

1. Einleitung

Die Einleitung in diese Arbeit erfolgt zunächst durch die Definition des Begriffs der Elektromagnetischen Verträglichkeit sowie die Skizzierung der Herausforderungen durch die Elektromobilität. Anschließend werden die Anforderungen an Schirmgehäuse bezüglich der Schirmdämpfung im Automobilbereich vorgestellt und es werden typische elektromagnetische Störungen im Elektrofahrzeug aufgezeigt. Das Kapitel wird komplettiert durch die Beschreibung der Zielstellung sowie der Struktur dieser Arbeit.

1.1. Definition der Elektromagnetischen Verträglichkeit

Die allgemeine Definition der EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit) ist gemäß der europäischen Richtlinie 2014/30/EU festgelegt (siehe [15]):

"Die Fähigkeit eines Apparates, einer Anlage oder eines Systems, in der elektromagnetischen Umwelt zufriedenstellend zu arbeiten, ohne dabei selbst elektromagnetische Störungen zu verursachen, die für alle in dieser Umwelt vorhandenen Apparate, Anlagen oder Systeme unannehmbar wären." [15]

Die EMV lässt sich auf Basis des Quelle-Senke-Modells beschreiben, welches aus einer Quelle, einer Senke und einem Koppelpfad besteht. Der Koppelpfad wird hierbei durch galvanische, kapazitive, induktive oder Strahlungskopplung beschrieben. Die Kopplungsarten sind hier von entscheidender Bedeutung, da nach Nah- bzw. Fernfeld-Vorgängen zu differenzieren ist. Die kapazitive (elektrisches Feld) sowie induktive Kopplung (magnetisches Feld) sind Nahfeld-Phänomene, bei der Strahlungskopplung befinden sich Sender und Empfänger im Fernfeld.

Die EMV hat im Automobilbereich in den letzten Jahren auch im Zuge der stetig wachsenden Anzahl von elektronischen Systemen und Komponenten immer mehr an Bedeutung gewonnen. Ein aktuelles Fahrzeug, wie am Beispiel des Audi Q7 e-tron in Abbildung 1.1 dargestellt ist, verfügt über mehr als 250 EMV-relevante Komponenten, welche auf ca. 5 km langen Leitungen miteinander interagieren. Ebenfalls ein Ziel der EMV ist die Entstörung bzw. das störungsfreie Anbieten der im Fahrzeug vorhandenen Rundfunk- (AM, FM, DAB, TV etc.) bzw. Kommunikationsdienste (UMTS, LTE, Bluetooth, WLAN etc.). Speziell im Premiumsegment ist beispielsweise ein rauschender Rundfunkempfang bzw. das akustische Erleben von elektromagnetischen Störungen nicht akzeptabel.



Abbildung 1.1.: Darstellung der Fahrzeugkomponenten und -leitungen im Q7 e-tron (kopiert mit Genehmigung der AUDI AG)

Die Prüfung der EMV im Automobilbereich lässt sich grob in drei Kategorien unterteilen:

- Störfestigkeit
- Störaussendung
- Elektrostatische Entladung (ESD)

Bei der Störfestigkeit wird das Fahrzeug mit einem elektromagnetischen Feld beaufschlagt und die entsprechende Reaktion wird mittels geeigneter Überwachung (optisch entkoppelte Kameras, Monitoring der Bussignale etc.) festgestellt und bewertet. Die Störaussendung beschreibt den umgekehrten Fall, also die Emission elektromagnetischer Störgrößen des Fahrzeugs an die Umwelt. Ebenfalls werden Störfestigkeit und -aussendung auch auf Komponentenebene gemessen, dies umfasst beispielsweise die galvanische/kapazitive Einkopplung von Impulsen. Das Thema ESD (Electro Static Discharge) ist ebenfalls ein wichtiger Aspekt und keinesfalls auf Fahrzeug- bzw. Komponentenebene zu vernachlässigen. Weiterführende Literatur zum allgemeinen Thema EMV sowie zu Prüf- und Messverfahren ist unter [54] bzw. speziell für den Automobilbereich unter [26] zu finden.

