

# Einsatz hochempfindlicher Magnetfeldsensoren zur Erfassung von Fahrzeugen

Haibin Gao und Uwe Hartmann  
Experimentalphysik

## Gründe für die Erfassung von Verkehrsflüssen

Mobilität ist ein Grundbedürfnis der Menschheit und eine der Basisvoraussetzungen für wirtschaftliche Entwicklung. Hieraus resultiert ein in Bezug auf Umfang und Effizienz ständig wachsendes Mobilitätsbedürfnis, was wiederum stetig anwachsende Verkehrsflüsse im Straßen-, Schienen- und Luftfahrtbereich zur Folge hat [1,2]. Verkehrsflüsse müssen gesteuert werden, um Transportsicherheit zu gewährleisten und um ihre Effizienz zu optimieren. Da sich Verkehrsflüsse in mathematischer Hinsicht oft nach sehr komplexen Gesetzmäßigkeiten orientieren, sind zur Optimierung häufig anspruchsvolle Algorithmen erforderlich [3].

Der interaktive Teil der Verkehrsflusssteuerung erfordert in jedem Fall einen geschlossenen Regelkreis, bei dem aus dem momentan vorhandenen Verkehrsfluss abgeleitete Parameter einen Einfluss auf die Steuerungsmechanismen haben, die dann ihrerseits wiederum den Verkehrsfluss beeinflussen. An entscheidender Position in dieser Regelschleife werden Sensorsysteme benötigt, die es gestatten, auf geeignete

Bei der Entwicklung von Sensoren, die in der Lage sind, kleinste Magnetfelder zu erfassen, wurden in den vergangenen Jahren erhebliche Fortschritte erzielt. Zwar ist man bereits seit langem in der Lage, Magnetfelder zu detektieren, die nur ein Milliardstel des Erdmagnetfeldes betragen, allerdings benötigt man dazu Sensoren, die bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt (- 273° C) betrieben werden müssen. Bedingt insbesondere durch Fortschritte in der Informationstechnologie stehen heute Sensoren zur Verfügung, die eine Empfindlichkeit von etwa einem Tausendstel des Erdmagnetfeldes haben, unter Umgebungsbedingungen betrieben und kostengünstig in großer Anzahl produziert werden. Systeme basierend auf diesen Sensoren sind geeignet, Straßen und Schienenfahrzeuge sowie auch Flugzeuge über eine Entfernung von einigen Metern zu detektieren und teilweise sogar zu identifizieren. Die neuartigen Sensorsysteme können zur Optimierung von Verkehrsflüssen im Straßenverkehr oder auf dem Vorfeld von Flughäfen eingesetzt werden.

Weise den Verkehrsfluss zu quantifizieren, indem sie entweder einzelne Fahrzeuge in Bezug auf ihre Bewegungsrichtung, Geschwindigkeit und Beschaffenheit erfassen oder aber zumindest kollektive Flusseigenschaften, wie beispielsweise die Anzahl von Fahrzeugen, die pro Stunde eine gewisse Position passiert haben, detektieren. Zur Erfassung der Charakteristika von Verkehrsflüssen und zur Erfassung von Einzelfahrzeugen sind verschiedene Sensorsysteme geeignet, beispielsweise Radar, Infrarotsensoren, Ultraschallsensoren und Videokameras. Für den Straßenverkehr werden hauptsächlich Induk-

tionsschleifen verwendet, die an entsprechenden Positionen in den Belag der Straße eingebracht werden, um beispielsweise Ampelanlagen zu steuern oder Verkehrsflüsse zu quantifizieren. Tabelle 1 liefert einen Überblick über verschiedene Sensoren, wobei die mit der Funktionsweise verbundenen inhärenten Nachteile dargestellt sind.

Ein Vergleich der in Tabelle 1 aufgeführten Sensorsysteme zeigt, dass es das ideale System bislang nicht gibt. Die technischen oder ökonomischen Einschränkungen der Sensorsysteme führen dazu, dass das Verkehrsflussmana-

Tabelle 1: Zur Detektion von Fahrzeugen eingesetzte Sensoren und Nutzungseinschränkungen.

Radar	Mikrowellen	Ultraschall	Infrarot	Induktionsschleife	Drucksensor
<ul style="list-style-type: none"> <li>hohe Kosten</li> <li>niedrige Detektionseffizienz für große Objekte</li> <li>niedrige Auflösung</li> <li>lange Reaktionszeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>nicht im Boden installierbar</li> <li>verursacht leicht elektromagnetische Störungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>klimatische Abhängigkeit</li> <li>Verschmutzungsgefahr</li> <li>nicht im Boden installierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>klimatische Einflüsse</li> <li>Identifikation von Objekten ist kompliziert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>sehr lokal</li> <li>keine detaillierte Information über das detektierte Objekt</li> <li>kurze Lebensdauer</li> <li>Fahrbahn muss zur Installation gesperrt werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>fragiler Mechanismus</li> <li>keine Identifikation des detektierten Objekts</li> </ul>

gement nirgendwo auf der Welt wirklich umfassend durchgeführt wird und dass die realisierten Ansätze häufig zwar zu Verbesserungen, aber nicht zu optimalen Lösungen führen. Das mangelnde Management von Verkehrsflüssen im Straßen-, Schienen- und Flugverkehr führt summarisch zu erheblichen volkswirtschaftlichen Verlusten und zum Teil bei der Beförderung von Personen zu einem unnötigen Beförderungsrisiko.

