

Magnetosensorische Erfassung von Verkehrsströmen

Prof. Dr. U. Hartmann

Fachrichtung Experimentalphysik der Universität des Saarlandes

Postfach 151150, 66041 Saarbrücken

<http://www.uni-saarland.de/fak7/hartmann>

E-Mail: u.hartmann@mx.uni-saarland.de

Tel. 0681-302-3798

Fax 0681-302-3790

Magnetosensorische Erfassung von Verkehrsströmen

Kurzbeschreibung

Die Erfassung von Verkehrsströmen ist eine wichtige Voraussetzung zur Aufrechterhaltung und Optimierung unserer Mobilität und unseres Warenverkehrs. Verkehrsströme treten im Straßen- und Schienenverkehr genauso auf wie in der Schifffahrt und im Luftverkehr. Die Erfassung einzelner Verkehrsteilnehmer und die darauf basierende Analyse des Verhaltens der Verkehrsströme ist Voraussetzung für eine Optimierung der Effizienz durch Steuerung der Verkehrsströme. Die Steuerung wiederum beeinflusst die Entwicklung des Verkehrsstroms in Form einer geschlossenen Rückkopplungsschleife.

An entscheidender Stelle dieser Rückkopplungsschleife, nämlich bei Erfassung der Verkehrsteilnehmer, benötigt man Sensoren, die es im einfachsten Fall erlauben, die bloße Anwesenheit des Verkehrsteilnehmers zu detektieren. Im Allgemeinen sind jedoch weitere Informationen erwünscht, wie beispielsweise die Fahrtrichtung, die Geschwindigkeit oder sogar die Identifikation einer bestimmten Kategorie von Verkehrsteilnehmern. Obwohl hier die unterschiedlichsten Erfassungsmöglichkeiten, wie Kamerasysteme, Radar, Infrarotsensoren, Ultraschallsensoren oder Induktionsschleifen grundsätzlich zur Verfügung stehen, sind bislang die Möglichkeiten zur Erfassung von Verkehrsströmen auf Grund technischer Probleme oder zu hoher Kosten erstaunlich stark eingeschränkt. Dies gilt sogar für außerordentlich sicherheitsrelevante Bereiche, wie Flughäfen. So entstehen nicht nur Kosten von volkswirtschaftlicher Dimension durch die ineffiziente Entwicklung von Verkehrsströmen sondern auch erhebliche Sicherheitsrisiken, die allein im Flugverkehr zu mehreren hundert Zwischenfällen pro Jahr auf dem Vorfeld von Flughäfen führen.

Gegenstand der beschriebenen Innovation ist die Entwicklung eines Erfassungssystems, welches den „magnetischen Fingerabdruck“ eines Verkehrsteilnehmers erfasst und somit Informationen über die Anwesenheit, die Fahrtrichtung, die Geschwindigkeit und sogar eine Kategorie des Verkehrsobjektes liefern kann. Das System basiert auf der Verwendung von äußerst kostengünstigen Sensoren. Die Kombination dieser Sensoren mit einer speziellen Auswertelektronik und einem mathematischen Erfassungsalgorithmus ermöglicht es, Verkehrsteilnehmer auf Grund der durch sie verursachten geringfügigen Verzerrung des Erdmagnetfeldes sicher über eine Entfernung von einigen Metern nachzuweisen. Dabei sind die Gesamterfassungssysteme nicht nur leistungsfähiger sondern auch kostengünstiger als alle bisher bekannten Erfassungssysteme.

Im Rahmen der Entwicklung wurde die Leistungsfähigkeit des Systems anhand der Erfassung von Verkehrsströmen auf Autobahnen, Landstraßen und im Innenstadtbereich demonstriert. Zudem wurde demonstriert, dass sich die Stellplatzbelegung in Parkhäusern sowie auch auf unüberdachten Parkplätzen erfassen und effizient steuern lässt. Einsatzmöglichkeiten im Bereich des Schienen- und Schiffsverkehrs konnten ebenfalls experimentell erfolgreich demonstriert werden. Gegenwärtig wird im Rahmen eines von der EU geförderten Projektes untersucht, inwieweit sich das magnetosensorische Erfassungssystem zur Überwachung des Vorfeldes von Flughäfen eignet.