1.2. Herausforderungen durch die Elektromobilität

Die Elektromobilität bietet die Möglichkeit, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu minimieren und die Emissionen zu reduzieren. Ein Elektrofahrzeug benötigt eine Hochvolt-Batterie als Energiespeicher (HV-Batterie), eine Leistungselektronik sowie



eine elektrische Maschine respektive Antriebseinheit inklusive Getriebe. Die Leistungselektronik fungiert hierbei als Pulswechselrichter und erzeugt aus der Gleichspannung der HV-Batterie einen 3-phasigen-Sinusstrom für den Antrieb der elektrischen Maschine. Die Spannungslage des HV-Bordnetzes bzw. des Traktionsnetzes (DC-Seite) bewegt sich zwischen 300 V bis 800 V [21]. Eine Übersicht der gängigsten Elektrofahrzeugklassen zeigt Tabelle 1.1.

Fahrzeugtyp	Beschreibung
Hybridfahrzeug (HEV)	Verbrennungsmotor plus Elektromotor, HV-Batterie nicht am Netz aufladbar
Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV)	Verbrennungsmotor plus Elektromotor, HV-Batterie am Netz aufladbar
Elektrofahrzeug inklusive Range Extender (REEV)	Elektrofahrzeug mit zusätzlichem Verbrennungsmotor zur mobilen Aufladung der HV-Batterie
Elektrofahrzeug (BEV)	Antrieb mit Elektromotor und mit am Netz aufladbarer HV-Batterie

Tabelle 1.1.: Übersicht relevanter Elektrofahrzeugklassen nach [21]

Die nachfolgende Abbildung 1.2 stellt das Gewicht der notwendigen EMV-Maßnahmen in Abhängigkeit des Grades der Elektrifizierung dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass zwischen einem konventionellen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor und einem Plug-In-Hybridfahrzeug ein signifikanter Unterschied bezüglich des Fahrzeuggewichts zu erkennen ist. Dies ist nicht nur den elektrifizierten Komponenten geschuldet, sondern auch den zusätzlich erforderlichen EMV-Maßnahmen. Diese EMV-Maßnahmen sind beispielsweise erforderlich für die Einhaltung von internen HV-Sicherheitsanforderungen, als auch für die Entstörung von Rundfunk- oder Kommunikationsdiensten bzw. der Entkopplung des HV-Netzes und des 12 V-Bordnetzes.

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs birgt viele neue Herausforderungen für die EMV-Entwickler, beispielsweise werden für den Antrieb des Fahrzeugs durch die Leistungselektronik ca. 100 kW elektrische Leistung geschaltet und nach wie vor sind die EMV-Anforderungen für konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor gültig. Auch sind die subjektiven Anforderungen an die Rundfunk- und Kommunikationsdienste für elektrifizierte Fahrzeuge unverändert geblieben. Als Nachweis für die Relevanz und die Komplexität der EMV ist hier das EU-Forschungsprojekt EM4EM (Electromagnetic Reliability of Electronic Systems for Electric Mobility) zu nennen, welches einen ganzheitlichen Ansatz zur Optimierung der EMV von elektrifizierten Fahrzeugen unter Berücksichtigung der gesamten Wertschöpfungskette verfolgte. Dieses Projekt bildete innerhalb der dreijährigen Projektlaufzeit ein wichtiges Fundament für die zukünftigen EMV-Herausforderungen im Kontext der Elektromobilität. Der Abschlussbericht des Teilvorhabens der AUDI AG im Rahmen des Forschungsprojekts EM4EM ist unter [32] zu finden.