Besonders der Sicherheitsaspekt, aber auch die Effizienz von Verkehrsströmen stehen auf dem Vorfeld von Flughäfen im Zentrum des Verkehrsmanagements. Vorrangig gilt es natürlich, bei einer auf großen Flughäfen extrem hohen Verkehrsdichte Kollisionen zwischen Flugzeugen sowie zwischen Flugzeugen und Straßenfahrzeugen zu verhindern [1, 2]. Sicherheitsrelevante Zwischenfälle auf dem Vorfeld von Flughäfen sind, wie die Tabelle 2 für den Erfassungsbereich der Federal Aviation Administration (FAA) zeigt, überraschend häufig und in ihrer Zahl steigend [4]. Die folgenreiche Kollision zweier Flugzeuge auf dem Flughafen Mailand-Linate am 8.10.2001 stellt ein exemplarisches Beispiel für einen Unfall dar, der bei Verfügbarkeit adäquater Sensorsysteme sicherlich hätte vermieden werden können. Der Zusammenstoß der Maschinen am Boden resultierte ursächlich aus einem Pilotenfehler, der nicht verhindert werden konnte, weil kein Bodenradar verfügbar war und die Sichtweite von 225 m nicht ausreichte, um dem Personal im Flughafentower einen ausreichenden Überblick zu gewährleisten. Ein Sensorsystem, welches das fehlerhafte Überfahren einer Haltelinie automatisch an den Tower gemeldet hätte, wäre hier außerordentlich sinnvoll gewesen.

Neben der Vermeidung von Risiken ist ein effizientes Vorfeldmanagement notwendig, um unnötige Wartezeiten bei Landungen und Starts zu verhindern und um die Verweildauer der Flugzeuge auf den Flughäfen zu minimieren. Prinzipiell vermeidbare Wartezeiten verschlingen im Luftverkehr enorme Summen. Wie im Straßenverkehr erfordert die umfassende Detektion von Verkehrsflüssen auf dem Vorfeld von Flughäfen flächendeckende adäquate Sensorsysteme, die in der Lage sind, die Position von Flugzeugen, ihre Bewegungsrichtung, Geschwindigkeit, aber

Kalenderjahr	Falsche Anweisungen	Pilotenfehler	Fehler Bodenpersonal/Straßenfahrzeuge	Anzahl der Unfälle
1994	83	66	51	200
1995	65	125	50	240
1996	69	146	60	275
1997	69	132	87	292
1998	91	183	51	325
1999	78	182	61	321
2000	87	259	85	431

Tabelle 2: Unfälle auf dem Vorfeld FAA-überwachter Flughäfen.

auch den Bewegungszustand von Straßenfahrzeugen sicher zu erfassen.

Verschiedene Systeme zur Überwachung von Flughafenvorfeldern sind im Einsatz oder wurden erprobt. Auch hier bestehen bei allen bisher verwendeten Sensorsystemen zum Teil gravierende spezifische Nachteile. Bodenradarsysteme, die auf allen größeren Flughäfen betrieben werden, sind extrem kostenintensiv, sowohl in der Beschaffung als auch in der Unterhaltung, und ihr Einsatz wird häufig in der Umgebung von Gebäuden gestört, so dass eine lückenlose Überwachung von Vorfeldern nicht möglich ist. Die hohen Kosten haben zur Folge, dass entsprechende Systeme auf kleineren und mittleren Flughäfen in der Regel nicht installiert sind. Systeme basierend auf Videokameras sind in ihrer Funktion witterungsanfällig und häufig gerade bei schwierigen Witterungsverhältnissen, bei denen eine optimale Vorfeldüberwachung benötigt wird, nicht einsetzbar. Neueste Ansätze zur Vorfeldüberwachung und Identifikation von Flugzeugen basieren auf Transponderverfahren, die allerdings voraussetzen, dass alle Flugzeuge und Bodenfahrzeuge mit der entsprechenden Transpondertechnologie ausgestattet sind, was nicht leicht zu realisieren ist. Nicht mit Transpondern ausgestattete Flugzeuge oder Straßenfahrzeuge könnten nicht detektiert werden und würden ein enormes Sicherheitsrisiko darstellen. Auch auf satellitengestützte Navigation (GPS) basierende Systeme wurden getestet, erwiesen sich aber als außerordentlich aufwändig und in ihrer Flächenabdeckung als nicht befriedigend. Die technische Komplexität GPS-basierender Lösungen wird ja gerade gegenwärtig im Zusammenhang mit den Problemen bei der Mauterfassung mehr als deutlich.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es einen durchaus großen Bedarf an einer Sensortechnologie gibt,

die witterungsunabhängig und zuverlässig arbeitet und geeignet ist für einen Einsatz gerade auch auf kleineren und mittleren Flughäfen. Ein solches System sollte kombinierbar sein mit bereits etablierten Vorfeldüberwachungssystemen, so dass auch auf großen Flughäfen bisher nicht abgedeckte Bereiche mit Sensorsystemen ausgestattet werden könnten. Wünschenswert wäre eine lückenlose Erfassung aller Fahrzeug- und Flugzeugbewegungen auf dem Vorfeld eines Flughafens, die zu Daten führt, welche im Tower in eine sinnvolle und mit den Flugplänen zu korrelierende Information umgesetzt werden kann.

