



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Vienna University of Technology

Dissertation

## **Bewertung niederfrequenter Magnetfelder von Schienenfahrzeugen**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der technischen Wissenschaften unter der Leitung von

ao.Univ.-Prof.i.R. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang HADRIAN

E370

Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe

Eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Elektrotechnik

von

Dipl.-Ing. Raimund Allesch

Matrikelnummer: 8625629

Wopfing 357, 2754 Waldegg

Gutachter: 1. ao.Univ.-Prof.i.R. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Hadrian

2. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert



# Vorwort

Der Inhalt für die vorliegende Arbeit entstand zu einem großen Teil während meiner Tätigkeit bei ELIN EBG Traction. Im Laufe des Jahres 2005 wurde das Thema „Personenschutz hinsichtlich magnetischer Felder“ zu einem meiner Hauptaufgabengebiete.

Nach der erfolglosen Suche, eines für uns geeigneten Messgerätes, folgte die Mitarbeit im Normungsausschuss zur Erstellung einer Messvorschrift für Schienenfahrzeuge und Infrastruktur.

Um für diese Mitarbeit im Normungsausschuss einen qualifizierten Beitrag leisten zu können, wurde der Prototyp einer B-Feld Messsonde gebaut. An dieser Stelle möchte ich mich bei meinem damaligen Abteilungsleiter, Dr. Rainer Weinmann, für die nicht selbstverständliche Unterstützung bedanken. Er hat dafür gesorgt, dass das Messequipment bis zum professionellen Einsatz weiterentwickelt werden konnte. Ebenso möchte ich mich bei meinen Kollegen Herrn Ing. Leopold Bogner, Herrn Herbert Gargulak und Herrn Franz Teuschl für die Sorgfalt und die Geduld beim Bau der Sonden und der notwendigen Elektronik bedanken.

Zu großem Dank bin ich auch den Begutachtern dieser Arbeit verpflichtet. Herr Professor Hadrian und Herr Professor Fickert haben mit zahlreichen Tipps und Anregungen einen wichtigen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet.

Ausgehend von diesem Prototyp wurde sowohl die Hard- als auch die Software ständig weiter verbessert. Schon während der Entwicklung konnte viel Know-how aufgebaut und auch für die Erstellung der Messvorschrift für Schienenfahrzeuge und Infrastruktur eingebracht werden.

Die Messvorschrift wurde im Jahre 2008 als EN 50500 „Messverfahren für magnetische Felder, die durch elektronische und elektrische Geräte in der Bahnumgebung erzeugt werden, hinsichtlich der Exposition von Personen“ von CENELEC angenommen.

Nach den ersten erfolgreichen und bestimmungsmäßigen Einsätzen als Personenschutz-Messeinrichtung folgten bald Magnetfeldmessungen, die aufgrund von Störungen an Gleissicherungsanlagen auftraten.

Für diesen Einsatzzweck wurde die Software durch zusätzliche Funktionen ergänzt. Die flexible Anpassung an den notwendigen Einsatzzweck macht die anfänglich für den Personenschutz gedachte Messeinrichtung so universell.

Wopfing im November 2014



# Kurzfassung

Die Bewertung niederfrequenter Magnetfelder von Schienenfahrzeugen behandelt die Magnetfelder hinsichtlich Personenschutz und Gleissicherungsanlagen im Frequenzbereich von DC bis 20 kHz.

Um die Anforderungen an das Gesamtfahrzeug einhalten zu können, müssen diese in geeigneter Weise den relevanten Komponenten zugeordnet und entsprechend spezifiziert werden. Die Einhaltung dieser Anforderungen muss dann messtechnisch für die Komponenten und insbesondere für das Gesamtfahrzeug nachgewiesen werden.

Aus den Anforderungen zum Personenschutz und zu den Gleiskreisen ergibt sich die Notwendigkeit unterschiedlicher Bewertungen der Magnetfelder.

Deshalb wurde ein Messsystem entwickelt und beschrieben, das flexibel auf die unterschiedlichen Anforderungen einstellbar ist. Ebenso ist, neben der Erfassung der Magnetfelder, die synchrone Erfassung von wesentlichen Fahrzeugdaten möglich, um einen Bezug zwischen dem generierten Magnetfeld und dem Verursacher herzustellen. Dadurch wird die Behebung von möglichen Überschreitungen der Magnetfeldgrenzwerte wesentlich vereinfacht.