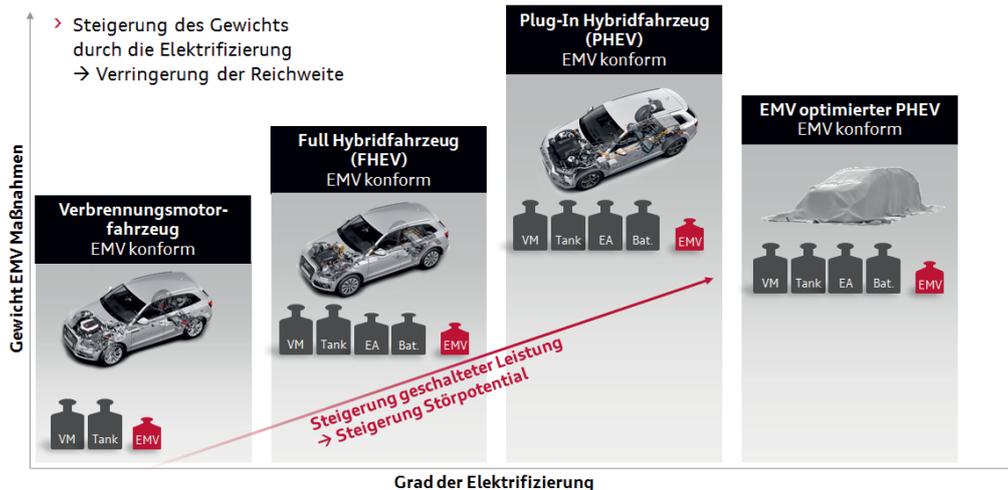


Abbildung 1.2.: Gewicht der EMV-Maßnahmen in Abhängigkeit der Elektrifizierung (kopiert mit Genehmigung der AUDI AG)

1.3. Anforderungen an Schirmgehäuse im Automobilbereich

Es gibt im Automobilbereich eine Vielzahl von Anforderungen und Spezifikationen für Gehäuse von Komponenten. Diese Anforderungen sind je nach Einbauort häufig mechanischer bzw. thermischer Natur. Im Rahmen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs und der Einführung des Hochvolt-Bordnetzes (HV-Bordnetz) sind aber zusätzliche elektromagnetische Anforderungen für Gehäuse entstanden. Beispielsweise ist das aktuelle HV-Bordnetz vollständig geschirmt ausgeführt und eine weitere wichtige Anforderung bzw. Spezifikation stellt der Übergangswiderstand zwischen den Schirmen der HV-Leitungen und der Komponente dar. Der Übergangswiderstand hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Schirmwirkung des HV-Systems und damit auf die Emission von elektromagnetischen Störungen. Wie bereits erwähnt, ist das HV-Bordnetz inklusive aller HV-Komponenten vollständig geschirmt ausgeführt, dies bringt natürlich auch ein Mehrgewicht in das Fahrzeug, was wiederum einen negativen Einfluss auf die Effizienz bzw. die Reichweite hat. Das leere HV-Batteriegehäuse bringt beispielsweise ein Mehrgewicht von ca. 40 kg in das Fahrzeug. Dies ist sicherlich auch mechanischen Anforderungen geschuldet, jedoch hat die EMV ebenso einen gewissen Anteil an der Spezifikation des Gehäuses. Als Anforderung der EMV an das Gehäuse ist die sogenannte 70/40 dB-Dämpfungskurve, eine im Volkswagenkonzern gängige Anforderung für die Entkopplung bzw. Dämpfungsanforderung von HV-Komponenten, zu nennen. Die Berechnungsvorschrift zur Ermittlung der 70/40 dB-Dämpfungskurve ist in Gleichung 1.1 definiert.

$$a \text{ [dB]} = 70 \text{ dB} - 30 \text{ dB} \frac{\log\left(\frac{f}{150 \text{ kHz}}\right)}{\log\left(\frac{120 \text{ MHz}}{150 \text{ kHz}}\right)} \quad (1.1)$$

Die nachfolgende Abbildung 1.3 stellt die 70/40 dB-Dämpfungskurve als Anforderung für Schirmgehäuse im Volkswagenkonzern dar.

