiert werden. Dort kann die Intelligenz des Systems verortet werden, mit der aus den bloßen Wegepunkten (*Trackingpoints*), bestehend aus Geokordinaten und Zeitstempel und ggf. zusätzlichen Parametern zur Güte der erhobenen Daten, auf die genutzten Verkehrsmittel geschlossen werden soll. Dazu lassen sich in der Literatur unterschiedliche Verfahren finden.¹ Gemeinsam ist diesen Ansätzen, dass zunächst eine Filterung plausibler Daten stattfindet (*data cleaning, data smoothing*), bevor zwischen Aufenthaltsorten und Wegen (*Tracks*) unterschieden wird. Anschließend wird über Algorithmen nach bestimmten Charakteristiken in den Daten gesucht, die typisch sind für die Nutzung bestimmter Verkehrsmittel (*trip/mode detection*). So lässt sich z. B. eine Fahrt in einem Fernverkehrszug durch die hohe Durchschnittsgeschwindigkeit, den Verlauf der *Tracks* entlang der Trassen und den Aufenthalt an vordefinierten Bahnhöfen identifizieren. Solche Heuristiken lassen sich für nahezu alle Verkehrsmittel entwickeln. Werden sie durch Daten der Inertialsensorik oder um externe Datenquellen ergänzt, lassen sich die Möglichkeiten der Modusidentifizierung weiter verbessern.²

¹ Ein guter Überblick über die unterschiedlichen Ansätze und Algorithmisierungen findet sich in Schüssler und Axhausen (2008).

² Angaben zu korrekt identifizierten Modi variieren in der Literatur von 70 % (Bohte und Maat 2008) bis hin zu 91,7 % (Chung und Shalaby 2005). Diese Studien basieren allerdings ausschließlich auf der

Zur Validierung der erhobenen und prozessierten Daten können die Probanden während der Erhebung aktiv nach den genutzten Verkehrsmitteln oder Wegezwecken mittels Smartphone befragt werden. Auf den großen Touchdisplays lassen sich Fragebögen und Wegetagebücher einfach und nutzerfreundlich hinterlegen. Dagegen verzichtet der passive Ansatz auf die Interaktion des Probanden mit dem Endgerät und stützt sich in den Analysen nur auf die passiv im Hintergrund erhobenen Daten der internen Sensoren. Hierbei wird den Nutzern häufig im Nachhinein das aufbereitete Ergebnis über eine Website zur Verfügung gestellt. Sowohl bei aktiven als auch bei passiven Untersuchungsdesigns stützen sich die wesentlichen technischen Verfahren zur Lokalisierung auf GPS, WLAN oder auf Mobilfunktechnologien wie GSM.

Wie diese Technologien im Grundsatz funktionieren und welche Herausforderungen sich aufgrund diverser Restriktionen für den Einsatz als Erhebungsinstrument ergeben, wird in Abschn. 2.2 beschrieben. In Abschn. 2.3 folgt eine Übersicht über die relevanten Studien, in denen moderne Lokalisierungstechnologien zum Einsatz kamen, und es wird aufgeführt, welche Erfahrungen dabei gesammelt wurden. Im Fokus steht dabei vor allem der Einsatz von GPS. Dabei werden auch die unterschiedlichen methodischen Ansätze beleuchtet und diskutiert. Nach dieser einleitenden Bestandsaufnahme und einem Resümee wird abschließend der vorliegende Beitragsband in Struktur und Inhalt vorgestellt.

2.2 Verfahren der technikgestützten Positionsbestimmung

2.2.1 Satellitengestützte Verfahren

Die ersten Studien, in denen zur Untersuchung des Verkehrsverhaltens Lokalisierungstechnologien zum Einsatz kamen, nutzten das satellitengestützte Global Positioning System (GPS), das seit 2000 auch zivilen Einsatzbereichen zur Verfügung steht. Zuvor war es vornehmlich für der militärischen Nutzung vorbehalten. In diesen Studien wurden zunächst eigens für diesen Zweck konstruierte Datenerfassungsgeräte eingesetzt, sogenannte *Datenlogger*. Reine smartphonegestützte Erhebungen finden sich bis heute fast ausschließlich als Pilotstudien mit explorativem Charakter und sind bislang noch nicht in größerem Umfang unter Realbedingungen getestet worden.