Die Ergebnisse von Messungen an Einzelkomponenten und Schienenfahrzeugen runden die Arbeit ab.

# Summary

The evaluation of low frequency magnetic fields of rail vehicles discusses the magnetic fields concerning limits of human exposure and with regard to track circuits.

To keep the requirements of the complete vehicle, these requirements have to be allocated in a proper way to the relevant components. Hence, requirements for the components arise. The compliance with these requirements has to be verified for the components and particularly for the complete vehicle.

The different requirements from the limits of human exposure and track circuits lead to the necessity of different evaluation methods of the magnetic field.

Therefore a measurement system was developed and described what is flexible adaptable on the actual requirements. Additionally the synchronised acquisition of relevant vehicle data is necessary to establish a relationship between the generated magnetic field and the source. Thus, the correction of possible exceeding of the limits of the magnetic fields will be considerable simplified.

The work will be completed by results of example measurements of components and rail vehicles.



# Bewertung niederfrequenter Magnetfelder von Schienenfahrzeugen

1.	Einleitung .....	1
2.	Anforderungen hinsichtlich Personenschutz .....	2
2.1	Nationale Normen und Richtlinien .....	4
2.2	Internationale und europäische Normen und Richtlinien .....	5
2.3	Kundenspezifische Forderungen .....	6
3.	Anforderungen hinsichtlich Zugbeeinflussungssystemen .....	7
3.1	Allgemeines .....	7
3.2	Funktion .....	7
3.3	Normen und Grenzwerte .....	8
3.3.1	Normen .....	8
3.3.2	Kundenspezifische Forderungen .....	9
4.	Produkthaftung und Produktsicherheit .....	10
4.1	Produkthaftung .....	10
4.2	Produktsicherheit .....	10
4.3	Minimalanforderungen .....	11
5.	Messung der Magnetfelder .....	12
5.1	Im Handel erhältliche Messgeräte .....	12
5.2	Eigenentwicklung zur Bewertung von Schienenfahrzeugen .....	12
5.2.1	Motivation .....	12
5.2.2	Vorgaben .....	12
5.2.3	Prinzip .....	12
5.2.4	Spezifikation .....	17
5.2.5	Aufbau .....	17
5.2.5.1	B-Feld-Sonde .....	17
5.2.5.2	PXI-Datenerfassungskarten .....	20
5.2.5.3	PXI-Chassis .....	21
5.2.6	LabView-Software .....	21
5.2.6.1	Bedienoberfläche .....	21
5.2.6.2	Programm-Aufbau .....	25
5.2.6.3	Programm-Beschreibung .....	26
5.2.6.4	Anzeigen .....	33
5.2.7	Funktionen .....	37
5.2.7.1	Grundfunktionen .....	37
5.2.7.2	Zusatzfunktionen .....	37
5.2.8	Vor- und Nachteile .....	38
6.	Schirmung von Magnetfeldern .....	39
6.1	Berücksichtigung der Fahrzeugstruktur .....	39
6.2	Zusätzliche Schirmungen .....	40
6.3	FEM-Berechnungen .....	40
7.	Komponentenqualifikation .....	45
7.1	Spezifikation hinsichtlich NF-Magnetfelder .....	45
7.1.1	Motorspezifikation .....	46
7.1.1.1	Schutz von Personen allgemein und Personen mit Herzschrittmachern .....	46
7.1.1.2	Schutz vor der Beeinflussung von fahrzeug- und wegseitigen Signalantennen .....	47
7.1.2	Trafospezifikation .....	47
7.1.2.1	Schutz von Personen allgemein und Personen mit Herzschrittmachern .....	47
7.2	Messvorschrift für den Nachweis .....	48