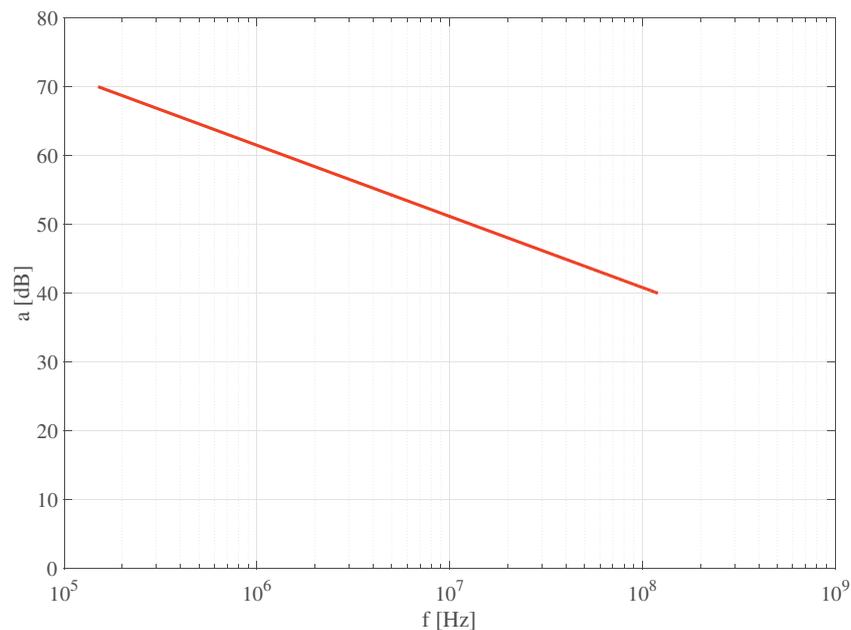


Abbildung 1.3.: 70/40 dB-Dämpfungskurve für Schirmungsanforderung im HV-System

Diese Anforderung wurde definiert auf Basis von empirischen Werten und dem entsprechend höheren Störpegel des HV-Systems im Vergleich zum konventionellen 12V-Bordnetz. Daher ist es das Ziel, dass die Störpegel des HV-Systems die des konventionellen 12V-Systems nicht überschreiten. Die Gültigkeit dieser Anforderung ist im Frequenzbereich $150\text{kHz} < f < 120\text{MHz}$ festgelegt. Nachfolgend ist ein Auszug der im Fahrzeug vorhandenen Funkdienste (siehe [12]), welche durch die 70/40 dB-Dämpfungskurve abgedeckt sind.

- Langwelle (LW), $f = 0,153 \dots 0,279\text{ MHz}$
- Mittelwelle (MW), $f = 0,522 \dots 1,71\text{ MHz}$
- BOS-Funk / 8 m-Band, $f = 34 \dots 36,5\text{ MHz}$ und $f = 38,5 \dots 40\text{ MHz}$
- Ultrakurzwelle (UKW), Japan: $f = 76 \dots 90\text{ MHz}$; Europa: $f = 87,5 \dots 108\text{ MHz}$

Sicherlich fällt auf, dass beispielsweise Funkdienste im Frequenzbereich $f < 100\text{kHz}$ arbeiten, wie beispielsweise das Keyless Go System ($f \sim 80\text{kHz}$), oder auch Mobilfunkdienste (GSM, UMTS, LTE etc.) im Frequenzbereich $f > 120\text{MHz}$ [12]. Auch sind durch das HV-System im Fahrzeug und der steigenden Anzahl von Komponenten im 48V-Bordnetz Störgrößen bzw. -pegel zu erwarten, welche durch die 70/40 dB-Dämpfungskurve nicht abgedeckt sind. Das einfachste Beispiel hierfür ist die Leistungselektronik im HV-System, da die Halbleiter mit einem PWM-Signal (Pulsweitenmodulation) von $f_T \sim 10\text{kHz}$ angesteuert werden. Durch die steilen Schaltflanken (t_{rise} und t_{fall} im ns-Bereich) entstehen Oberwellen bis in den GHz-Bereich [34].



1.4. Auftretende Störgrößen im Fahrzeug

Nachdem im vorherigen Kapitel 1.3 die Anforderungen an Schirmgehäuse beschrieben wurden, stellt sich nun die Frage, welche Störgrößen tatsächlich im Fahrzeug auftreten. Hierfür wurden Messungen an einem Forschungsdemonstrator, dem sogenannten eBuggy durchgeführt. Dieser eBuggy verfügt über eine elektrische Synchronmaschine mit einer Leistung $P_{\max} = 25 \text{ kW}$, einer HV-Batterie mit einer Kapazität von 9,36 kWh und einer seriennahen Leistungselektronik mit drei Halbbrücken und entsprechenden IGBTs. Auch verfügt das Fahrzeug über ein nahezu vollständiges 12 V-Bordnetz mit den gängigsten Fahrzeugkomponenten sowie induktiven Lasten. Der eBuggy wurde ebenfalls im Rahmen des Forschungsprojekts EM4EM aufgebaut und ist in Abbildung 1.4 visualisiert.