Die korrekte Bezeichnung des gängigen GPS lautet *NAVSTAR GPS* und ist nur ein System im Bereich satellitengestützter Lokalisierungsverfahren.³ Es umfasst 24 Satelliten, die

Analyse von GPS-Daten.

³ NAVSTAR GPS steht für „NAVigation System with Time And Ranging Global Positioning System“. Der Oberbegriff satellitengestützter Verfahren lautet GNSS (Global Navigation Satellite System). Neben GPS existieren einige globale oder regional ergänzende Systeme wie das russische GLONASS oder das chinesische Compass. In Europa befindet sich das gemeinsam von der EU und der europäischen Raumfahrtbehörde ESA entwickelte System Galileo seit 2006 im Aufbau und wird voraussichtlich im Jahr 2014/2015 erste Dienste anbieten (BMVBS 2013).

die Erde in einer Höhe von etwa 20.200 m so umkreisen, dass zu jeder Zeit und von jeder Position auf der Erdoberfläche mindestens vier davon sichtbar sind. Das ermöglicht unterschiedliche Verfahren der Positionsbestimmung, wobei das einfachste und für Navigationsgeräte häufig genutzte auf dem Prinzip des mehrfachen Bogenschlags basiert: Die von den Satelliten gesendeten GPS-Signale erlauben es den auf der Erdoberfläche befindlichen Empfängern, sowohl die Position des Satelliten als auch die Entfernung zwischen Empfänger und Satellit zu bestimmen. Stellt man sich nun vor, dass jeder der Satelliten von einer Kugel umgeben wird, deren Mittelpunkt der Satellit ist und deren Radius von der Entfernung des Empfängers zum Satelliten gebildet wird, lässt sich die Position des Empfängers aus dem Schnittpunkt der Kugeln errechnen.⁴ Dieses Verfahren ist passiv, d. h. es ist keine Datenbankabfrage erforderlich, um die Geokoordinate des Empfängers zu bestimmen. Die Nutzung dieses Verfahrens bringt somit den Vorteil mit sich, dass zunächst nur der Empfänger weiß, wo er sich befindet, und diese Daten zur Positionsbestimmung nicht kommuniziert werden müssen. Das bedeutet auch, die Positionsbestimmung geschieht unabhängig von einem Netzzugang bzw. einer externen Datenbankabfrage, wie es bei anderen Lokalisierungsverfahren erforderlich ist.

Der Nachteil dieses Verfahrens besteht in der Ungenauigkeit und Fehleranfälligkeit, die durch verschiedene Einflussvariablen ausgelöst werden können (vgl. dazu Jun et al. 2007). Unter schlechten Bedingungen können dadurch Abweichungen von mehreren 100 m gegenüber der tatsächlichen Position auftreten. Im besten Fall liegt die Lokalisierungsgenauigkeit zwischen drei und zehn Metern. Die Fehlerursachen bei der Positionsbestimmung mit GPS lassen sich in zufällige und systematische Ursachen unterscheiden. Dazu zählen Messfehler, die von fehlerhaften GPS-Empfängern verursacht werden, künstlich erzeugte Fehlerquellen, wie die sogenannte *Selective Availability (S/A)*,⁵ aber auch Abweichungen, die aufgrund von Umgebungseinflüssen auftreten, z. B. atmosphärische Effekte. Bei der Positionsbestimmung wird die Geschwindigkeit des gesendeten Signals als konstant angenommen. Vom Sender (Satellit) zum Empfänger durchläuft das GPS-Signal jedoch verschiedene Schichten der Atmosphäre (Ionosphäre, Troposphäre) und wird dabei mehrfach gebrochen, vergleichbar mit Licht, das auf einen Glaskörper trifft. Diese Verzerrungen sind umso größer, je näher der Satellit über dem Horizont sichtbar, also je kleiner dessen Höhenwinkel (*Elevation*) wird.