#### Magnetfeldbasierende Erfassung von Fahrzeugen

Jedes Objekt, das Bestandteile aus ferromagnetischem Material beinhaltet, oder elektrische Ströme einschließt, ist von einem Magnetfeld umgeben, welches mehr oder weniger charakteristisch für dieses Objekt ist. Auch die Erde selbst ist bekanntlich von einem für sie charakteristischen Magnetfeld umgeben, welches auf der Erdoberfläche eine Größenordnung von 50  $\mu\text{T}$  hat. Dies ist ein im Vergleich zu typischen technischen Magnetfeldern vergleichsweise kleiner Wert, der jedoch mittels moderner Sensorsysteme durchaus detektierbar ist [5-8]. In der Umgebung von Straßen- und Schienenfahrzeugen sowie Flugzeugen, die ja in jedem Fall metallische, ferromagnetische Bestandteile aufweisen und in denen zumeist auch elektrische Aggregate betrieben werden, kommt es zu einer Überlagerung des Erdmagnetfeldes und des durch das Fahrzeug oder Flugzeug erzeugten charakteristischen Eigenfeldes. Grundlage des von uns entwickelten neuartigen Sensorsystems ist die empfindliche Erfassung des Magnetfeldes in der näheren Umgebung eines Fahrzeuges zur Detektion der Anwesenheit des Fahrzeuges, zur Erfassung der Bewegungsrichtung, evtl.

zur Erfassung der Geschwindigkeit und unter Umständen zur Zuordnung des Fahrzeugs zu einer bestimmten Fahrzeugklasse. Ist das erfasste magnetische Profil individuell genug, um eine solche Zuordnung vornehmen zu können, so bezeichnen wir das erfasste Magnetfeldprofil als den „magnetischen Fingerabdruck“ des Objektes [9, 10].

Der magnetische Fingerabdruck ist charakteristisch für das jeweilige Fahrzeug. Würde man das Magnetfeld direkt auf der Oberfläche eines Fahrzeugs erfassen, so würde der entsprechende Fingerabdruck in außerordentlich spezifischer Weise die individuellen Eigenschaften des Fahrzeugs widerspiegeln, wobei diese Eigenschaften zwischen einzelnen Fahrzeugen eines Bautyps, also etwa zwischen zwei Flugzeugen vom selben Typ durchaus – je nach Vorgeschichte und Betriebszustand - variieren können. Die Vorgeschichte ist beispielsweise dadurch festgelegt, ob bestimmte Teile an dem Fahrzeug ausgetauscht wurden oder ob etwa während Wartungsarbeiten größere Magnetfelder erzeugt wurden. Der Betriebszustand ist definiert durch die Summe aller magnetfeldrelevanten Einflüsse während des Betriebs, also etwa durch den Betrieb bestimmter elektrischer Aggregate oder durch eine Beladung des Fahrzeugs, die großen Einfluss auf die magnetischen Eigenschaften hat. Zusätzlich verändert sich das Magnetfeldprofil eines Fahrzeugs sehr stark mit

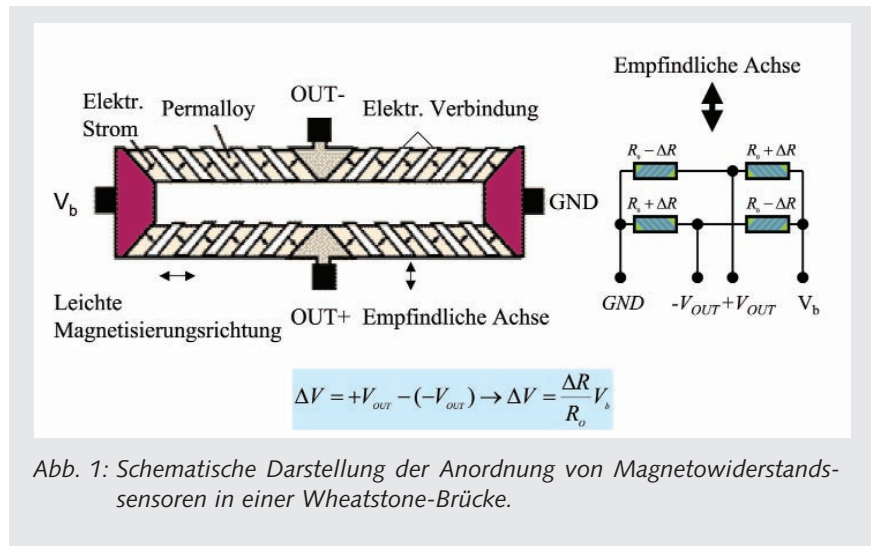


Abb. 1: Schematische Darstellung der Anordnung von Magnetowiderstandssensoren in einer Wheatstone-Bridge.

dem Abstand vom Fahrzeug, d. h. mit der Position des erfassenden Sensors relativ zum Fahrzeug. Damit ist der magnetische Fingerabdruck eine komplizierte, eine Vielzahl von Variablen enthaltende Zuordnung. Zur technischen Nutzung des magnetischen Fingerabdrucks zur Erfassung von Verkehrsflüssen ist es erforderlich, zunächst einmal die Einflussgrößen zu erforschen, um zu definieren, welche Details gemessener Magnetfeldprofile geeignet sind, um unabhängig von Sensorpositionen und Betriebszuständen eine Klassifikation eines Fahrzeugs vornehmen zu können.

Während die Analyse des magnetischen Fingerabdrucks eines Fahrzeugs in messtechnischer und mathematischer Hinsicht ein außerordentlich komplexes Problem darstellt, ist die Detektion der bloßen Anwesenheit eines Fahrzeugs und die Erfassung der Geschwindigkeit mittels Magnetfeldsensoren ein relativ triviales Unterfangen. Allerdings sind auch in diesem vergleichsweise einfachen Fall verschiedene Probleme im realen Betrieb des Sensorsystems zu lösen. In jedem Fall benötigt man hinreichend empfindliche Sensoren, die in der Lage sind, Bruchteile des Erdmagnetfeldes witterungsunabhängig und relativ schnell zu erfassen. Während Induktionsschleifen grundsätzlich alle me-