Magnetosensorische Erfassung von Verkehrsströmen

1. Einleitung

Mobilität ist ein Grundbedürfnis der Menschheit. Verkehrsströme ermöglichen nicht nur den Menschen, Arbeitsplätze aufzusuchen, zu reisen, zu kommunizieren oder sich zu erholen, sondern sind natürlich auch die Grundlage für die Erbringung von Dienstleistungen und den Austausch von Waren. Verkehrsströme treten allgemein im Straßenverkehr, im Schienenverkehr, im Schiffs- und im Flugverkehr auf. Besonders im Straßenverkehr ist festzustellen, dass Verkehrsströme in ihrer Entwicklung komplexen Abläufen folgen und dementsprechend ihre mathematische Behandlung und Vorhersage außerordentlich kompliziert ist. Gerade auf Grund der Zunahme des weltweiten Verkehrs erfordert die Aufrechterhaltung der Mobilität sowie ihre Optimierung im Hinblick auf eine gesteigerte Effizienz und Sicherheit eine intelligente Steuerung von Verkehrsflüssen. Dies gilt für den Straßenverkehr genauso wie für das Vorfeldmanagement von Flughäfen, welches unter Wahrung von Sicherheitsgesichtspunkten zur Minimierung von Verzögerungen bei Start und Landungen führen soll. Auch im Bahnverkehr und sogar im Schiffsverkehr, beispielsweise beim Betrieb von Schleusen, müssen natürlich Verkehrsströme kontrolliert und gesteuert werden.

Am Anfang der Erfassung von Verkehrsströmen stehen geeignete Sensoren, die es erlauben, einen Verkehrsteilnehmer zu erfassen. Heute stehen uns die unterschiedlichsten Sensoren zur Erfassung von Verkehrsobjekten zur Verfügung, die aber, wie in Tabelle 1 dargestellt, häufig technische Limitierungen für ihren Einsatz sowie insbesondere auch Limitierungen unter Kos-

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

Tabelle 1:

Zur Detektion von Fahrzeugen eingesetzte Sensoren und Nutzungseinschränkungen

tengesichtspunkten mit sich bringen. Den idealen Sensor zur Erfassung von Straßenfahrzeugen, Schienenfahrzeugen, Schiffen oder Flugzeugen gibt es bislang in keinem Fall.

Im Bereich des Straßenverkehrs verfolgt die Erfassung der Fahrzeuge verschiedene Ziele. Im einfachsten Fall sollen Lichtsignale gesteuert werden. Dies geschieht, wenn überhaupt, in den meisten Fällen dezentral, indem über eine Induktionsschleife die Anwesenheit eines Fahrzeugs vor einer Ampel erfasst wird und die Lichtsignalanlage dann über einen logischen Ablauf gesteuert wird. Eine solche Steuerung reduziert unnötige Wartezeiten, beispielsweise bei niedrigen Verkehrsflüssen.

Straßenfahrzeuge werden auch erfasst zum Zwecke der Zählung. Auf diese Weise werden beispielsweise Verkehrsbelastungen analysiert. Die Zählung umfasst in aller Regel eine Einteilung der erfassten Fahrzeuge in verschiedene Kategorien (5 oder auch 9). Auch in diesem Fall erfolgt die Erfassung über im Straßenbelag verlegte Induktionsschleifen. Aus der Dichte des Verkehrsstroms und der Geschwindigkeit der Verkehrsteilnehmer lässt sich auf die Bildung von Staus schließen. Dies ermöglicht zum einen eine Information der Verkehrsteilnehmer über die Staubildung und zum anderen, wenn entsprechende Vorrichtungen vorgesehen sind, auch eine aktive Beeinflussung des Verkehrsstroms über Lichtsignalanlagen, entsprechende Verkehrsnachrichten oder durch Interaktion mit dem persönlichen Satellitennavigationssystem im Sinne einer „dynamischen“ Navigation. Mittels einer geschlossenen Rückkopplung, Erfassung, Interpretation, Information und Steuerung lässt sich dann im Idealfall der Verkehrsfluss optimieren.

Flächendeckend kommen im Straßenverkehr heute ausschließlich im Belag verlegte Induktionsschleifen zum Einsatz. Diese sind zwar vergleichsweise kostengünstig, insofern aber problematisch als ihre Lebensdauer beschränkt ist und das Einfügen in die Fahrbahn ein Absperren der Straße erfordert. Eine Unterbringung unter der Fahrbahn, wie sie insbesondere bei Autobahnen wünschenswert wäre, hat sich als nicht praktikabel erwiesen. Zudem ist der Einsatz von Induktionsschleifen in einigen Bereichen auch technisch äußerst problematisch, beispielsweise wenn größere Metallvolumina in der Nähe sind. Dies ist der Fall bei Stahlarmierungen in Gebäuden. Die Unterscheidung von Fahrzeugen mittels induktionsschleifenbasierender Systeme erfordert einen gewissen Aufwand und ist daher nicht immer vorgesehen, auch nicht in Fällen, wo sie wünschenswert wäre. Vorstellbar wäre hier beispielsweise eine intelligentere Nutzung von Busspuren oder die Steuerung von Signalanlagen speziell für öf-

fentliche Verkehrsmittel, die natürlich von sonstigen Fahrzeugen unterschieden werden müssten.