Trifft das GPS-Signal auf die Erdoberfläche, so sind, besonders bei einfachen GPS-Empfängern, sogenannte *Mehrwegeeffekte (multi path errors)* eine häufige Fehlerursache. Dabei trifft das Signal nicht direkt auf den Empfänger, sondern wird von einer Hauswand oder einer anderen Fläche reflektiert. Dadurch verlängert sich die Laufzeit des Signals, und die Position wird falsch errechnet. Diese Fehlerursache tritt besonders häufig

⁴ Genauere Darstellungen der Funktionsweise von GPS und GNSS in verständlicher Form finden sich z. B. in Bauer (2011), Xu (2003) oder Zogg (2009).

⁵ Die *Selective Availability* ist eine künstliche Ungenauigkeit, die aus militärischen Überlegungen etwa bis zum Jahr 2000 aktiv war und danach abgeschaltet wurde.

in Städten mit hoher oder besonders dichter Bebauung auf, wenn der Blick auf den freien Himmel eingeschränkt wird.

Neben den Fehlerquellen bei der Signalübertragung vom Sender zum Empfänger beeinflusst die Position der Satelliten (*Satellitengeometrie*) die Genauigkeit der Positionsbestimmung erheblich. Stehen die Satelliten aus Sicht des Empfängers zu dicht beieinander oder ist der Höhenwinkel sehr gering (unter 15 Grad), lässt sich die Position nur noch ungenau bestimmen. Mit dem *DOP* (*Delusion of Precision*) wird ein Wert ermittelt, der die Güte der Positionsbestimmung angibt. Dabei kann die Güte in vertikaler (*VDOP*) und horizontaler (*HDOP*) Position und im Raum (*PDOP*) ermittelt werden. Der *GDOP-Wert* (*geometrischer DOP*) kombiniert die Fehlermessung über die drei Dimensionen und berechnet auch zeitliche Fehler mit ein. Damit ist er der genaueste Wert für die Gütebestimmung einer Positionsmessung. Von einer hinreichend genauen Messung spricht man, wenn der *GDOP-Wert* acht oder weniger beträgt.

Kleinere Verzerrungen entstehen zusätzlich durch Gravitationskräfte, die auf die Satelliten wirken und diese minimal aus ihrer Umlaufbahn bringen. Diese Abweichungen liegen aber nur im Bereich von bis zu zwei Metern und sind zu vernachlässigen, ebenso die Möglichkeit, dass die Atomuhren in den Satelliten, mit denen das Signal kodiert wird, fehlerhaft sind. Die Satelliten werden im Kontrollzentrum in Colorado Springs kontinuierlich überwacht, um diese Fehlerursache auszuschließen.

Jeder GPS-Satellit sendet ein Signal mit Informationen über seine aktuelle Position, die genaue Uhrzeit und Datum, eine Identifikationsnummer sowie Informationen zu Bahnverlauf, Zustand und ggf. Korrekturinformationen. Zusätzlich werden Informationen zu den Bahndaten aller Satelliten – sogenannte *Almanach-Daten* – übermittelt, um Vorhersagen über den Verlauf der Satelliten treffen zu können bzw. zu prognostizieren, wann von einer bestimmten Position auf der Erde welche Satelliten sichtbar sind. Wird ein GPS-Empfänger zum ersten Mal aktiviert, war er länger als sechs Stunden ausgeschaltet oder wurde er mehr als 300 km von seiner zuletzt ermittelten Position entfernt, müssen diese Daten nachgeladen werden, da sonst keine Positionsbestimmung möglich ist. Dieser Vorgang wird als „*Cold Start*“ bezeichnet und kann bis zu zwölf Minuten dauern. Sind seit der letzten Positionsbestimmung zwischen zwei und sechs Stunden vergangen, so sind in der Regel der Almanach und die benötigte Uhrzeit noch aktuell, aber die Positionen der Satelliten (*Ephemeridendaten*) fehlen und müssen nachgeladen werden. Dieser sogenannte „*Warm Start*“ kann bis zu 45 s dauern. Ist der Empfänger nur kurzzeitig ausgeschaltet, spricht man von einer *Wiedererfassung*, die maximal 15 s dauert (vgl. Kowoma 2012). Um diese Wartezeiten zu verkürzen, werden beim *Assisted GPS (AGPS)* die zu erwartenden Positionsdaten der Satelliten über GSM oder WLAN bereitgestellt. Dadurch lassen sich die Warm-Start- und Cold-Start-Effekte reduzieren.