7.2.1	Messspezifikation für einen Traktionsmotor .....	48
7.2.1.1	Grund der Messung .....	48
7.2.1.2	Messequipment.....	48
7.2.1.3	Grenzwerte .....	50
7.2.1.4	Betriebspunkte.....	51
7.2.1.5	Messanordnung .....	52
7.2.1.6	Messpunkte.....	55
7.3	Abnahmemessung im Labor/Prüffeld.....	56
8.	Fahrzeugqualifikation .....	57
8.1	Fahrzeuanforderungen .....	57
8.2	Messvorschrift für den Nachweis .....	57
8.3	Fahrzeugabnahme .....	58
9.	Messung von Testsignalen.....	59
9.1	Vergleich der FFT-Bewertung mit der Bewertung im Zeitbereich .....	64
9.2	Rechnerische Auswertung der Testsignale.....	65
10.	Beispiele von Komponentenmessungen .....	67
10.1	Traktionsmotor .....	67
10.1.1	Traktionsmotor DC-Fahrzeug (ATP-System) .....	67
10.1.1.1	Messequipment.....	67
10.1.1.2	Grenzwerte .....	68
10.1.1.3	Betriebspunkte.....	69
10.1.1.4	Messanordnung .....	70
10.1.1.5	Messpunkte.....	74
10.1.1.6	Messergebnisse.....	75
10.1.1.7	Zusammenfassung .....	91
10.1.2	Traktionsmotor AC-Fahrzeug.....	92
10.1.2.1	Grund der Messung .....	92
10.1.2.2	Messequipment.....	92
10.1.2.3	Grenzwerte .....	94
10.1.2.4	Messanordnung .....	95
10.1.2.5	Messpunkte.....	98
10.1.2.6	Messung.....	99
10.1.2.7	Zusammenfassung .....	117
10.2	Netzdrossel bzw. Traktionsstromrichter.....	118
10.2.1	Netzdrossel .....	118
10.2.1.1	Beschreibung .....	118
10.2.1.2	Drossel Daten .....	119
10.2.1.3	Messequipment.....	119
10.2.1.4	Messaufbau.....	120
10.2.1.5	Daten Schirmblech .....	124
10.2.1.6	Flussdichte Grenzwerte .....	124
10.2.1.7	Messergebnisse.....	125
10.2.1.8	Zusammenfassung .....	135
10.2.2	Traktionsstromrichter am Prüffeldaufbau.....	135
10.2.2.1	Allgemein .....	135
10.2.2.2	Grenzwerte .....	135
10.2.2.3	Messgerät.....	135
10.2.2.4	Prüfaufbau .....	137
10.2.2.5	Messanordnung .....	138
10.2.2.6	Messpunkte.....	139
10.2.2.7	Betriebspunkte.....	140
10.2.2.8	Messergebnisse.....	141



10.2.2.9	Zusammenfassung.....	143
10.3	Traktionstransformator.....	144
10.3.1	Grund der Messung.....	144
10.3.2	Messequipment.....	144
10.3.3	Grenzwert.....	144
10.3.4	Messanordnung.....	145
10.3.5	Messergebnisse.....	147
10.3.5.1	Messung im Kurzschluss.....	147
10.3.5.2	Messung im Leerlauf.....	148
10.3.6	Zusammenfassung.....	149
11.	Beispiele von Fahrzeugmessungen.....	150
11.1	DC-Fahrzeug.....	150
11.1.1	Allgemeines.....	150
11.1.1.1	Prüfling.....	150
11.1.1.2	Prüfgrundlage.....	151
11.1.1.3	Verwendetes Messequipment.....	151
11.1.2	Betriebszustände.....	152
11.1.3	Grenzwerte.....	153
11.1.4	Überblick Messpunkte.....	154
11.1.5	Messergebnisse.....	156
11.1.5.1	Fahrzeuginnenraum Passagierbereich.....	156
11.1.5.2	Fahrzeuginnenraum Bedienstete.....	159
11.1.5.3	Fahrzeugaußenseite.....	160
11.1.6	Prüfergebnis.....	161
11.2	AC-Fahrzeug.....	162
11.2.1	Allgemeines.....	162
11.2.1.1	Prüfling.....	162
11.2.1.2	Prüfgrundlage.....	163
11.2.1.3	Verwendetes Messequipment.....	163
11.2.2	Betriebszustände.....	164
11.2.3	Grenzwerte.....	165
11.2.4	Überblick Messpunkte.....	166
11.2.5	Messergebnisse.....	166
11.2.5.1	Messung im Innenraum.....	166
11.2.5.2	Messung im Außenbereich.....	170
11.2.6	Prüfergebnis.....	171
12.	Zusammenfassung.....	172
13.	Literaturverzeichnis.....	173
14.	Anhang.....	174
14.1	Geschichte.....	174
14.2	Biologische Wirkung (siehe auch [1] und [7]).....	175
14.2.1	Subjektive Auswirkungen.....	175
14.2.2	Grundlegende Stellungnahme.....	176
14.3	Pressemitteilung der EU-Kommission zur Aussetzung der Umsetzungsfrist.....	176
15.	Abkürzungen.....	178
16.	Abbildungsverzeichnis.....	179
17.	Tabellenverzeichnis.....	181
18.	Lebenslauf.....	182



