

# **Messplattform zur Verifikation der elektromagnetischen Sicherheit in Elektrofahrzeugen**

Christof Wehrmann, Meinhard Schilling

Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik, Technische  
Universität Braunschweig, Braunschweig  
Tel.: +49 (0) 531 - 391 3856, e-mail: c.wehrmann@tu-bs.de

## **Kurzfassung**

Durch die steigende Anzahl an Fahrzeugen mit Elektroantrieb in Deutschland und Europa wird zukünftig die Thematik der elektromagnetischen Sicherheit eine immer wichtigere Rolle einnehmen. Diese befasst sich vor allem mit dem Einfluss von elektromagnetischen Feldern im niederfrequenten Bereich auf biologische Zellen. Im Rahmen des EU Projektes „EM-Safety“ wurde dazu eine Messplattform zur Verifikation der elektromagnetischen Sicherheit in Fahrzeugen, speziell in Elektrofahrzeugen, entwickelt und in Betrieb genommen. Die Randbedingungen des Projekts, die Realisierung der Messplattform und die zukünftigen Anwendungen werden in kurzer Form erläutert.

## **1 Einleitung**

Konventionelle mit Verbrennungsmotor ausgestattete Fahrzeuge sollen in Zukunft immer mehr durch Fahrzeuge mit Elektroantrieb abgelöst werden. Dies soll nicht nur die allgemeine Umweltbelastung reduzieren, sondern vor allem in Ballungsräumen Lärm und Schmutz durch z.B. Rußpartikel vermeiden. Elektromobilität stellt für die Zukunft eine CO<sub>2</sub>-freie Alternative zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor dar, solange sie mit Energie aus erneuerbaren Energien betrieben wird. Dabei könnten Elektrofahrzeuge in Zukunft auch als mobile Energiespeicher dienen [1]. Diesbezüglich ergeben sich neue, bisher nicht betrachtete Forschungsthemen, wie die Exposition biologischer, speziell menschlicher, Zellen durch von Elektrofahrzeugen erzeugte elektromagnetische Felder. Abhängig

von der Größe und Frequenz des Feldes, kann die Exposition im elektromagnetischen Feld sowohl biologische Systeme als auch elektronische Bauelemente beeinflussen.

Zu dieser Thematik wurde im Zeitraum Mai 2011 bis April 2014 das Forschungsprojekt „*EM safety and Hazards Mitigation by proper EV design*“ im EU-FP7-Programm durchgeführt [2]. Das Projekt verfolgt das Ziel, durch Untersuchung der Sicherheit von Elektrofahrzeugen bezüglich elektromagnetischer Felder und durch vorbeugende Maßnahmen zur Vermeidung der Grenzwertüberschreitung das Vertrauen der Öffentlichkeit zu erhalten. Schwerpunkte sind deshalb die Implementierung von Vermeidungspraktiken für elektromagnetische Felder, basierend auf Designrichtlinien für Elektrofahrzeuge und der Aufbau einer flexibel einsetzbaren Messplattform, zur Messung und Untersuchung der elektromagnetischen Sicherheit in Elektrofahrzeugen. Das EMG übernahm hierbei den Projektteil zum Aufbau, Test und Inbetriebnahme der Messplattform.

## 2 Anforderungen

Zur Messung elektromagnetischer Felder gibt es eine Vielzahl von kommerziell erhältlichen Messgeräten, welche allerdings meist nur mit einer oder zwei Messsonden zur Messwertaufnahme arbeiten.

Gefordert war ein modular aufgebautes, erweiterbares Messsystem mit einer Mehrkanal-Datenaufnahme für 3D-Magnetfeldsensoren und mobiler Energieversorgung. Die Mindestanzahl an Sensorkanälen soll die Anzahl von 12 Kanälen für vier 3D-Magnetfeldsensoren nicht unterschreiten. Dabei kommen Magnetfeldsensoren für den unteren Frequenzbereich (DC – 10 kHz) zum Einsatz, da im niederfrequenten Bereich der Einfluss auf biologische Objekte über Wirkung auf das Nervensystem als besonders kritisch erachtet wird. Höhere Frequenzen bis in den MHz-Bereich haben dagegen überwiegend eine Erwärmung des Körpers zufolge [1]. Es soll möglich sein, die Sensoren an verschiedenen Positionen im Inneren des Fahrzeugs anzubringen, wobei durch Erweiterung auf 28 Kanäle die Anzahl der Messpositionen entsprechend erhöht werden kann.