Abbildung 1.4.: Fahrzeugdemonstrator eBuggy (kopiert mit Genehmigung der AUDI AG)

Ebenso wurden im Projekt EM4EM verschiedenste Messungen am eBuggy durchgeführt, unter anderem zum Projektbeginn für die Bestimmung des Ausgangszustandes im Kontext der EMV. Nachfolgend werden die wichtigsten Messergebnisse kurz vorgestellt und beschrieben. Die Messungen wurden im EMV-Zentrum der AUDI AG in Ingolstadt durchgeführt. Die nachfolgende Abbildung 1.5 zeigt die Messergebnisse einer 10m-Antennenmessung nach ECE-R10-04 (siehe [39]) im Frequenzbereich $30 \text{ MHz} < f < 1 \text{ GHz}$ für verschiedene Betriebszustände des eBuggy.

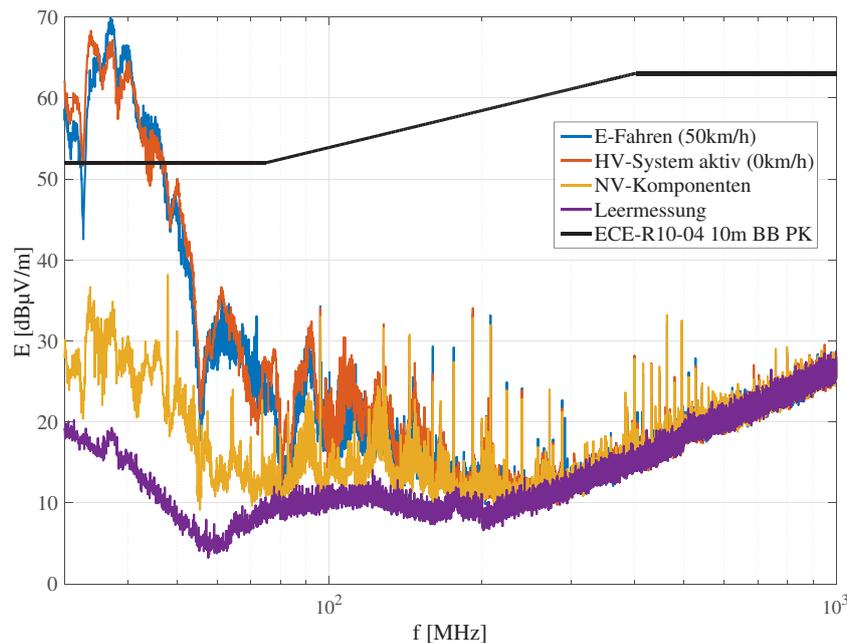


Abbildung 1.5.: ECE-R10-04 Messung am Forschungsdemonstrator eBuggy für verschiedene Betriebszustände

Die schwarze Linie stellt den Grenzwert nach ECE-R10-04 (siehe [39]) für den Peakdetektor (Breitband) dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass die gemessenen Störungen der Niedervolt-Komponenten (NV-Komponenten) deutlich unterhalb des Grenzwertes liegen. Sobald das HV-System aktiviert wird bzw. der eBuggy gefahren wird, überschreitet die gemessene Störemission den Grenzwert bei Frequenzen $f < 50$ MHz. Interessant zu beobachten ist, dass es nahezu keinen Unterschied bezüglich eines aktivierten HV-Systems im Stand und im Fahrbetrieb gibt. Die nächste Abbildung 1.6 zeigt die Störemission für verschiedene Betriebszustände, welche direkt an einer externen AM-Antenne im Frequenzbereich $150 \text{ kHz} < f < 1,7 \text{ MHz}$ gemessen wurde.

Hier zeigt das Messergebnis eine relativ deutliche Diskrepanz zwischen den Konfigurationen HV-System aktiv und E-Fahren. Dies würde beispielsweise bedeuten, dass ein Radioempfang im AM-Band nur schwer möglich wäre bzw. dass Störungen akustisch deutlich vernommen werden könnten. Hier ist nicht nur das objektive bzw. messtechnische Ergebnis relevant, sondern auch der subjektive Höreindruck. Die Abbildung 1.7 zeigt die magnetische Feldemission des eBuggy im Fahrbetrieb ($v = 30 \text{ km/h}$). Die Messung wurde mit magnetischen Nahfeldsonden im Frequenzbereich $10 \text{ kHz} < f < 30 \text{ MHz}$ in der Nähe der Leistungselektronik bei den Anschlüssen der Stecker des Phasennetzes durchgeführt. Der Abstand der Sonde zu dem HV-Stecker betrug $r = 3 \text{ cm}$. In den Messergebnissen ist beispielsweise der Stromrippel des Phasennetzes bei $f \sim 20 \text{ kHz}$ als Doppelpeak zu erkennen. Die gezeigten Messergebnisse sollen verdeutlichen, dass sowohl das elektrische als auch das magnetische Feld in einem großen Frequenzbereich im Kontext der Elektromobilität betrachtet werden müssen.