Neben den satellitengestützten Systemen gibt es weitere technische Verfahren zur Positionsbestimmung, die auf bodengebundene Infrastrukturen zurückgreifen.

2.2.2 Positionsbestimmung über Funkzellen

Durch den intensiven Ausbau der Mobilfunknetze sind diese inzwischen überall verfügbar, sodass auch die darauf basierende *Funkzellenortung* (auch *Zellortung* oder *GSM-Ortung*) flächendeckend gewährleistet ist. Grundlage hierfür ist die Identifizierung der *Cell IDs* des GSM-, UMTS- oder inzwischen auch LTE-Funknetzes.⁶ Anders als bei satellitengestützten Verfahren ermöglicht die Funkzellenortung eine Lokalisierung auch in geschlossenen Gebäuden. Der Nachteil besteht aber vor allem in der großen Varianz der Lokalisierungs-genauigkeit. Da die Lokalisierungs-genauigkeit von der Größe der Funkzellen abhängt und diese sich in ländlichen Gegenden zum Teil mit einem Radius von über 35 km ausdehnen, kann eine Lokalisierung mitunter nur auf 100 m genau erfolgen (vgl. Varshavsky et al. 2006). In städtischen Räumen können damit aber bereits recht gute Ergebnisse erzielt werden, doch auch hier lassen sich in bestimmten Fällen sehr große Abweichungen vom tatsächlichen Aufenthaltsort verzeichnen, wenn sich die Positionsbestimmung auf eine Basisstation (*Base Transceiver Station*, *BTS*) bezieht, die in U-Bahnschächten verbaut wurden. Auch in diesen Fällen treten Abweichungen von 100 m oder mehr auf.

Die Genauigkeit der Lokalisierung über die Cell ID in der einfachsten Form entspricht etwa einem Drittel der Größe der jeweiligen Funkzellen, da jede Funkzelle in drei Sektoren unterteilt ist, durch die eine grobe Richtungslokalisierung möglich wird. Dieses einfache Verfahren wird *Cell of Origin (CoO)* oder *Cell Global Identity (CGI)* genannt. Werden die Cell IDs weiterer Funkzellen berücksichtigt, lässt sich die Genauigkeit weiter erhöhen (*Enhanced CI*). Die besten Ergebnisse der Zellortung lassen sich jedoch über Laufzeitmessungen erreichen. Dabei wird der *TA-Parameter (Timing Advance)* mitberücksichtigt, über den die Entfernung zwischen Basisstation und mobilem Endgerät abgeleitet werden kann. Das *EOTD-Verfahren (Enhanced Observed Time Difference)* erhöht die Genauigkeit der Lokalisierung noch einmal, indem die Laufzeitunterschiede zwischen den Signalen mehrerer Basisstationen gemessen werden. Damit lassen sich durchschnittlich Genauigkeiten von 30 m oder weniger erreichen. Allerdings müssen hier die Endgeräte auf dieses Verfahren ausgelegt sein.