Wünschenswert wäre insgesamt im Bereich des Straßenverkehrs die Verfügbarkeit von Sensoren, die kostengünstig sind und unter, neben oder über der Fahrbahn sowie auch im Fahrbahnbelag deponierbar sind und bei hoher Lebensdauer eine witterungsunempfindliche Erfassung gewährleisten. Dies würde nicht nur eine nachhaltige Lösung der genannten Probleme realisierbar machen sondern auch zusätzliche Anwendungsbereiche im Straßenverkehr erschließen.

Im Schienenverkehr ist ein ungelöstes Problem die kostengünstige und umfangreiche Überwachung von Bahnübergängen. Im Schifffahrtsbereich ist eine konkrete Anwendung die Überwachung von Schleusen, der derzeit eine hohe Relevanz zukommt, weil auch Schleusen für den gewerblichen Schifffahrtsverkehr quasi flächendeckend automatisiert werden sollen. Im Folgenden wird auf die zuletzt genannten Anwendungsbereiche nicht weiter eingegangen, jedoch sollte betont werden, dass die Relevanz der beschriebenen Erfindung auch in diesen Bereichen demonstriert wurde.

Im Flugverkehr treten erhebliche Verkehrsströme auf engstem Raum auf dem Vorfeld von Flughäfen auf. Das Vorfeldmanagement umfasst die Koordination von Starts und Landungen, aber auch die Verwaltung von Parkpositionen und die gesamte Logistik. Dies bedeutet, dass auf dem Vorfeld eine komplexe Koexistenz von Flugzeugen, Straßenfahrzeugen und Personenverkehr herrscht. Es mag damit nicht überraschen, dass es pro Jahr bei steigender Tendenz zu mehreren hundert Zwischenfällen, an denen Flugzeuge beteiligt sind, auf dem Vorfeld von Flughäfen kommt. Tabelle 2 gibt hier einen Überblick für den FAA-Überwachungsbereich [www.airlinesafety.com]. Einer der schwersten Zwischenfälle ereignete sich am 8.10.01 auf dem Mailänder Flughafen Linate. Gerade dieser Zwischenfall, der genauestens analysiert wurde [www.airlinesafety.com], zeigt, dass eine verbesserte Überwachung des Vorfeldes zu einer drastischen Erhöhung der Sicherheit führen könnte.

Neben der Sicherheitsrelevanz der Vorfeldüberwachung gilt es, den Flugverkehr möglichst effizient abzuwickeln, was bedeutet, dass die Summe der Verzögerungen bei Starts und Lan

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

dungen zu minimieren ist. Die Kosten, die gegenwärtig durch Wartezeiten entstehen, sind gewaltig und machen das Fliegen teuer sowie unnötig umweltschädlich.

Die genannten Gründe für eine umfassende Überwachung des Vorfeldes von Flughäfen haben besonders bei großen Flughäfen, wie etwa Frankfurt, zur Installation einer umfangreichen Überwachungstechnik geführt. Diese umfasst Bodenradarsysteme sowie auch Videokameras. Diese Systeme sind jedoch nicht umfassend einsetzbar auf Grund technischer Limitierungen, auf Grund ihrer Witterungsabhängigkeit und auf Grund mit der Installation verbundener, zum Teil enorm hoher Kosten. Deshalb kommt der direkten Beobachtung des Vorfeldes durch die Fluglotsen eine essentielle Bedeutung zu. Bei mittleren und kleineren Flughäfen ist diese direkte Beobachtung teilweise einzige Grundlage der Vorfeldüberwachung, was wiederum zur Folge hat, dass häufiger als nötig witterungsbedingte Flugausfälle auftreten.

Wünschenswert wäre ein System zur Vorfeldüberwachung von Flughäfen, welches witterungsunabhängig in Bereichen des Vorfeldes, die bislang technisch oder aus Kostengründen nicht überwachbar sind, alle Bewegungen von Flugzeugen oder Bodenfahrzeugen detektiert. Insbesondere sind von Bedeutung neuralgische Punkte, wie Haltelinien auf „Taxiways“, also Zubringern zu den Start- und Landebahnen.