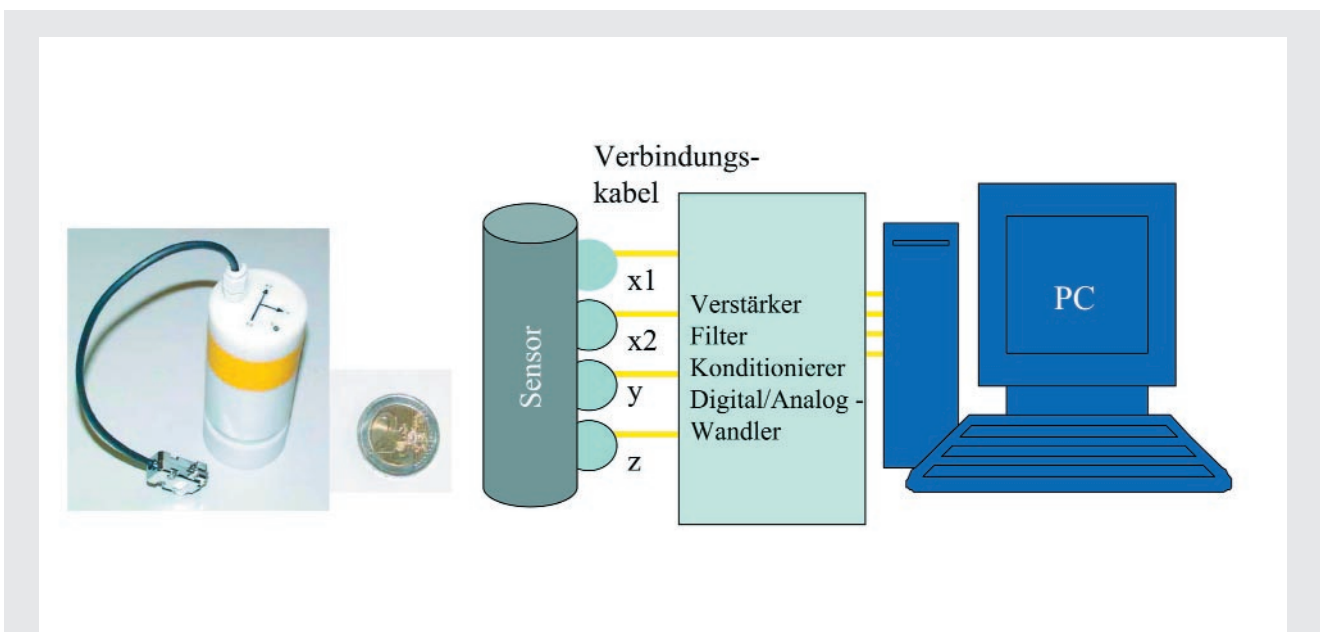


Abb. 2: Dreiaxiale Sensoreinheit mit vier Kanälen (links) und Anordnung zur Datenerfassung (rechts).



tallischen Objekte, also auch solche, die keine ferromagnetischen Bestandteile oder elektrischen Ströme aufweisen, detektieren. Ist es im Hinblick auf die Realisierung des von uns vorgeschlagenen Erfassungssystems erforderlich, Sensoren zu verwenden, die direkt das von den Fahrzeugen erzeugte Magnetfeld oder das durch die Fahrzeuge modifizierte Erdmagnetfeld erfassen. Geeignete und im industriellen Maßstab zur Verfügung stehende Sensoren basieren entweder auf dem Hall-Effekt, nutzen eine magnetfeldinduzierte elektrische Widerstandsänderung in dünnen metallischen Mono- oder Multischichten aus, oder arbeiten nach dem „Fluxgate-Prinzip“ [6]. Im Allgemeinen betreibt man die Sensoren, wie dies in Abbildung 1 für eine Magnetowiderstandsanordnung gezeigt ist, in einer Brückenanordnung aus vier einzelnen Sensoren. Eine solche „Wheatstone-Brücke“ erhöht die Erfassungsempfindlichkeit und macht die Sensoren unabhängiger von Temperaturschwankungen [11, 12, 13]. Zu berücksichtigen ist, dass die Sensoranordnungen im Allgemeinen Magnetfeldkomponenten parallel zu einer Achse oder sogar richtungsempfindlich erfassen. Die Verwendung von drei Sensorbrücken mit zueinander senkrechten empfindlichen Achsen ermöglicht dann die Erfassung von Magnetfeldern in Bezug auf Feldstärke und Feldrichtung. Die genannten Sensortypen haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile im Hinblick auf Sen-

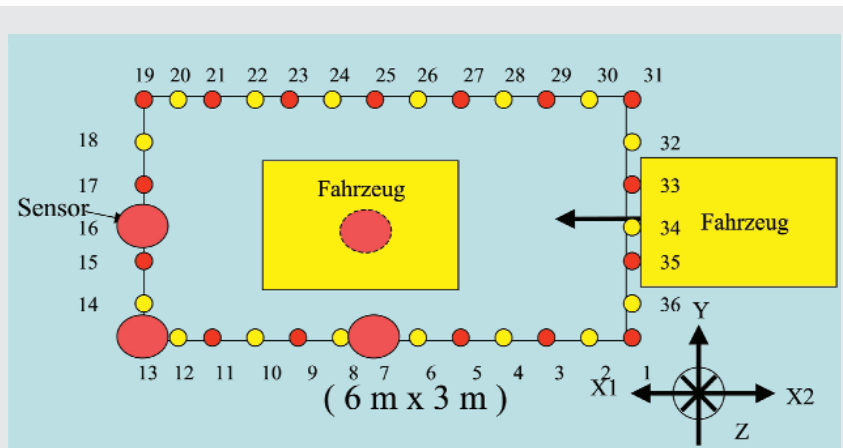


Abb. 3: Versuchsanordnung zur magnetosensorischen Erfassung von Stellplatzbelegungen.