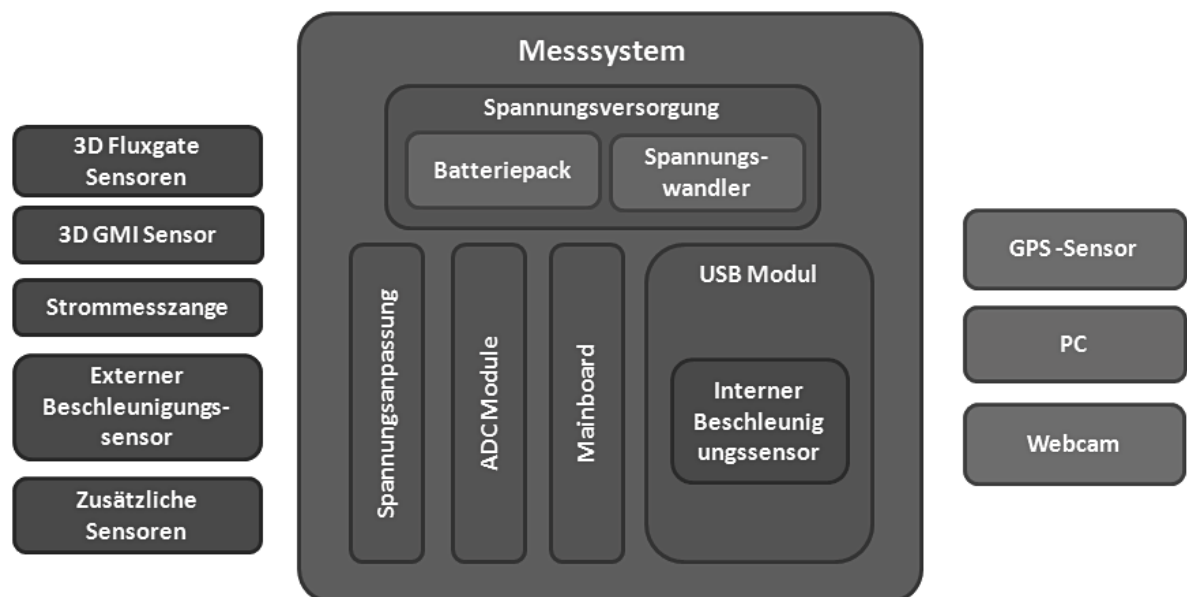
Weiterhin sollen zusätzliche Sensoren zur Erfassung von Beschleunigung und Stromfluss genutzt und in das Messsystem integriert werden. Derzeitig existiert

kein kommerziell erhältliches Messsystem mit den oben genannten Anforderungen und der Möglichkeit durch eine modulare Bauweise auch andere Sensoren und Sensortypen anzuschließen. So kann der vom Projektpartner *TAMAG* entwickelte Magnetfeldsensor mit GMI (Giant Magneto Impedance) Technologie [3] ebenfalls an dem Messsystem betrieben werden.

Die Auswertung der gemessenen Werte erfolgt nach den ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) Richtlinien [4] durch die zum Messsystem zugehörige Software. Weitere Anforderungen an die Software sind die Auswertung und Anzeige von Spektrogrammen.

### 3 Die Messplattform

Das entwickelte Messsystem ist in Abb. 1 in Form eines Blockschaltbildes dargestellt. Die wichtigsten Komponenten sind die mobile Spannungsversorgung mit Batteriepacks und den Spannungswandlern für die Anpassung der unterschiedlichen Sensoren und die A/D-Wandler Module, sowie das Mainboard für die Steuerung und Koordination der Sensorabfragen, und das USB-Modul, welches für die Kommunikation mit dem Mainboard und PC zuständig ist.