## 1. Einleitung

Das Massentransportmittel Schienenfahrzeug ist einerseits aufgrund der notwendigerweise großen elektrischen Leistung (und den damit verbundenen Magnetfeldern) und andererseits aufgrund der vollkommenen Zugänglichkeit der Öffentlichkeit ein interessantes Untersuchungsobjekt bezüglich Magnetfelder und der Einhaltung von Grenzwerten hinsichtlich Personenschutz.

Die Beeinträchtigung von Zugbeeinflussungssystemen, durch die vom Schienenfahrzeug erzeugten Magnetfelder, ist ein weiterer Aspekt.

Beiden Aspekten gemein ist dabei der interessierende Frequenzbereich. Die Schaltfrequenz der leistungsstarken Traktionsantriebe liegt in der Gegend von einem Kilohertz, die von Hilfsbetriebeumrichtern selten höher als ca. 10 kHz. Der Beitrag der Hilfsbetriebeumrichter zum niederfrequenten AC-Magnetfeld ist aber in den meisten Fällen zu vernachlässigen. Damit werden die leistungsstarken Traktionsumrichter mit den beteiligten magnetischen Komponenten zu den Hauptverursachern des niederfrequenten magnetischen Feldes. Der in der Praxis interessante und auch von der EN 50500 (Messverfahren für magnetische Felder, die durch elektronische und elektrische Geräte in der Bahnumgebung erzeugt werden, hinsichtlich der Exposition von Personen) [8] für Schienenfahrzeuge zu betrachtende Frequenzbereich ist DC bis ca. 20 kHz.

Damit ergeben sich aber zwei unterschiedliche Disziplinen (EMF und EMV), die unterschiedliche Bewertungen der Magnetfelder notwendig machen.

Es bleibt die Bewertung hinsichtlich der Beeinflussung des Menschen, die nach den in den Normen festgehaltenen Verfahren und Methoden durchgeführt wird und weder auf die medizinischen Auswirkungen beim Personenschutz, noch auf die technischen Gegebenheiten bei der Beeinflussung von medizinischen Implantaten eingeht.

Und die Bewertung hinsichtlich der Beeinflussung von Gleiskreisen, die, abhängig von der Art des Gleiskreises, möglichst flexibel anpassbar sein muss.

Man erkennt schon, dass die Anforderungen an ein geeignetes Messgerät sehr umfangreich sind. Dazu kommt noch die notwendige Verknüpfung mit den Fahrzeugdaten. Am Ende muss man einen Zusammenhang zwischen den auftretenden magnetischen Feldern und dem Fahrzeugzustand herstellen können, um tatsächlich sicher zu sein, dass der Worst Case - Fall erreicht wurde, oder eben die gemessenen Werte entsprechend anpassen.

Die angeführten Messbeispiele sind direkt aus der Praxis übernommen und zeigen die Vorgangsweise zur Erreichung der unterschiedlichen Anforderungen in Bezug auf das magnetische Feld mit all den Problemen, wie sie im praktischen Umgang mit diesem Thema vorkommen können.