Abb. 4: Testfeld auf dem Universitätscampus. Im hinteren Bereich der Bilder befindet sich das in Abb. 3 schematisch dargestellte Testfeld. Das Einfahren des Fahrzeuges (linkes Bild) sowie das Verweilen werden durch die Magnetfeldsensoren detektiert und die erfassten Daten als Funktion der Zeit mittels eines Rechners registriert.

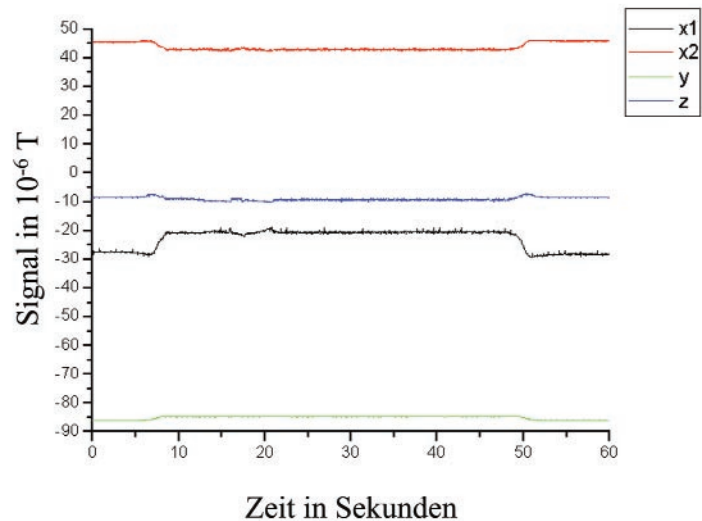


Abb. 5: Sensorposition in Bezug auf das parkende Fahrzeug (linkes Bild). Der Sensor befindet sich in Position 16 des Messfeldes (siehe Abb. 3). Die Magnetfeldprofile (rechtes Bild) zeigen deutlich die Verweildauer des Fahrzeuges an. Zur besseren Unterscheidung wurden die Profile horizontal gegeneinander verschoben.



Abb. 6: Das neue Universitätsparkhaus, bei dem das Verkehrsleitsystem (links) ein Suchen nach freien Stellplätzen (rechts) nicht verhindern kann.

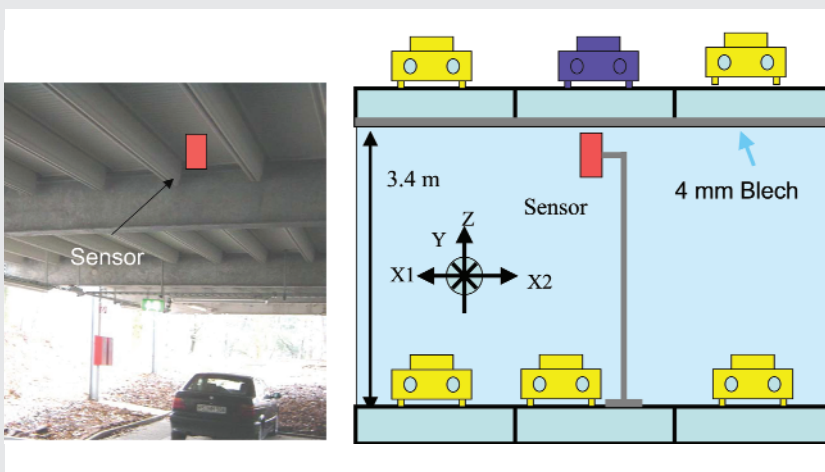


Abb. 7: Sensoranordnung zur Erfassung der Stellplatzbelegung auf dem oberen Parkdeck.

sivität, Erfassungsgeschwindigkeit und Kosten. Je nach Aufgabenstellung finden sie aber alle Anwendung für die hier diskutierten Problemlösungen [14, 15].

Ein komplettes Sensorsystem beinhaltet neben den eigentlichen Sensoren noch umfangreiche elektronische Komponenten zur Aufbereitung der erfassten Daten. Im Allgemeinen werden die Daten im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsprojekte, die gegenwärtig durchgeführt werden, direkt an einen Rechner übergeben (Abb. 2). In ein zylindrisches Kunststoffgehäuse werden vier orthogonal zueinander angeordnete Sensorbrücken mit zugehöriger Elektronik eingebracht. Entlang einer Achse – hier als x-Achse bezeichnet – befinden sich zwei Sensorbrücken im Abstand von exakt 4 cm. Die Sensoreinheit wird im Allgemeinen so verwendet, dass die x-Achse der erwarteten Bewegungsachse der Fahrzeugbewegung entspricht. Es lassen sich dann entlang dieser Achse sowohl die Bewegungsrichtung als auch die Geschwindigkeit der Fahrzeugbewegung erfassen. Die Kombination aus Analog- und Digital-elektronik sowie Softwarekomponenten erweitert die passive Erfassung von Magnetfeld-Zeit-Profilen zu einer zielgerichteten Datenanalyse, die zum einen temporäre Störungen eliminiert und die Arbeitsweise des Sensors unabhängig von seinem Installationsort und von Witterungsschwankungen macht, und zum anderen je nach Kom-