**Abb. 1:** Blockschaltbild des Messsystems zur Verifikation der elektromagnetischen Sicherheit

Im USB-Modul ist ein eigener Beschleunigungssensor eingebaut, welcher Informationen über die Beschleunigung, auch ohne weitere externe Sensoren, registriert. Weiterhin können an den PC eine Webcam und ein GPS-Sensor angeschlossen werden. Dieser GPS-Sensor kann mit der für das Messsystem entwickelten Software ausgelesen werden und in Kombination mit der Webcam und den Beschleunigungssensoren einen Rückschluss über die Fahrtgegebenheiten liefern. So kann für Messfahrten der Fahrtweg nach verfolgt und Änderungen, sowohl bei der Teststrecke als auch am Fahrzeug, dokumentiert werden.

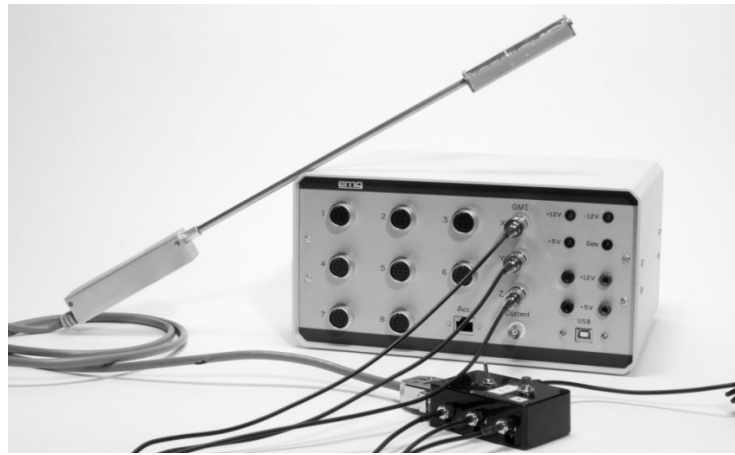
Zur Erweiterung des Messbereichs und zum Anschluss von anderen Sensoren können einzelne Module ausgetauscht werden. Besonders interessant ist dies für die Analog-Digital-Umsetzungsmodule, die z.B. mit schnelleren Analog-Digital Konvertern bestückt werden können, wenn eine höhere Samplingrate erforderlich ist. Zur Messung der niederfrequenten elektromagnetischen Felder werden neben dem GMI-Sensor des Projektpartners *TAMAG* [3], Fluxgate-Sensoren der Firma Bartington [5] verwendet. Diese sind kommerziell erhältlich und werden aufgrund ihrer guten Rauscheigenschaften in vielen Anwendungen genutzt.

Die Eigenschaften und Parameter des Messsystems sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

**Tabelle 1: Eigenschaften und Parameter des Messsystems**

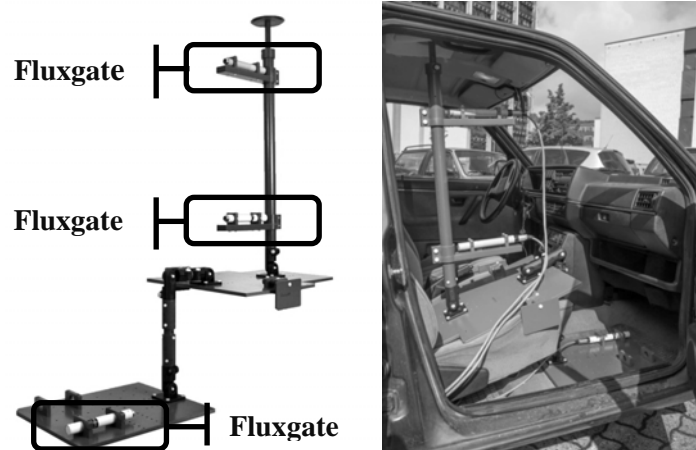
|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| Anzahl der Kanäle                 | Insgesamt 28: 24 für (8 · 3D) Fluxgate + Strommesszange + 3 für 3D GMI-Sensor                                |
| Datenaufnahme                     | Simultane Abtastung aller 28 Kanäle  |
| Abtastrate                        | Abhängig von verwendeten ADCs, momentan max. 30 kS/s bei 28 Kanälen (simultan)                               |
| Auflösung                         | 24 Bit (ENOB 20 Bit)   |
| Bandbreite                        | Limitiert durch Fluxgate Sensoren mit 3 kHz  |
| Schnittstelle zum PC              | USB 2.0  |
| Weitere Peripherie                | Zwei Beschleunigungssensoren (intern und extern der Messeinheit), GPS-Sensor via USB und eine Webcam via USB |
| Energiezufuhr                     | Akkumulatoren im Messsystem, keine weitere ext. Spannungsversorgung nötig. Durchgehende Messzeit >5 Std.     |
| Abmaße<br>(Breite · Höhe · Tiefe) | 262 mm · 138 mm · 200 mm   |