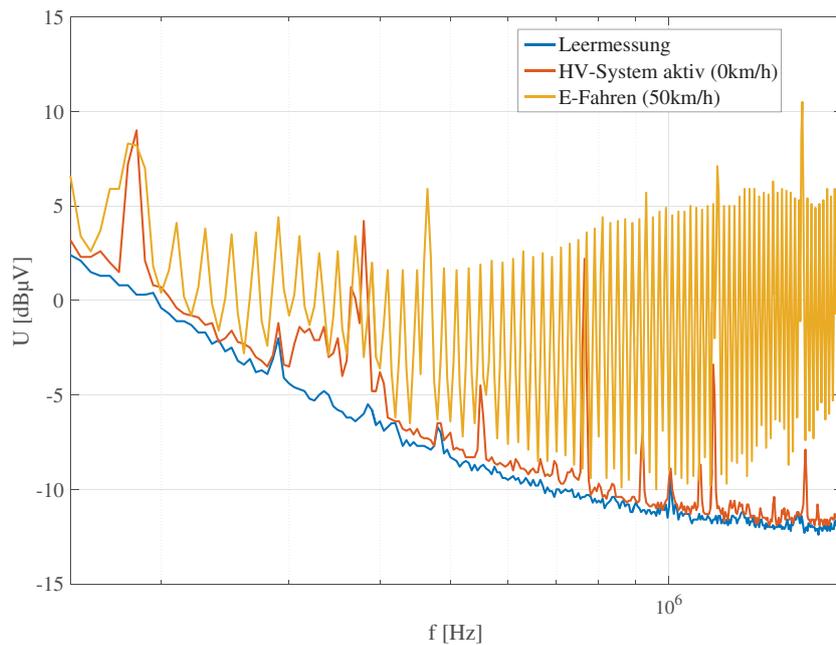


Abbildung 1.6.: AM-Messung am Forschungsdemonstrator eBuggy für verschiedene Betriebszustände

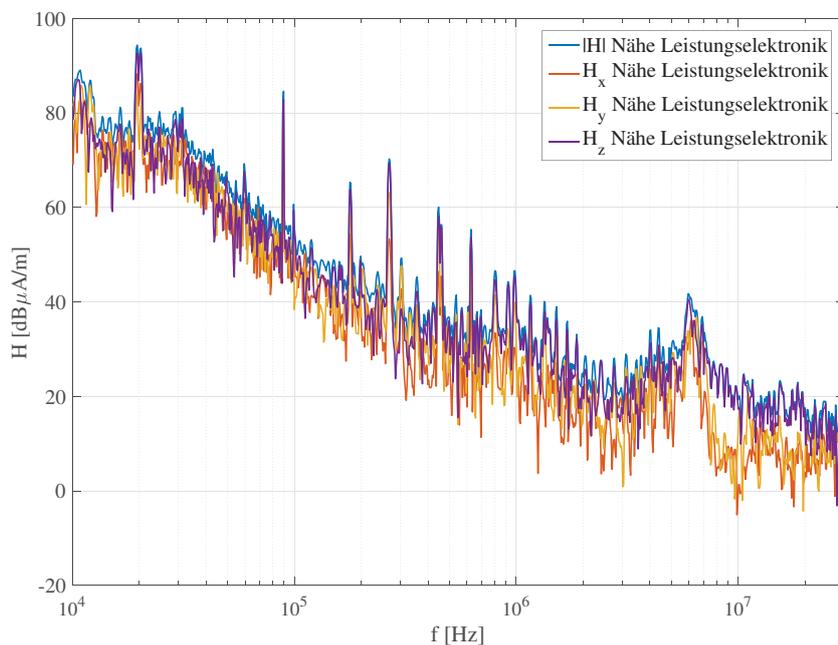


Abbildung 1.7.: Magnetfeldmessung am Forschungsdemonstrator eBuggy im Fahrbetrieb