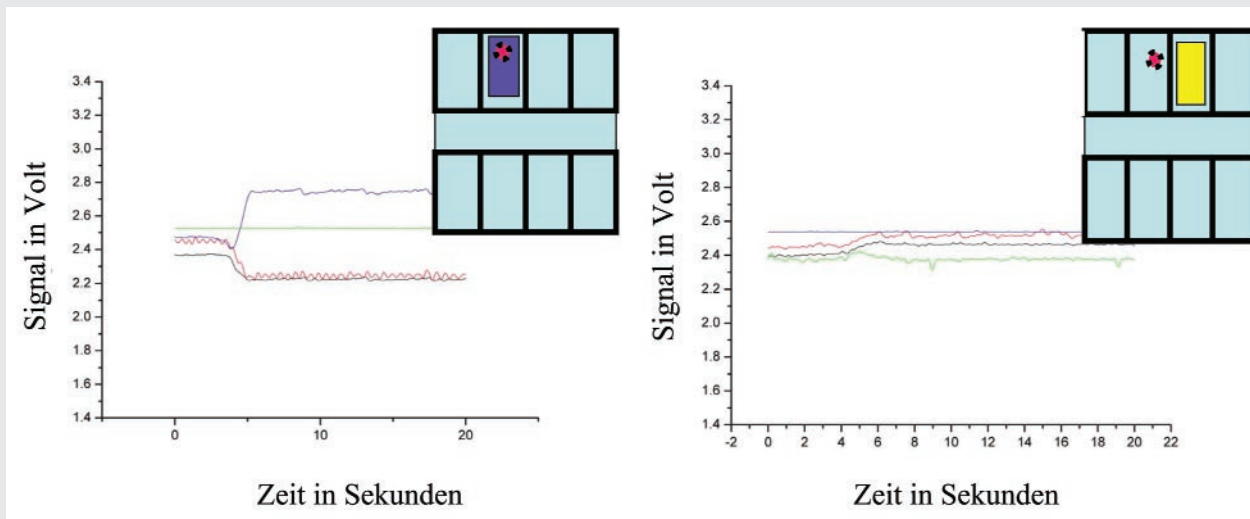


Abb. 8: Die Stellplatzbelegung konnte problemlos durch die Decke des Parkhauses auf der Basis von Magnetfeldprofilen erfasst werden. Das linke Bild zeigt den Verlauf der Magnetfeldprofile bei Besetzung eines Stellplatzes, während im rechten Bild der Profilverlauf bei Besetzung eines Nachbarstellplatzes wiedergegeben ist.



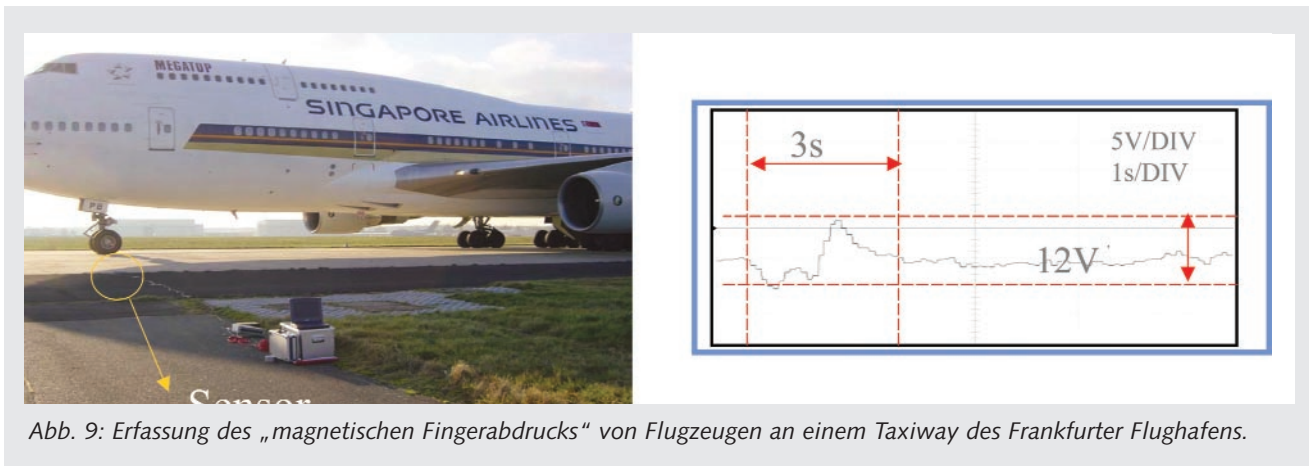


Abb. 9: Erfassung des „magnetischen Fingerabdrucks“ von Flugzeugen an einem Taxiway des Frankfurter Flughafens.

plexität der Fragestellung unterschiedliche Informationen aufbereitet. Mit einer Empfindlichkeit im nT-Bereich haben die Systeme typischerweise eine Erfassungsempfindlichkeit, die es ermöglicht, ein Tausendstel des Erdmagnetfeldes oder weniger zu detektieren.

### Verkehrsflussregelung und effiziente Nutzung von Parkpositionen

Die effiziente Nutzung und dynamische Allokation von Parkpositionen ist sowohl im Bereich des Straßenverkehrs als auch auf dem Vorfeld von Flughäfen von großer Bedeutung und bietet enormes Potential zur Kosten- und Zeiterparnis. Verschiedene der in Tabelle 1 genannten Sensoren sind zwar grundsätzlich geeignet, um zu detektieren, ob ein Stellplatz durch ein Fahrzeug besetzt wurde oder nicht, ihre Einsetzbarkeit ist aber auf Grund technischer Einschränkungen oder zu hoher Kosten außerordentlich begrenzt. So wird in der Regel in Parkhäusern zwar pro

Parkdeck oder Korridor oder auch nur für das gesamte Parkhaus erfasst, wie viele Stellplätze unbenutzt sind, jedoch ist keine Zuweisung eines konkreten Stellplatzes möglich, so dass die freien Stellplätze durch Suchen aufgefunden werden müssen. Wäre ein jeder Stellplatz mit einem kostengünstigen Sensor ausgestattet und würde eine Allokation der Stellplätze auf dem Parkticket, über Anzeigetafeln oder direkt auf dem Monitor des Fahrzeuges erfolgen, so ließen sich Verkehrsströme wesentlich effizienter leiten als das bisher der Fall ist. Die intelligente und dynamische Allokation von Stellplätzen ließe sich auch für die Parkpositionen von Flugzeugen auf dem Flughafenvorfeld entsprechend realisieren.