In Abb. 2 wird das Messsystem des EMG zur Messung der elektromagnetischen Sicherheit in Elektrofahrzeugen mit angeschlossenem GMI-Sensor gezeigt.



**Abb. 2:** Messsystem mit angeschlossenem GMI Sensor

Um den Einfluss auf den menschlichen Körper durch elektromagnetische Felder beurteilen zu können, müssen diese an den kritischen Positionen am Körper gemessen werden. Als Ersatz für den menschlichen Körper dient ein sogenanntes Mannequin, aus nicht leitfähigen Materialien, welches auf den Sitzen im Fahrzeug positioniert wird. So können die Sensoren u.a. in Höhe des Kopfes, des Beckens und im Fußbereich, wie in Abb. 3 gezeigt, installiert werden. Die Messplattform besteht aus dem Messsystem in Verbindung mit den Sensoren und dem Mannequin.



**Abb. 3:** Mannequin mit installierten Fluxgate-Sensoren (links), zur reproduzierbaren Messung im Fahrzeug auf dem Beifahrersitz (rechts)

## 4 Software und Evaluation

Zur Steuerung des Messsystems und zur Aufnahme der Messwerte der Sensoren dient eine eigene Bedien- und Evaluierungssoftware. Hier werden die wichtigsten Parameter, wie Sensorempfindlichkeit, Sensortyp, Spannungsbereich eingegeben und die Daten während der Messung am Monitor beobachtet und dokumentiert. Dabei werden die Daten aller 28 Messkanäle (Fluxgate, Strommesszange und GMI Sensor), sowie der Beschleunigungssensoren (extern und intern), und des GPS-Sensors grafisch dargestellt und bei Bedarf gespeichert. Die Daten der Webcam werden in einem separaten Fenster angezeigt und ebenfalls bei Bedarf gespeichert. Zur Evaluation der Daten erfolgt die Auswertung im PC und wird grafisch gemäß den ICNIRP2010 Richtlinien [4] dargestellt. Wir betrachten nur die magnetischen Beiträge, da sich die elektrischen Felder sehr einfach abschirmen lassen und im niederfrequenten Bereich nicht zur Exposition beitragen. Im Verkehr treten im Wesentlichen pulsformige und komplexe nicht sinusförmige Magnetfeldsignale auf. Deshalb sollen nach den Richtlinien [4, 7] die Expositionswerte für den Fall von als dominierende Spektrallinien gemessenen Signale  $B_j$  für den niederfrequenten Bereich auf die jeweiligen Grenzwerte  $B_{L,j}$  bezogen werden nach