Bei der Vermessung der Schienenfahrzeuge selbst ist eine Beeinflussung durch die vorhandene Infrastruktur nicht auszuschließen. Man ist natürlich bestrebt, bei der Messung des Schienenfahrzeuges eine eventuelle Beeinflussung, durch die Wahl des Messortes und die Tageszeit der Messung, zu vermeiden. Ausschließen kann man eine Beeinflussung vor allem bei Vollbahnen nicht.

Solange die Grenzwerte eingehalten werden, stellt dies auch kein Problem dar. Bei Überschreitungen, die den Verdacht nahe legen, dass sie durch „Fremdströme“ der Infrastruktur verursacht werden, muss eine recht aufwendige Untersuchung durchgeführt werden. Dabei kann die synchrone Aufzeichnung der Fahrzeugdaten helfen, wenn dadurch gezeigt werden kann, dass das auftretende Magnetfeld nicht ursächlich vom Schienenfahrzeug stammt.

Untersuchungen, das Magnetfeld der Infrastruktur betreffend, sind in der Literatur vorhanden. Sehr ausführlich, unter Berücksichtigung der medizinischen Risiken, behandelt von [7].

## 2. Anforderungen hinsichtlich Personenschutz

Die folgenden Abschnitte zeigen einen kurzen Überblick über die Anforderungen hinsichtlich Personenschutz. Die medizinischen Argumente und Begründungen werden aus unterschiedlichen Quellen entnommen und nicht weiter betrachtet oder kommentiert. Sie sind an dieser Stelle eingefügt, um einen Bezug zu den Personenschutzmessungen herzustellen. Die Hauptaufgabe ist die Bewertung, also die messtechnische Erfassung der magnetischen Felder. Gesundheitliche Risiken werden unter anderem in [7] betrachtet.

Hier und in den folgenden Unterkapiteln werden beispielhaft, für die Durchführung dieser Arbeit notwendige und hilfreiche, Normen und Richtlinien erwähnt. Darüber hinaus sind im Literaturverzeichnis weitere, für den betreffenden Frequenzbereich relevante, Publikationen angeführt.

Als erste Organisation, deren Grenzwerte auch international anerkannt und mittlerweile auch in vielen nationalen Normen und Richtlinien umgesetzt wurden, trat ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) mit den ICNIRP-Guidelines 1998 [10] in Erscheinung.

Diese ICNIRP-Guidelines legen Grenzwerte im Frequenzbereich von DC bis 300 GHz für die Allgemeinbevölkerung und für beruflich exponierte Personen fest.

Für das Verständnis der jeweils angegebenen Grenzwerte eine kurze Erklärung der, in Bezug auf Grenzwerte, häufig verwendeten Begriffe:

- **Basiswert/Expositionsgrenzwert:**  
Aufgrund der biologischen Wirkungen festgelegter zulässiger Wert für die elektrische Stromdichte im Körper, den Körperstrom.
- **Abgeleiteter Wert (Referenzwert) / Auslösewert:**  
Aus den Basiswerten abgeleitete (berechnete) zulässige Werte für die elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Felder und die Berührungsspannung.

Die abgeleiteten Werte werden angegeben, da die Felder im Gegensatz zu den Basiswerten gemessen und berechnet werden können. Diese Werte sind so festgelegt, dass selbst unter Zugrundelegung der ungünstigsten Einwirkungsbedingungen der Felder, die Basiswerte nicht überschritten werden.

## Bewertung des magnetischen Feldes nach den ICNIRP-Guidelines:

Die folgende (Abbildung 2-1) Tabelle 7 und die Formel (inkl. Beschreibung der Symbole) wurden direkt aus den ICNIRP-Guidelines 1998 entnommen.

**Table 7** Reference levels for general public exposure to time-varying electric and magnetic fields (unperturbed rms values)

Frequency range	E-field strength (V m <sup>-1</sup> )	H-field strength (A m <sup>-1</sup> )	B-field (μT)	Equivalent plane wave power density $S_{eq}$ (W m <sup>-2</sup> )
up to 1 Hz	—	$3.2 \times 10^4$	$4 \times 10^4$	—
1–8 Hz	10,000	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	—
8–25 Hz	10,000	$4,000/f$	$5,000/f$	—
0.025–0.8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	—
0.8–3 kHz	$250/f$	5	6.25	—
3–150 kHz	87	5	6.25	—
0.15–1 MHz	87	$0.73/f$	$0.92/f$	—
1–10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0.73/f$	$0.92/f$	—
10–400 MHz	28	0.073	0.092	2
400–2000 MHz	$1.375f^{1/2}$	$0.0037f^{1/2}$	$0.0046f^{1/2}$	$f/200$
2–300 GHz	61	0.16	0.20	10