Abbildung 3 zeigt schematisch eine Anordnung, mit der getestet wurde, ob sich Magnetfeldsensoren grundsätzlich eignen für die Überwachung von Parkpositionen für Straßenfahrzeuge. Entlang der Berandung eines 6 m x 3 m

großen Feldes wurden 36 jeweils 0,5 m voneinander entfernte Sensorpositionen definiert sowie eine Position im Zentrum der Fläche. Messungen für einen typischen Einparkverlauf wurden speziell an den vier herausgehobenen Sensorpositionen durchgeführt. Abbildung 4 zeigt die Testanlage in der Nähe des Gebäudes 22 auf dem Universitäts-campus. Typische von den Magnetfeldsensoren registrierte Profile während eines Parkvorgangs sind in Abbildung 5 dargestellt. Der Sensor wurde in Position Nr. 16 (siehe Abb. 3) gebracht. Es wurden die vier Kanäle entlang der drei orthogonalen Achsen ausgewertet. Es zeigt sich, dass die Verweildauer des Fahrzeuges im Parkfeld von ca. 40 sec mit einem deutlichen Anstieg des Magnetfeldes von allen vier Kanälen registriert wird, wobei die stärkste Magnetfeldvariation entlang der Achse senkrecht zur Erdoberfläche ( $x_1$ ,  $x_2$ ) gemessen wurde. Die detektierte Feldstärkeänderung beträgt etwa 20 % des Erdmagnetfeldes.



**Prof. Dr. Uwe Hartmann**, Studium der Physik und Promotion an der Universität Münster; 1992 Habilitation für Experimentalphysik an der Universität Gießen; seit 1993 Professur für Experimentalphysik an der Universität des Saarlandes. 1998 Gewinner des Philip Morris-Preises. Derzeitige Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der Rastersondenmikroskopie und der Nanotechnologie.



**Dr. Haibin Gao**, geboren in Jiangsu, China. Studium der Physik an der Universität Fudan in Shanghai, China, 1994 Promotion im Fachbereich Angewandte Physik der Universität Fudan über die Abhängigkeit von Ion und Elektron. Zwischen 1994 und 1995 Post-Doc am Institut für Kernforschung in Shanghai. Seit 1995 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Experimentalphysik, AG Prof. Uwe Hartmann, Universität des Saarlandes. Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der Rastersondenmikroskopie und Anwendungen des Magnetfeldsensoren.

Einen typischen Einsatzbereich für ein intelligentes Parkplatzallokationssystem stellt das neue Universitätsparkdeck dar (Abb. 6). Hier wird zwar detektiert, ob noch Parkplätze in den einzelnen Bereichen unbesetzt sind (Abb. 6 a), jedoch muss bei starker Belegung (Abb. 6 b) nach einzelnen freien Parkplätzen gesucht werden. Eine besondere Herausforderung stellt die Detektion der Stellplatzbelegung für das obere Parkdeck dar. Die Detektion muss hier von unten durch die Decke erfolgen, die durch ein 4 mm dickes Blechprofil verkleidet ist. Die Anordnung des Sensors, wie sie im Rahmen erster Testmessungen verwendet wurde, ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Magnetfeldprofile in Abbildung 8 zeigen deutlich, dass die Bele-

gung eines Stellplatzes durch die Decke hindurch und vor allem durch das Blechprofil hindurch problemlos möglich ist. Die Belegung von Nachbarstellplätzen wird hingegen durch den Sensor nicht erfasst.

Umfangreiche Tests unter Verwendung magnetosensorischer Systeme wurden und werden auch zur Erfassung von Fahrzeugströmen im fließenden Verkehr durchgeführt. Messstationen befinden sich an einer Bundesstraße sowie an der A6 in St. Ingbert. Hier können Magnetfeldprofile direkt mit den von Induktionsschleifen und empfindlichen Kameras erfassten Signalen korreliert werden. Die Versuche zielen darauf ab, den spezifischen magnetischen Fingerabdruck der Fahrzeuge zu erfassen und unter Verwendung entsprechender Algorithmen in situ die Fahrzeugklasse zu bestimmen. Dabei ist die Entwicklung entsprechender mathematischer Algorithmen bereits weit fortgeschritten und die grundsätzliche Machbarkeit konnte verifiziert werden.

Tests zur Erfassung des magnetischen Fingerabdrucks von Flugzeugen wurden auf dem Vorfeld des Frankfurter Flughafens durchgeführt. Zunächst einmal wurde – wie in Abbildung 9 dargestellt – verifiziert, dass Flugzeuge auf einem „Taxiway“, d. h. auf einer Verbindung zur Start- oder Landebahn, über eine Entfernung von mehreren Metern zuverlässig detektiert werden können. In den bisher durchgeführten Versuchen wurden die Magnetfelder dabei hauptsächlich durch die Flugzeugturbinen erzeugt, wobei sich die Sensoren neben dem Taxiway befanden. Die Magnetfeldprofile haben einen spezifischen Verlauf, der auf die Größe des Flugzeugs, die Bewegungsrichtung und die Geschwindigkeit schließen lässt. Weitere Untersuchungen müssen hier zeigen, ob der magnetische Fingerabdruck ausreicht, um den Flugzeugtyp ohne weitere Informationen zu detektieren. Durch Messungen vor Ort konnte ebenfalls verifiziert werden, dass sich das Erreichen der Parkposition von Flugzeugen mit einem Feld von Magnetfeldsensoren ebenfalls präzise detektieren lässt.