Grundlage des im Folgenden beschriebenen Systems zur Erfassung von Verkehrsteilnehmern ist die Tatsache, dass jedes Objekt, welches entweder magnetisch permeabel oder selbst remanent magnetisiert ist oder in dem elektrische Ströme fließen, lokal das Magnetfeld der Erde in Bezug auf Richtung und Stärke beeinflusst. Diese Beeinflussung, die bei der hier beschriebenen Problematik im Allgemeinen nur wenige Prozent der absoluten Größe des Erdmagnetfeldes beträgt, nimmt sehr schnell bei einer Entfernung vom Objekt ab, ist aber in genügend

geringer Entfernung zum Objekt (im so genannten Nahfeld) quasi ein „magnetischer Fingerabdruck“ des Objektes. Magnetischer Fingerabdruck bedeutet hierbei, dass die Variationen des Erdmagnetfeldes in der nahen Umgebung des Verkehrsobjektes die Konturen der magnetisch permeablen Teile, aber auch die Konturen remanent magnetisierter Bestandteile und elektrischer Komponenten widerspiegeln. Aus diesem Grund besitzt jedes Straßenfahrzeug, Schienenfahrzeug, Schiff oder Flugzeug seinen eigenen individuellen magnetischen Fingerabdruck, der sich sogar von dem von Objekten desselben Typs, also etwa desselben Automodells unterscheidet. Wir konnten zeigen, dass es Charakteristika gibt, die bestimmte Kategorien von Verkehrsobjekten besitzen (also etwa alle Busse) und dass es individuelle Charakteristika gibt, die jedes Objekt einmalig machen.

Magnetfelder lassen sich heute außerordentlich empfindlich mittels magnetoresistiver Elemente messen. Diese Elemente ändern ihren elektrischen Widerstand unter dem Einfluss eines äußeren Magnetfeldes [U.Hartmann (Hrsg.), *Magnetic Multilayers and Giant Magnetoresistance* (Springer, Berlin, 2000)]. Das eigentliche Hauptanwendungsfeld magnetoresistiver Elemente ist der Einsatz in Festplatten-Schreib-/Leseköpfen als Leseelement. Für diesen Anwendungszweck werden die Elemente millionenfach produziert und sind damit entsprechend kostengünstig. Bei kommerziellen Elementen, die in Form von Wheatstone-Brückenanordnungen verfügbar sind, ist die Empfindlichkeit ausreichend, um Bruchteile des Erdmagnetfeldes zu erfassen. Zur Erfassung der vektoriellen Komponenten eines Magnetfeldes können jeweils drei orthogonale Sensoren eingesetzt werden.

Für die Anwendungen der Sensoren zur Erfassung von Verkehrsflüssen ist es erforderlich

- das Gesamterfassungssystem so empfindlich zu machen, dass die Objekte über eine Entfernung von einigen Metern erfassbar sind,
- dass größere Störungen, die im Allgemeinen ein Vielfaches des Nutzsignals betragen, intelligent diskriminiert werden,
- dass das Erfassungssystem über einen großen Bereich witterungs- und insbesondere temperaturunabhängig gemacht wird,
- dass die Informationen über das erfasste Magnetfeld und seine zeitlichen Veränderungen in einer Form zur Verfügung gestellt werden, die für den Zweck der Erfassung des Verkehrsteilnehmers geeignet ist,
- dass die Gesamtlösung hinreichend kostengünstig ist.

Die genannten Anforderungen wurden in Form des im Folgenden spezifizierten Ansatzes für straßengebundene Verkehrsflüsse und für das Vorfeld von Flughäfen erfüllt und die Verifikation in Form einer zum Teil großen Ansammlung experimenteller Daten durchgeführt.

2. Experimenteller Ansatz

Zunächst wurden die Eigenschaften kommerziell erhältlicher Magnetowiderstandselemente (anisotrop [AMR] und zwischenschichtgekoppelt [GMR]) untersucht. Die Messungen ergaben keine signifikanten Unterschiede in der Empfindlichkeit zwischen den AMR- und GMR-Varianten, wohl allerdings enorme Streuungen identischer Bauelemente. Die Kennlinien erwiesen sich erwartungsgemäß als nichtlinear und Temperaturschwankungen von nur 1°C erzeugten Signalvariationen, die bei weitem das Nutzsignal überstiegen. Darüber hinaus zeigten Testmessungen, dass in den meisten Anwendungsfeldern Störsignale - etwa durch Bahntrassen, die in einigen Kilometern Entfernung vom Messort verliefen, durch Armierungsstähle in Gebäuden oder sonstige Stahlkomponenten und durch Verkehrsobjekte, die nicht erfasst werden sollten, - zunächst die sichere Erfassung von Straßenfahrzeugen und Flugzeugen ausschloss. Folgende Maßnahmen wurden ergriffen, um die Probleme zu lösen:

- Die Sensoren werden im „Flux-locked-loop-Modus“ betrieben, der das Magnetfeld, dem gegenüber ein Sensor exponiert ist, mittels Hilfsfeldern konstant hält.
- Die Auswertelektronik erfasst permanent das Umgebungsfeld, dem ein Sensor ausgesetzt ist, wenn kein zu erfassendes Objekt in der Nähe ist und definiert dies als lokales „Nullfeld“.
- Transiente Störungen werden eliminiert durch eine gradiometrische Anordnung der Sensoren (Subtraktion der Signale zweier benachbarter Sensoren) und durch Abschirmung mit hochpermeablen Materialien.

Durch die genannten Maßnahmen war es möglich, Sensormodule zu konzipieren, die nicht nur zwischen Nutzsignal und Störungen diskriminieren, sondern auch die entsprechenden Daten über ein detektiertes Objekt in Form geeigneter analoger oder digitaler Signale zur Verfügung stellen. Die Art der Signale hängt vom jeweiligen Verwendungszweck des Sensormoduls ab. Neben der sensitiven analogen Verstärkerelektronik beinhalten die Sensormodule Digital-Analog- und Analog-Digital-Wandler, eine mikroprozessorbasierte Auswerteeinheit sowie geeignete Schnittstellenkomponenten zur Adaptierung an Anzeigeeinstrumente, Auswerterechner, Bussysteme (zum Betrieb einer großen Anzahl von Sensoren) und zur drahtlosen Datenübermittlung. In aller Regel beinhaltet ein Sensormodul orthogonal angeordnete Senso

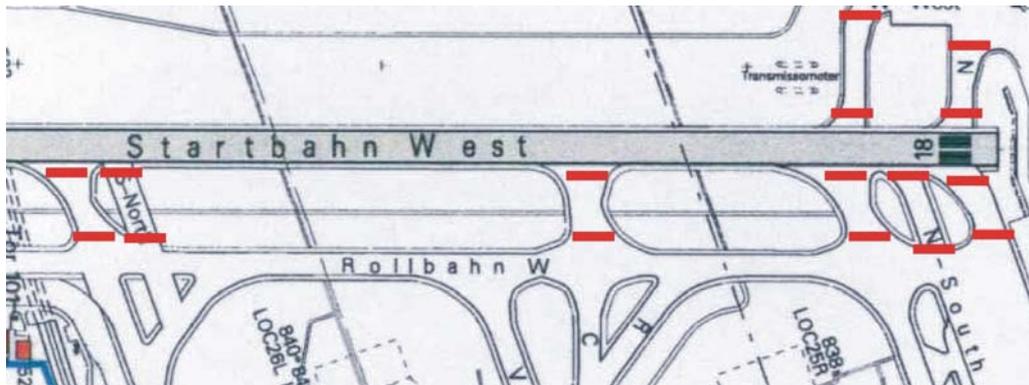


Abbildung 1:

Dreiaxsiges Sensormodul zur Erfassung von Straßenfahrzeugen oder Flugzeugen, ihrer Fahrtrichtung und Geschwindigkeit. Links ist der innere Aufbau erkennbar und rechts die gesamte Anordnung in einem Gehäuse für Testmessungen. Die Anordnungen werden in Kleinserie durch einen Kooperationspartner gefertigt (Votronic GmbH, St. Ingbert).

ren zur Erfassung der Feldkomponenten in allen drei Raumrichtungen sowie in einer Raumrichtung zwei in einem definierten Abstand angeordnete Sensoren zur Erfassung von Geschwindigkeiten. Ein solches Modul zeigt Abbildung 1. Die Empfindlichkeit der Module liegt typischerweise bei einem Hundertstel des Erdmagnetfeldes (bei manchen Anwendungen auch darunter). Die Anzahl der Messungen, die pro Sekunde durchgeführt werden, liegen je nach Anwendung bei einigen bis hin zu vielen Tausend (z. B. zur Geschwindigkeitserfassung auf Autobahnen).

Für die im Folgenden beschriebenen Versuche wurden hauptsächlich mobile Systeme in Kombination mit einer laptopgestützten Auswertung eingesetzt. Stationäre Systeme sind an der Autobahn A8 in Höhe der Autobahnabfahrt St. Ingbert Mitte und im Innenstadtbereich der Stadt St. Ingbert vorhanden. Der Einbau stationärer Systeme ist darüber hinaus im Rahmen des durch den Autor koordinierten EU-Forschungsprojekts „ISMAEL“ (www.ismael-project.net) auf den Flughäfen Saarbrücken, Tessaloniki (Griechenland) und Frankfurt (siehe Abbildung. 2) geplant.