*Notes:*

1.  $f$  as indicated in the frequency range column.
2. Provided that basic restrictions are met and adverse indirect effects can be excluded, field strength values can be exceeded.
3. For frequencies between 100 kHz and 10 GHz,  $S_{eq}$ ,  $E^2$ ,  $H^2$ , and  $B^2$  are to be averaged over any 6-minute period.
4. For peak values at frequencies up to 100 kHz see Table 4, note 3.
5. For peak values at frequencies exceeding 100 kHz see Figures 1 and 2. Between 100 kHz and 10 MHz, peak values for the field strengths are obtained by interpolation from the 1.5-fold peak at 100 kHz to the 32-fold peak at 10 MHz. For frequencies exceeding 10 MHz it is suggested that the peak equivalent plane wave power density, as averaged over the pulse width, does not exceed 1000 times the  $S_{eq}$  restrictions, or that the field strength does not exceed 32 times the field strength exposure levels given in the table.
6. For frequencies exceeding 10 GHz,  $S_{eq}$ ,  $E^2$ ,  $H^2$ , and  $B^2$  are to be averaged over any  $68/f^{0.5}$ -minute period ( $f$  in GHz).
7. No E-field value is provided for frequencies <1 Hz, which are effectively static electric fields. For most people the annoying perception of surface electric charges will not occur at field strengths less than  $25 \text{ kV m}^{-1}$ . Spark discharges causing stress or annoyance should be avoided.

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{65\text{kHz}} \frac{H_j}{H_{L,j}} + \sum_{j>65\text{kHz}} \frac{H_j}{b} \leq 1$$

$H_j$  is the magnetic field strength at frequency  $j$

$H_{L,j}$  is the magnetic field reference level from Tables 6 and 7

**Abbildung 2-1: ICNIRP 1998 Grenzwert & Bewertung**

Die ICNIRP-Guidelines 1998 schreiben bei gleichzeitigem Vorhandensein von mehreren Frequenzen die Aufsummierung nach obiger Formel vor. Dabei bleibt die Phasenlage der einzelnen Harmonischen zueinander unberücksichtigt. Da bei der Anwendung der EN 50500 nur Frequenzen bis 20 kHz berücksichtigt werden, kommt nur der erste Teil der obigen Formel zur Anwendung.

## 2.1 Nationale Normen und Richtlinien

In Österreich entstand auf Basis der ICNIRP-Guidelines von 1998 die ÖNORM E8850 [3]. Sie hat noch immer den Status einer Vornorm, wird aber mangels Alternativen angewendet. Die ÖNORM E 8850, genauso wie die ICNIRP-Guidelines, gestatten im hier betrachteten Frequenzbereich keine zeitliche Mittelung, außer jene, die für die Messung (Erfassung der Messdaten für eine FFT-Bewertung) notwendig ist.

Abweichend von den ICNIRP-Guidelines erlaubt die ÖNORM E 8850 für Extremitäten erhöhte Grenzwerte. Ob diese erhöhten Werte tatsächlich zur Anwendung kommen können, hängt von der jeweiligen Anwendung ab.

Bevor in Österreich die Vornorm E8850 auf Basis der ICNIRP-Guidelines entstand, wurde die ÖNORM S1119 für die niederfrequenten Magnetfelder angewendet. Obwohl ein direkter Vergleich der Grenzwerte nicht sinnvoll ist, weil die Aufsummierung der einzelnen Harmonischen bei der ÖNORM S1119 nicht gefordert ist, zeigt Abbildung 2-2 den Vergleich der beiden Grenzwerte (gemeinsam mit dem Grenzwert für Herzschrittmacher aus der VDE 848-3-1) für das niederfrequente Magnetfeld der Allgemeinbevölkerung.