### Zukünftige Arbeiten

Die bisherigen Ergebnisse, die unter Verwendung unserer auf Magnetfeldsensoren basierenden Systeme zur Er-

fassung von Fahrzeugen erzielt wurden zeigen, dass grundsätzlich alle zur Charakterisierung von Verkehrsströmen im Straßenbereich benötigten Daten kostengünstig und witterungsunabhängig erfasst werden können. Anwendungen zur Quantifizierung von Verkehrsströmen, zur Steuerung von Signalanlagen, für ein effizientes Parkplatzmanagement und zur Detektion der Fahrtrichtung bei der Auffahrt auf Autobahnen erscheinen viel versprechend. Konsequenterweise wurden daher industrielle Kooperationspartner in die weiteren Arbeiten miteinbezogen, die eine Integration der Sensorsysteme in komplette Verkehrsdatenerfassungs- und -leitsysteme vorantreiben, die neuen Systeme auf breiter Ebene etablieren und in genügenden Stückzahlen produzieren. Diesbezüglich konnten insbesondere saarländische Unternehmen gewonnen werden.

Durch Messungen auf Flughäfen konnte gezeigt werden, dass sich auch Flugzeuge am Boden an Hand von Magnetfeldprofilen erfassen und teilweise klassifizieren lassen. Darüber hinaus können in diesem Fall natürlich ebenfalls Straßenfahrzeuge erfasst werden, so dass eine weitgehende Überwachung von Flughafenvorfeldern auf der Basis einiger Hundert oder mehr Magnetfeldsensoren plausibel erscheint. Sowohl für den Straßenverkehr als auch für das Flughafenvorfeld müssen mathematische Algorithmen entwickelt werden, die eine möglichst umfassende Klassifikation der Fahrzeuge auf der Basis ihres magnetischen Fingerabdrucks ermöglichen. Darüber hinaus müssen die Sensorsysteme in bestehende Sensorsysteme so integriert werden, dass die durch sie gewonnenen Daten in die vorhandenen Datenströme – verarbeitet in Verkehrsleitrechnern oder im Flughafentower – integriert werden können.

Zur weiteren Entwicklung der messtechnischen Grundlagen, der benötigten Identifikationsalgorithmen und der Vernetzung mit der bestehenden Technologie hat die Europäische Union ein von der Universität des Saarlandes koordiniertes Projekt bewilligt. Im Rahmen von „ISMAEL“ (Intelligent Surveillance and Management Functions for Airfield Applications Based on Low Cost Magnetic Field Detectors) arbeiten Flughafenbetreiber und -ausstatter, Experten für integrierte Verkehrssysteme,

Elektronikfirmen und Grundlagenentwickler zusammen, um innerhalb von drei Jahren erste Prototypen für ein ASMGCS-Konzept (Advanced Surface Movement Guidance and Control System) zu installieren und zu testen. Dabei hat auch der Flughafen Saarbrücken-Ensheim sein Interesse und seine Kooperationsbereitschaft signalisiert.

### Danksagung

Die Herren stud. phys. Andreas Zell, Andreas Ziehl, Stephan Gier und Ralf Jungmann trugen wesentlich zur Erfassung der hier präsentierten Daten bei.

### Literatur

- [1] [www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/h11-haku\\_e/haku99e0.htm](http://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/h11-haku_e/haku99e0.htm)
- [2] [www.atsb.gov.au/aviation/occurs/index.cfm](http://www.atsb.gov.au/aviation/occurs/index.cfm)
- [3] [www.fhwa.dot.gov/ohim/tmguide/](http://www.fhwa.dot.gov/ohim/tmguide/)
- [4] [www.airlinesafety.com/editorials/RunwayIncursions.htm](http://www.airlinesafety.com/editorials/RunwayIncursions.htm)
- [5] Jacob Fraden, Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications, 2nd Edition (Springer-Verlag New York, Inc., New York, 1996)
- [6] P. Ripka, Review of Fluxgate Sensors, Sensors and Actuators A 33, 129 (1996)
- [7] U. Hartmann, Schwache Magnetfelder in Nanostrukturen, Spectrum der Wissenschaft Dezember, 100 (1999)
- [8] P. Pitzius und U. Hartmann, Superleitung, Gravitationswellen und Tumore – Magnetfelder an der Grenze des Messbaren, Magazin Forschung 2, 3 (2000)
- [9] [www.uni-saarland.de/fak7/hartmann/sensor/TrafficSensor.pdf](http://www.uni-saarland.de/fak7/hartmann/sensor/TrafficSensor.pdf)
- [10] [www.ims.fhg.de/datenblaetter/magnetfeldsensorik](http://www.ims.fhg.de/datenblaetter/magnetfeldsensorik)
- [11] [www.semiconductors.philips.com](http://www.semiconductors.philips.com)
- [12] M. J. Caruso, T. Bratland, C. H. Smith und R. Schneider, Anisotropic Magnetoresistive Sensors Theory and Applications, Sensors 16, März, 1 (1999)
- [13] P. Ciureanu und S. Milldelhoek, Thin Film Resistive Sensors (Institute of Physics Publishing, New York, 1992)
- [14] M. J. Caruso, T. Bratland, C. H. Smith und R. Schneider, A New Perspective on Magnetic Field Sensing, Sensors, Dezember, 34 (1998)
- [15] Sensors, Band 5: Magnetic Sensors, R. Boll und K.J. Overshaft (Hrsg.), (VCH, Weinheim, 1989)