$$\sum_{j=1 \text{ Hz}}^{65 \text{ kHz}} \frac{B_j}{B_{L,j}} \leq 1. \quad (1)$$

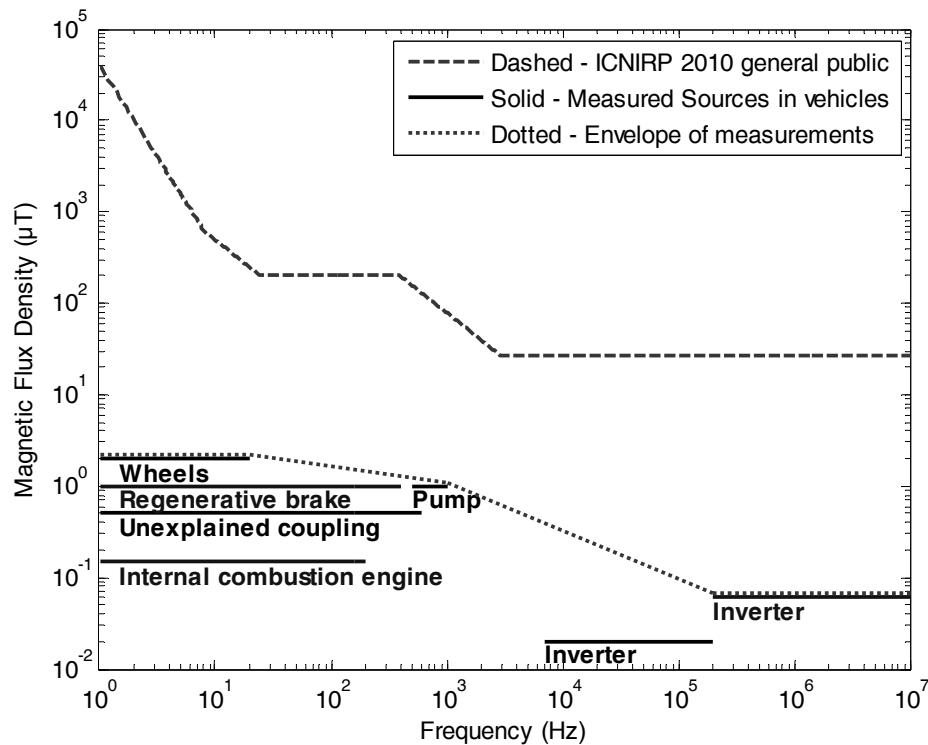
Beim Aufsummieren soll die Summe der magnetischen Flussdichten über alle Frequenzen unter 1 (bzw. 100 %) bleiben.

Auf Grund vieler transienter Signale ist dieser Fall nur selten anzutreffen und die Zahl der auszuwertenden Spektrallinien wird sehr groß. Dann soll nach den Richtlinien unter Berücksichtigung der relativen Phasenlagen nach

$$\left| \sum_i (WF_i) A_i \cos(2\pi f_i t + \theta_i + \varphi_i) \right| \leq 1 \quad (2)$$

ausgewertet werden. Hierin ist  $WF_i$  ein spektraler Gewichtungsfaktor aus den Richtlinien,  $A_i$  die Amplitude bei der Frequenz  $f_i$  mit Phase  $\theta_i$ . Die Phase  $\varphi_i$  wird je

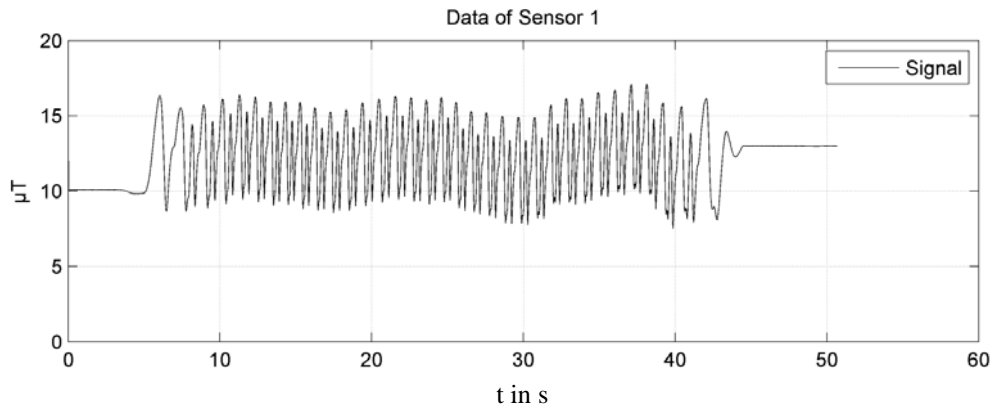
nach Grenzfrequenz des eingesetzten Sensors und unterschiedlich für induktive und nicht induktive Sensoren gewählt. Auch hier muss für transiente Signale eine sinnvolle Nebenbedingung gewählt werden, wenn sich sehr breitbandige Spektren ergeben [6].