3. Experimentelle Ergebnisse und Diskussion

Zur Erfassung der durch Straßenfahrzeuge ausgelösten Magnetfeldprofile wurden einige tausend Messungen an Autobahnen sowie im Bereich von Straßen innerhalb und außerhalb von Städten durchgeführt. In vielen dieser Messungen wurden neben den Magnetfeldprofilen zeit

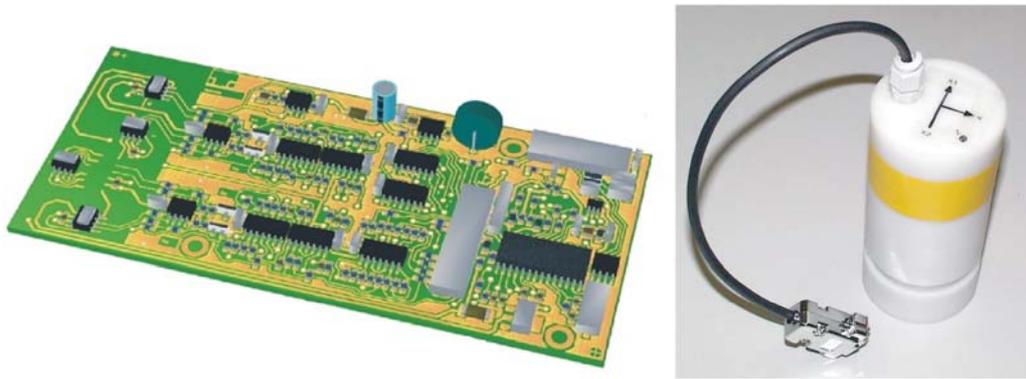


Abbildung 2:

Vorfeld des Frankfurter Flughafens mit Markierung der vorgesehenen Positionen von Magnetfeldsensoren zur Überwachung von Haltelinien.

gleich auch automatisch Videoerfassungen mittels CCD-Kameras durchgeführt, um die Magnetfeldprofile direkt in Bezug zu Fahrzeugtypen setzen zu können. Abbildung 3 zeigt ein repräsentatives Resultat, aus dem klar ersichtlich ist, dass es, wie zu erwarten, signifikante Unterschiede im magnetischen Fingerabdruck für unterschiedliche Fahrzeugklassen gibt. Diese Unterschiede können dann zur automatischen Erkennung der Fahrzeugklasse mittels eines entsprechenden Identifikationsalgorithmus genutzt werden.

Ähnlich klare Magnetfeldprofile wie die in Abbildung 3 dargestellten ergaben sich auch für die Überwachung von Stellplätzen auf freien Parkplätzen sowie in Parkhäusern. Hier konnte

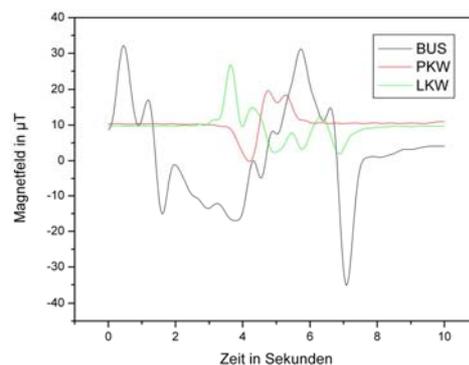


Abbildung 3:

Magnetfeldprofile für einen PKW, einen LKW und einen Bus, aufgenommen bei Positionierung des Magnetfeldsensors unter der Fahrbahn.

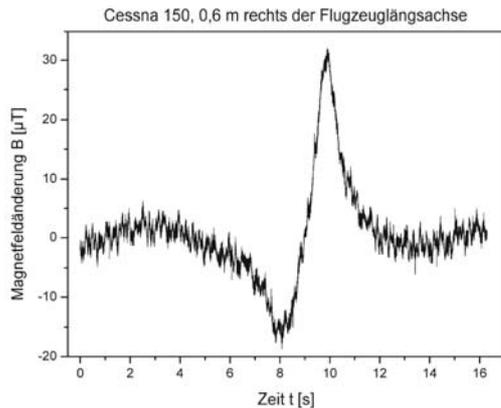


Abbildung 4:

Magnetfeldprofil einer Cessna 150 bei langsamer Vorbeifahrt und einer Entfernung von 0,6 m von der Symmetrieachse des Flugzeugs in Höhe des Bodens.

sogar gezeigt werden, dass die Erfassung problemlos durch die Zwischendecke von Parkhäusern erfolgen kann. Dies lässt einen Einsatz der Magnetfeldsensoren im Rahmen intelligenter Parkleitsysteme sowie auch zur Steuerung von Schrankenanlagen viel versprechend erscheinen (siehe Anhang).