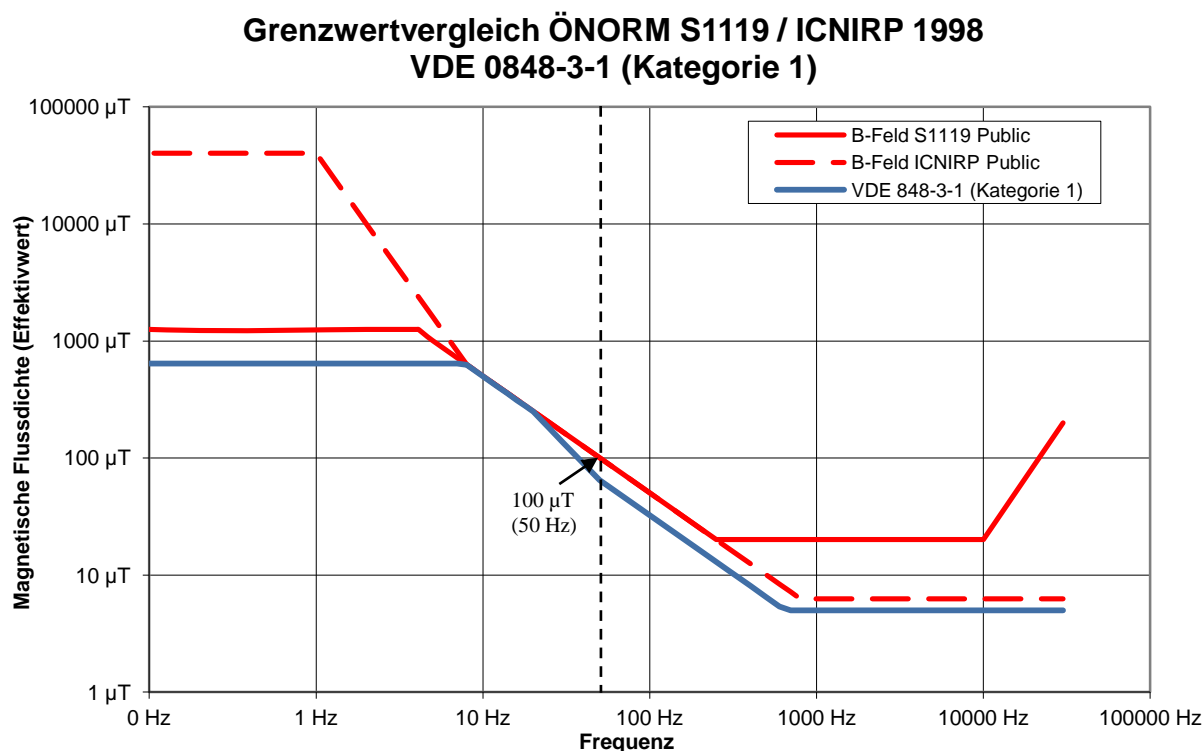


Abbildung 2-2: Vergleich ÖNORM S1119 – ICNIRP 1998 – VDE 848-3-1 (Kategorie 1)

Lediglich bis ca. 8 Hz ist der Grenzwert der ÖNORM S1119 geringer als der der ICNIRP-Guidelines bzw. der E8850. Durch die Aufsummierung der einzelnen Harmonischen (siehe Formel in Abbildung 2-1) bei Feldern mit mehreren Frequenzen stellen die ICNIRP-Guidelines bzw. die E8850 eine viel strengere Forderung dar.

## 2.2 Internationale und europäische Normen und Richtlinien

Eine Richtlinie zum Schutz von Arbeitnehmern vor elektromagnetischen Feldern 2004/40/EG [2] sollte bereits in den EU-Mitgliedsstaaten in das jeweilige nationale Recht umgesetzt und im April 2008 verbindlich werden. Siehe die Pressemitteilung der EU-Kommission im Anhang (14.3)

Der geplante Termin für die Mitgliedsstaaten zur Umsetzung in nationales Recht war der 31.10.2013. Die Richtlinie basiert auf den Grenzwerten der ICNIRP-Guidelines von 1998.