**Abb. 4:** Zusammenfassung von Quellen diverser magnetischer Felder und dem ICNIRP2010 Referenzlevel für magnetische Flussdichte [6]

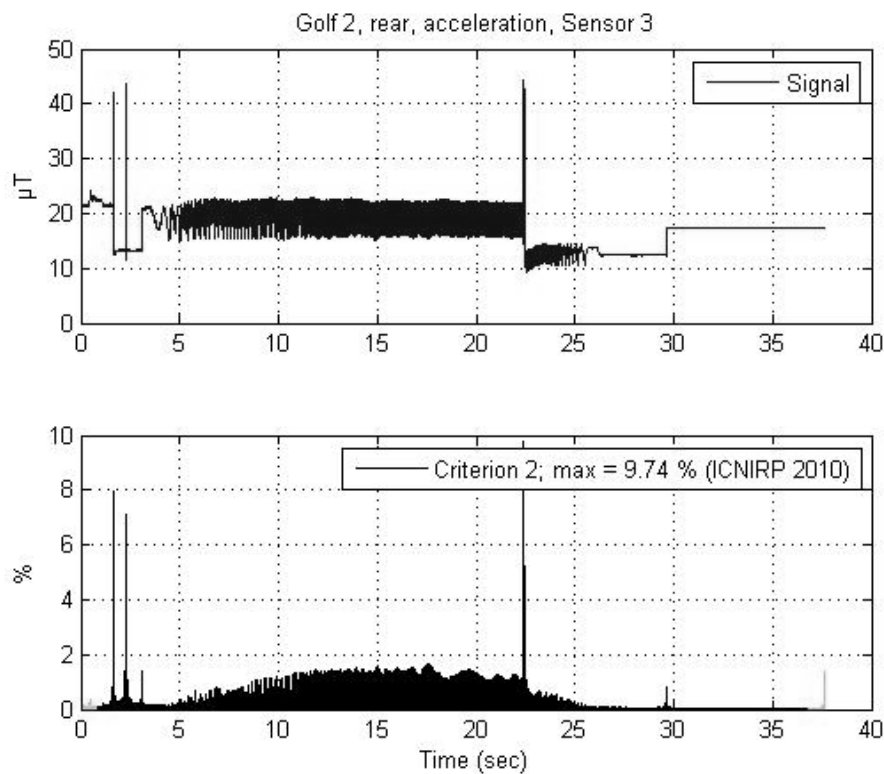
Um einen Vergleich der elektromagnetischen Sicherheit in Elektrofahrzeugen ziehen zu können, wurden auch Hybridfahrzeuge und Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren vermessen. In keinem der Fahrzeuge wurden die Expositionsgrenzen nach ICNIRP2010 überschritten, jedoch weisen alle Fahrzeugtypen im niederfrequenten Bereich identische Expositionswerte auf. Durch die Verwendung weiterer Sensoren wurde festgestellt, dass diverse Aggregate und Pumpen oder auch das Drehen der Reifen magnetische Felder erzeugen und somit einen Einfluss auf die Expositionsberechnung haben. Die jeweiligen Aggregate und deren Frequenzbereiche sind in Abb. 4 dargestellt [6]. Als Beispiel sei hier das Drehen der Reifen erwähnt, dessen Frequenz abhängig von der Umdrehungsfrequenz ist und ebenfalls bei ausgeschaltetem Motor bzw. Fahrzeugelektronik gemessen werden kann. In Abb. 5 ist das Betragssignal eines 3D Fluxgate-Sensors

im Fußraum eines Elektrofahrzeugs, bei der Messung der Reifenbewegung, welcher über einen Zeitraum von 40 Sekunden bei ausgeschalteter Fahrzeugelektronik geschoben wurde. Identische Signale sind auch bei Hybridfahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor gemessen worden.



**Abb. 5:** Gemessenes Betragssignal eines Fluxgate-Sensors durch drehenden Reifen

Die Expositionswerte werden in prozentualen Beiträgen zum Expositionslimit berechnet und ebenfalls in grafischer Form (Abb. 6) abgebildet.



**Abb. 6:** Beispielergebnisse der Expositionsberechnung nach ICNIRP2010 Richtlinien



Der verwendete Fluxgate-Sensor befand sich während der Messung im Fußbereich hinter dem Fahrersitz und detektierte ein Expositionsmaximum von 9,74 % in der 23 Sekunde der Messfahrt. Durch die kombinierte Auswertung der Sensoren und der Webcam, wurde festgestellt, dass sich dieses Maximum beim Betätigen des Bremspedals ereignete. Ebenso wie die zwei Peaks bei 1,5 und 2 Sekunden, welche beim Starten des Motors mit gedrücktem Bremspedal erzeugt wurden.