2.2.3 Positionsbestimmung mit WLAN-Netzen

Als drittes etabliertes technikgestütztes System zur Positionsbestimmung dienen die WLAN-Netze, die in urbanen Räumen in hoher Zahl verfügbar sind. Wie bei der Positionsbestimmung über Funkzellen besitzt die Lokalisierung über Hotspots privater WLAN-Netze den Vorteil, dass die WLAN-Signale auch innerhalb geschlossener Räume empfangen werden können und damit relativ robust gegen Abschattung durch Bebauung sind. Allerdings besitzen externe Faktoren einen relevanten Einfluss auf die Signalgüte. Dazu

⁶ GSM steht für Global System for Communication, UMTS für Universal Mobile Telecommunications System und LTE für Long Term Evolution.

zählen ein- und ausfahrende Züge in einem Bahnhofsgebäude und ähnliche technische Artefakte, die ein Magnetfeld erzeugen. Aber auch die Menschen in einem Bahnhof absorbieren mit dem Körper die WLAN-Signale bzw. verändern damit die Signalstärke bei der WLAN-Messung.

Schließlich besteht eine Herausforderung dieses Verfahrens in der volatilen Infrastruktur der WLAN-Netzwerke. Jeder WLAN-Hotspot sendet bestimmte Signale zur Identifizierung (Name, Mac-Adresse), zudem lässt sich die Empfangsfeldstärke (*Receive Signal Strength Indicator, RSSI*) bestimmen. Aus diesen Informationen lässt sich ein Fingerprint erstellen, der charakteristisch für einen bestimmten Ort ist und nur dort auftaucht. Diesem Fingerprint wird in einer Datenbank eine Geokoordinate zugeordnet, mit der dann die eigentliche Lokalisierung erfolgt. Das Smartphone analysiert die empfangenen Daten der WLAN-Hotspots, vergleicht diese mit den in der Datenbank hinterlegten Fingerprints und ermittelt so die zugehörige Geokoordinate. WLAN-Hotspots können jedoch ausgetauscht oder abgeschaltet werden, der Besitzer kann umziehen und den WLAN-Hotspot mitnehmen. Dadurch verändert sich auch der Fingerprint eines bestimmten Ortes, wodurch er in der Datenbank nicht mehr oder nur noch fehlerhaft identifizierbar ist. Das heißt, dieses Verfahren ist nicht nur abhängig von der Persistenz der Infrastruktur, daraus resultiert auch ein kontinuierlicher Wartungsaufwand der Datenbank, da sie sonst innerhalb weniger Monate oder Jahre unbrauchbar wird.

Ein weiterer Nachteil, der aus der Notwendigkeit der Vermessung der Fingerprints und deren Hinterlegung in einer Datenbank resultiert, ist der genuin proprietäre Ansatz. Solche Datenbanken sind nicht allgemein zugänglich und unterliegen keiner Standardisierung. Zudem sind sie meistens auf bestimmte Lokalitäten wie Bahnhöfe, Museen, Messhallen oder Flughäfen begrenzt. Einen Versuch, die WLAN-Netze flächendeckend zu kartographieren, startete das Unternehmen Google im Rahmen des Street-View-Projekts, bei dem nicht nur eine flächendeckende Fotodatenbank angelegt wurde, sondern auch die korrespondierenden WLAN-Hotspots mit erfasst wurden. Diese Datenerfassung wurde jedoch von Google im Zuge starker öffentlicher Kritik bereits 2010 eingestellt (vgl. FAZ 2010). Das Unternehmen Skyhook Wireless hat ebenfalls eine umfassende Datenbank von WLAN-Routern angelegt und nutzt diese kommerziell. In Nordamerika und Europa setzte das Unternehmen zahlreiche Fahrzeuge zur kartographischen Erfassung von WLAN-Hotspots ein, das sogenannte *Wardriving*. Diese Daten wurden vom Unternehmen Apple genutzt, um genaue und schnelle ortsbasierte Dienste (*Location Based Services*) zu entwickeln (Computerwoche 2009).