Zur Detektion von Flugzeugen und Straßenfahrzeugen auf dem Vorfeld von Flughäfen wurden bislang Messungen auf den Flughäfen Frankfurt, Saarbrücken und Zweibrücken durchgeführt. Dabei ging es darum, zunächst einmal überhaupt nachzuweisen, dass Flugzeuge, die in einer Entfernung von einigen Metern an dem Sensor vorbeierrollen, magnetisch detektiert werden können. Die Frage nach der grundsätzlichen Nachweisbarkeit stellt sich insbesondere, da Flugzeuge nur wenige Komponenten aus ferromagnetischen Materialien aufweisen und in aller Regel der Sensor nicht sehr nahe an den Flugzeugen positioniert werden kann. Abbildung 4 zeigt ein Magnetfeldprofil für eine „Cessna 150“, die von Hand an dem Sensor vorbeigezogen wurde. Diese Art der Bewegung wurde gewählt, um die Signale nicht durch ein Zugfahrzeug oder durch die Vibration des Flugzeugmotors zu verfälschen. Damit waren die Bedingungen aus Sicht des Nachweises denkbar ungünstig, da es sich um ein kleines Flugzeug ohne Zugfahrzeug und ohne laufende elektrische Aggregate handelte. Dennoch konnte sicher ein magnetischer Fingerabdruck erfasst werden. Weitere Messungen zeigten, dass Standardflugzeuge des Passagier- und Frachtflugverkehrs (Jets, Turboprop, Propeller) auf Taxiways sicher erfasst werden können. Bei Großflugzeugen, wie etwa der Boeing 747, gelingt die Erfassung sogar über vergleichsweise große Entfernungen (siehe Anhang).

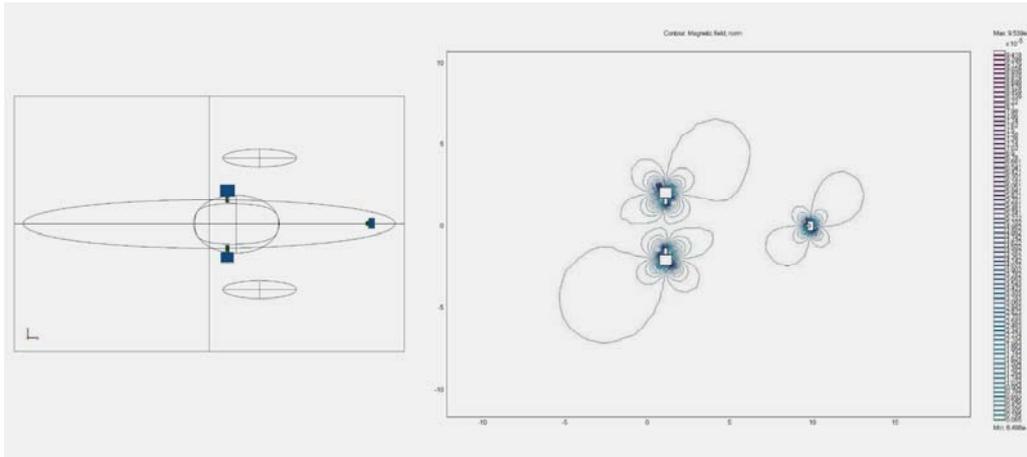


Abbildung 5:

Simulation des Magnetfeldes in der Umgebung einer Boeing 737. Die linke Abbildung zeigt, welche Komponenten des Flugzeuges als magnetisch permeabel angenommen wurden. Die rechte Abbildung zeigt das Ergebnis einer finiten Elementerechnung.

Eine Identifikation von Flugzeugkategorien über die aufgenommenen Magnetfeldprofile wäre durchaus wünschenswert, setzt aber voraus, dass sich an Hand der Profile eindeutige Charakteristika für jede Kategorie nachweisen lassen. Da es nicht möglich ist, jeden relevanten Flugzeugtyp in Bezug auf jede Sensorposition und Entfernung umfassend zu vermessen, wurde damit begonnen, Magnetfeldprofile für die einzelnen Flugzeugtypen mittels Finite-Elemente-Rechnungen zu simulieren. Ausgangspunkt für diese komplexen Rechnungen sind Konstruktionszeichnungen der einzelnen Flugzeuge unter Berücksichtigung der für die einzelnen Flugzeugkomponenten verwendeten Materialien. Diese Materialien müssen wiederum pauschal durch ihre magnetischen Eigenschaften (insbesondere Permeabilität) beschrieben werden. Darüber hinaus kann die Verteilung elektrischer Ströme mit einbezogen werden.