Durch die Beschleunigungssensoren und die Strommesszange werden weitere Daten ermittelt, die bei der Auswertung Rückschlüsse auf Ereignisse während der Messung schließen lassen. So ist während der Fahrt ein Anstieg des gemessenen Magnetfeldes im Fahrzeug meist mit einer Beschleunigungs- oder Brems-situation gekoppelt, was wiederum im Stromfluss der Batterie im Elektrofahrzeug ersichtlich ist. Ist dies nicht der Fall, können durch die Videodokumentation ggf. Umwelteinflüsse oder externe Störquellen, wie Straßenbahnen oder Straßenlampen detektiert werden.

Ausgehend von den reproduzierbaren evaluierten Sensordaten können, wie im EU-Projekt selbst, Fahrzeughersteller, Optimierungsschritte zur Reduktion von elektromagnetischen Feldern und dadurch die Verbesserung der elektromagnetischen Sicherheit in Fahrzeugen, speziell für den menschlichen Körper, einleiten und diese mit wenig Aufwand verifizieren.

## 5 Aussichten

Die Messplattform wurde im Rahmen des EM-Safety Projektes entwickelt und wurde in diesem aktiv zu Messungen in Elektrofahrzeugen und anderen Fahrzeugtypen eingesetzt. Bei den Messungen nach [6] und den darauf folgenden Auswertungen wurde festgestellt, dass alle gemessenen Fahrzeuge und Werte unterhalb der von der ICNIRP formulierten Grenzwerte für eine Exposition liegen. Diese sind meist unter 10% der Expositionsgrenze angesiedelt. Es wurde beobachtet, dass bei kurzen Ereignissen, wie eine Vollbremsung, die Expositionswerte bis auf 20% ansteigen [6]. Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde bei der International Electrotechnical Commission (IEC) ein Dokument im Be-

reich: “TC 106 - *Methods for the assessment of electric, magnetic and electromagnetic fields associated with human exposure*” eingereicht [8].

Es wird beabsichtigt die Messplattform für zukünftige Messungen an Elektrofahrzeugen weiter zu nutzen. U.a. wird durch die Erkenntnisse aus dem EM-Safety Projekt eine Standardisierung für Messungen zur elektromagnetischen Sicherheit in Elektrofahrzeugen angestrebt. Hierfür kann die Messplattform als ein Standardisierungswerkzeug wirken und die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Fahrzeugen erleichtern.

## Literatur

- [1] Schaufenster Elektromobilität: <http://www.schaufenster-elektromobilitaet.org/programm> Zugriff: Juli 2014
- [2] EM-Safety Projektseite: <http://www.sintef.no/Projectweb/EM-Safety/>, Zugriff: Feb. 2014
- [3] S. Gudoshnikov, N. Usov, A. Nozdrin, M. Ipatov, A. Zhukov, V. Zhukova: *Highly sensitive magnetometer based on the off-diagonal GMI effect in Co-rich glass-coated microwire*, Phys. Status Solidi A, 1–6 (2014), DOI 10.1002/pssa.201300717
- [4] ICNIRP: *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)*, Health Physics, vol. 99, Nr. 6, S. 818–836, Dez. 2010
- [5] Datenblatt Fluxgate-Sensor MAG-03: <http://www.bartington.com/Literaturepdf/Datasheets/Mag-03%20DS0013.pdf>, Zugriff: Feb. 2014
- [6] A. Vassilev, A. Ferber, C. Wehrmann, O. Pinaud, M. Schilling, A. Ruddle: *Magnetic Field Exposure Assessment in Electric Vehicles*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Eingereicht zur Veröffentlichung Sep. 2013
- [7] ICNIRP: *Guidance on Determining Compliance of Exposure to Pulsed Fields and Complex Non-Sinusoidal Waveforms below 100 kHz with ICNIRP Guidelines*, Health Physics, vol. 84, Nr. 3, S 383-387, März 2003
- [8] IEC: [http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:23:0:::FSP\\_ORG\\_ID:1303](http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:23:0:::FSP_ORG_ID:1303), Eingereichtes Dokument IEC 62764-1