Inzwischen gibt es auch einen Open-Community-basierten Ansatz unter dem Namen „OpenWLANWeb“, bei dem über Wardriving-Verfahren flächendeckend WLAN-Netze zur weiteren Verwendung erfasst werden sollen (<http://www.openwlanmap.org>). Dieser Ansatz folgt dem OpenStreetMap-Verfahren, bei dem ein nichtkommerzielles Pendant zu den etablierten Diensten geschaffen werden soll.

2.2.4 Inertialsensorik und weitere Ansätze

Ähnlich der WLAN-Lokalisierung können auch andere technische Verfahren wie *RFID* oder *Bluetooth Low Energy (BLE)* zur Lokalisierung genutzt werden. RFID steht für *Radiofrequenzidentifikation* und dient zur draht- und sichtlosen Informationsübertragung mittels Radiowellen. Das Verfahren basiert auf elektromagnetischer Induktion, mit der ein *RFID-Reader* einen sogenannten *RFID-Tag (RFID-Transponder)* aktiviert. Wird dieser aktiviert, so kann der RFID-Reader die in dem RFID-Tag gespeicherten Daten auslesen – meistens eine Nummernfolge – und in einer Datenbank den entsprechenden Informationen zuordnen. Es kann zwischen passiven (wie beschrieben) und aktiven bzw. semi-aktiven Verfahren unterschieden werden. Bei aktiven und semi-aktiven Verfahren ist der RFID-Tag ohne Induktion in der Lage, Informationen zu senden, und muss nicht aktiviert werden. Das RFID-Verfahren dient zur Informationsübertragung über relativ kurze Distanzen zwischen 0,1 und 10 m, kann aber mit entsprechenden Verfahren – bei sehr hohen RFID-Frequenzbändern im Mikrowellenbereich und aktiven bzw. semi-aktiven Transpondern – auf Distanzen bis zu 200 m aufgerüstet werden. Eine Lokalisierung von RFID-Tags ist dann möglich, wenn diese vorher georeferenziert und fest verbaut wurden. Das Ticket-System *Touch&Travel* (www.touchandtravel.de) basiert auf diesem Verfahren und nutzt dafür die verwandte *NFC-Technologie (Near Field Communication)*. Zum Einsatz in wissenschaftlichen Untersuchungen ist dieses Verfahren nur begrenzt geeignet, da es auf eine zuvor installierte Infrastruktur angewiesen ist und nicht ortsunabhängig eingesetzt werden kann.

Das Verfahren der Ortung mittels BLE wurde vor allem von der Firma Nokia unter dem Namen *HAIP – High Accuracy Indoor Positioning* vorangetrieben und konnte bei der Ortung innerhalb geschlossener Gebäude eine beachtliche Genauigkeit von weniger als 0,5 m Abweichung erreichen (Nokia 2012). Die Firma Apple verfolgt derzeit ähnliche Ansätze und will sogenannte *iBeacons* als Leitsystem für Kunden einsetzen (vgl. Gurman 2013). Trotz dieser beachtlichen technischen Performanz des BLE-Ansatzes ist auch hier der proprietäre Ansatz ein Hinderungsgrund für den Einsatz in wissenschaftlichen Untersuchungen.

Ein weiterer interessanter Ansatz zur Lokalisierung basiert auf der ausschließlichen Nutzung der im Smartphone verbauten Sensoren. Damit ist keine weitere Infrastruktur erforderlich, sondern lediglich ein georeferenzierter Ausgangspunkt, vom dem aus die räumlichen Bewegungen analysiert werden können. Für dieses als *Dead Reckoning* bezeichnete Verfahren werden dreidimensionale Beschleunigungssensoren (*Accelerometer*), dreidimensionale Drehdatensensoren (*Gyroskope*) und ein Magnetfeldsensor (*Kompass*) genutzt. Die ersten beiden Sensoren dienen zur Messung der Geschwindigkeit und der Bewegungsrichtung, der Kompass misst den seitlichen Versatz (*Drift*). Die bisher erzielten Ergebnisse für die Indoor-Navigation zeigen jedoch noch deutliche Schwächen. Bereits nach wenigen Minuten ohne weitere Referenzierung steigen die Abweichungen von der tatsächlichen Position deutlich an und sind für einen praktischen Einsatz kaum noch geeignet. In Ergänzung zu GPS, WLAN oder Cell-Ortung kommt diesem Ansatz jedoch