Bedauerlicherweise ist es teilweise schwierig, wenn nicht unmöglich, von Flugzeugherstellern genaue Informationen über Konstruktion und verwendete Materialien zu erhalten. Dennoch konnten wir für einige Standardflugzeugtypen entsprechenden Modellrechnungen durchführen, die wichtige Informationen darüber liefern, wo die idealen Sensorpositionen zu erwarten sind und wie stark sich einzelne Flugzeugtypen unterscheiden. Abbildung 5 zeigt entsprechende Ergebnisse für eine Boeing 737.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden maßgeschneiderte Module zur Erfassung des magnetischen Fingerabdrucks von Straßenfahrzeugen, Schienenfahrzeugen, Schiffen und Flugzeugen konzipiert und in Kleinserien hergestellt. Die bislang durchgeführten Messungen zeigen, dass sich Verkehrsströme sicher erfassen lassen und dass in vielen Fällen zusätzliche Informationen über Bewegungsrichtung, Geschwindigkeit und Kategorie des entsprechenden Objektes gewonnen werden können. Damit sind die magnetosensorischen Systeme geeignet für eine umfassende Anwendung, womit die Grundlage für eine effiziente Steuerung von Verkehrsströmen im Straßenverkehrsbereich und im Vorfeldbereich von Flughäfen gelegt wurde. Der Einsatz der neuen Systeme wird zur Senkung von Kosten und zur Erhöhung von Sicherheitsstandards führen.

Für den Straßenverkehrsbereich wurden bereits Grundlagen für eine Kommerzialisierung durch Kooperation mit zwei mittelständischen Unternehmen (Votronic, St. Ingbert und VMW, Diez/Lahn) gelegt. Der Einsatz auf Flughäfen wird zur Zeit im Rahmen eines von der EU geförderten und gemeinsam mit sieben industriellen europäischen Partnern durchgeführten Projekts (www.ismael-project.net) analysiert. Daneben werden die Untersuchungen von der Deutschen Flugsicherheit und von der Fraport AG unterstützt und als viel versprechend gewertet.

Zukünftig soll mittels numerischer Methoden in allen Bereichen die Magnetfelderzeugung simuliert und die optimale Sensorposition automatisch berechnet werden. Darüber hinaus sollen umfassende Erkenntnisse zur Spezifität des magnetischen Fingerabdrucks gesammelt werden, um nicht nur grobe Kategorien von Verkehrsteilnehmern zu identifizieren, sondern um möglichst spezifische Informationen, wie z. B. die Anzahl der Achsen, den Beladungszustand eines Straßenfahrzeugs oder die genaue Baureihe eines Flugzeugtyps zu erhalten. Ganz konkret ist derzeit die Ausstattung des Parkhauses der Universität des Saarlandes (mehr als 1000 Stellplätze) mit Sensoren zur Stellplatzüberwachung geplant, um zu demonstrieren, dass sich auf diese Weise effiziente Parkleitsysteme realisieren lassen.

Anlage

Berichte in Tageszeitungen und Zeitschriften:

März 2001	Handelsblatt
April 2001	LPT-Nachrichten
April 2001	pte-online
April 2001	Spektrum der „wissenschaft-online
April 2001	Bild der Wissenschaft online
April 2001	Saarbrücker Zeitung
Juni 2001	Campus
Oktober 2001	Physikalische Blätter
November 2001	Saarbrücker Zeitung
April 2002	ZPT-Nachrichten
Juni 2002	ZPT
Juli 2002	Saarbrücker Zeitung
Juli 2002	Saarbrücker Zeitung
August 2002	Südkurier
Oktober 2002	Campus
November 2002	IST
Januar 2003	Inno.vision newsletter Universität Saarbrücken
Juni 2003	ZPT
November 2003	Saarbrücker Zeitung
November 2003	Saarbrücker Zeitung
Dezember 2003	Saarbrücker Zeitung
Januar 2004	Campus
Januar 2004	Inno.vision newsletter Universität Saarbrücken
Juni 2004	Geo
Juli 2004	W+S
Juli 2004	planet-online
August 2004	ZPT
August 2004	bild der wissenschaft