1.5. Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit ist die ganzheitliche Betrachtung der Schirmdämpfung von Gehäusen für isotrope und anisotrope Materialien. Die Erfahrung zeigt, dass es durch viele un-



terschiedliche Messverfahren und Interpretationen von Standards und Messvorschriften häufig zu Diskrepanzen oder Missverständnissen zwischen der Material- und Gehäuseebene kommen kann. Dies betrifft besonders Faserverbundkunststoffe (z.B. CFK) oder andere modifizierte Polyamide (z.B. CNT) und die Erwartungshaltung bezüglich der Schirmdämpfung. Daher ist es erforderlich, dass bereits auf Materialebene die theoretischen Hintergründe sowie die charakteristischen Parameter bzw. Materialeigenschaften diskutiert werden. Auch ist es erforderlich, dass bestehende Messverfahren für die Schirmdämpfung analysiert und für den Anwendungsfall bzw. die entsprechende Materialprobe bewertet oder optimiert werden müssen. Idealerweise ist die Prädiktion der Schirmdämpfung mit relativ hoher Genauigkeit von isotropen und anisotropen Materialien möglich. Auf der Gehäuseebene ist als Erstes die Analyse von Standards und Anforderungen erforderlich. Weiterhin muss auch auf dieser Ebene ein Abgleich zwischen den theoretischen Erkenntnissen und den Messverfahren bzw. Anforderungen durchgeführt werden. Als Nächstes stellt sich die Frage nach den charakteristischen Parametern, welche einen Einfluss auf die Schirmdämpfung des Gehäuses haben und wie diese mittels analytischer Berechnungen bzw. numerischer Feldsimulationen abgebildet werden können.

Die vorliegende Forschungsarbeit adressiert folgende Themenstellungen:

- Grundsätzliche elektromagnetische Störgrößen in einem HV-System
- Klassifikation von Materialien bezüglich der Schirmdämpfung
- Analyse von Anforderungen für die Schirmdämpfung von Gehäusen und die messtechnische Umsetzung
- Dimensionierung von Schirmgehäusen auf Basis vorliegender Anforderungen
- Beschreibung der charakteristischen Parameter für die Schirmdämpfung auf Gehäuseebene
- Zusammenhang zwischen Impedanz und Schirmdämpfung im Frequenzbereich

1.6. Inhaltsübersicht

Als Erstes werden die theoretischen Grundlagen in Kapitel 2 behandelt, wobei der Fokus auf der Definition und Prädiktion der Schirmdämpfung mittels analytischer Modelle im Vordergrund steht. Anschliessend wird ein hierarchischer Ansatz, beginnend auf der Material- bis zur Gehäuseebene verfolgt. Im ersten Schritt erfolgt auf der Materialebene in Kapitel 3 eine theoretische Analyse von isotropen und anisotropen Materialien und entsprechende Messverfahren zur Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften sowie Schirmdämpfung werden vorgestellt. Die Vorstellung und Diskussion der Messergebnisse für die elektrische Leitfähigkeit, die relative Permittivität ϵ_r sowie die Schirmdämpfung folgen im nächsten Kapitel 4. Auch wird ein Messverfahren für die magnetische Schirmdämpfung auf Materialebene sowie eigens angepasste analytische Modelle für die Bestimmung der magnetischen Schirmdämpfung eingeführt. In Kapitel 5 werden Messverfahren



und Grenzwerte sowie die Einflussfaktoren auf Gehäuseebene für die Schirmdämpfung diskutiert. Auch werden Messverfahren für die Bestimmung der Gehäuseimpedanz vorgestellt. Anschliessend wird eine analytische Abschätzung bzw. Simulation zur Bestimmung der Gehäuseimpedanz sowie Schirmdämpfung durchgeführt. Das letzte Kapitel 6 widmet sich der Analyse und Diskussion der Messergebnisse sowie einem Vergleich mit den analytischen Abschätzungen und numerischen Berechnungen der Gehäuseimpedanz bzw. Schirmdämpfung auf Gehäuseebene. Final wird der Einfluss der Kontaktierung auf die Gehäuseimpedanz bzw. Schirmdämpfung analysiert und diskutiert. Die Arbeit wird abgerundet durch eine ausführliche Zusammenfassung sowie einen Ausblick in Kapitel 7.