mehr Bedeutung zu. Hier kann die Inertialsensorik genutzt werden, um Signallöcher z. B. bei Tunneldurchfahrten, auszugleichen. Zudem gibt es Ansätze, in denen die Inertialsensorik genutzt wird, um Bewegungszustände zu analysieren und mithilfe der spezifischen Muster der Sensoraufzeichnungen auf bestimmte Verkehrsmittel zu schließen.

2.2.5 Zwischenresümee

Jedes der beschriebenen Lokalisierungsverfahren besitzt Defizite, die auf die technische Konzeption und infrastrukturellen Grundlagen zurückgeführt werden können. GPS-Signale benötigen den freien Blick zum Himmel, Zellortung und WLAN-Lokalisierung setzen eine vorhandene Infrastruktur und entsprechende Datenbanken voraus, in denen die Positionen der Infrastruktur-Elemente georeferenziert wurden. Bei den Lokalisierungsverfahren in Smartphones hat sich in der Praxis die Kombination der verschiedenen Lokalisierungsverfahren als nützlich erwiesen. Dabei spielt auch das Energiemanagement der Smartphones eine Rolle, da die Lokalisierung mit GPS oder WLAN energieaufwändiger ist als die Lokalisierung über Cell IDs. Die *hybride Lokalisierung* bietet neben der Redundanz der Systeme auch den Vorteil, dass sich unplausible Werte besser identifizieren und aussortieren lassen. Bei neueren Smartphones wird bereits im Gerät auf Basis der verfügbaren Lokalisierungstechnologien die aktuelle Position berechnet und über den sogenannten *Positioning-Layer* bereitgestellt. Verfahren der hybriden Lokalisierung bieten den Vorteil, dass sie robust gegen Umweltfaktoren sind und sowohl in geschlossenen Räumen als auch in urbanen oder ländlichen Gebieten akzeptable Ergebnisse liefern. Der Nachteil für deren Nutzung im Rahmen von Forschungsaktivitäten ist die fehlende Transparenz der angewendeten Algorithmen, da nicht nachvollziehbar wird, auf welche Weise die Lokalisierung erfolgt.

2.3 Einsatz von GPS in den Verkehrswissenschaften

2.3.1 Die ersten verkehrswissenschaftlichen Studien mit GPS

Die serienmäßige Ausstattung von Smartphones mit GPS-Empfängern hat sich erst seit etwa 2008 etabliert. Die noch nicht vollständige Verbreitung GPS-fähiger Smartphones ist neben technischen Restriktionen immer noch ein wesentlicher Grund, warum auf deren Einsatz in wissenschaftlichen Untersuchungen weitestgehend verzichtet wird. Die wenigen explorativen Pilotstudien widmen sich dabei vor allem Fragen nach der prinzipiellen Möglichkeit des Einsatzes von Smartphones in wissenschaftlichen Studien, nach Vor- und Nachteilen im Vergleich zu herkömmlichen Erhebungsmethoden, nach technischen Restriktionen sowie nutzerseitigen Anforderungen (vgl. Ohmori et al. 2005; Fan et al. 2012; Cottrill et al. 2013). Die Nutzung von GPS hat sich hingegen deutlich früher als eine sinnvolle Ergänzung bzw. als Ersatz zu alternativen Erhebungsmethoden gezeigt.



<http://www.springer.com/978-3-658-01847-4>

Smartphones unterstützen die Mobilitätsforschung
Neue Einblicke in das Mobilitätsverhalten durch
Wege-Tracking

Schelewsky, M.; Jonuschat, H.; Bock, B.; Stephan, K.
(Hrsg.)

2014, XIII, 108 S. 22 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-01847-4