Die Richtlinie 2004/40/EG ist nun wiederum durch die Richtlinie 2013/35/EU [12] ersetzt worden, die am 29.6.2013 in Kraft getreten ist. Die Grenzwerte in dieser Richtlinie basieren auf den Grenzwerten für „Arbeiter“ der ICNIRP 2010 [11]. Interessant dabei ist der DC-Grenzwert von 0,5 mT für Herzschrittmacher. Die Frist für die Umsetzung der Bestimmungen der Richtlinie in nationales Recht ist mit 1. Juli 2016 festgelegt.

Die Abbildung 2-3 zeigt den Vergleich der Grenzwerte ICNIRP 1998 mit ICNIRP 2010 für das magnetische Feld bis 20 kHz.

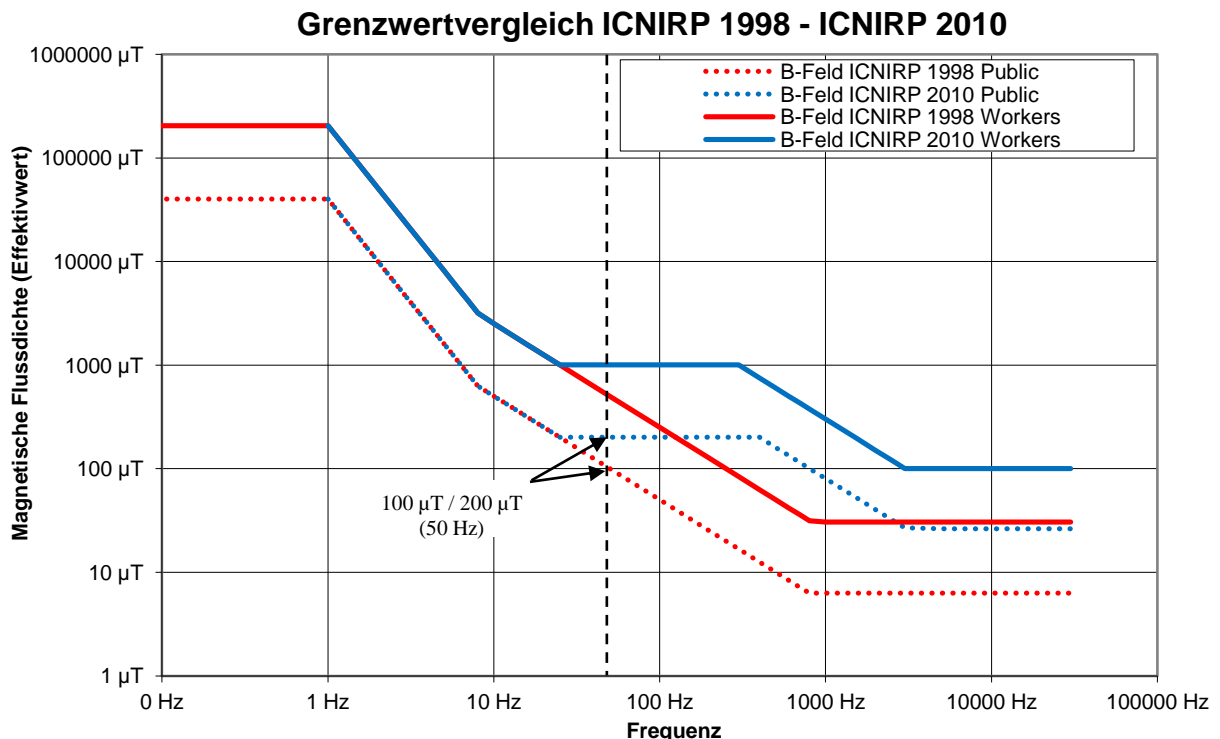


Abbildung 2-3: Vergleich ICNIRP 1998 – ICNIRP 2010

Für internationale Projekte werden, wenn nicht für das betreffende Land strengere Anforderungen gelten, die ICNIRP-Guidelines von 1998 angewendet.

International einheitliche oder anerkannte Grenzwerte für die Beeinflussung von medizinischen Implantaten (vor allem Herzschrittmacher) zu finden, ist wesentlich schwieriger. Und zwar, weil sich die im Betrieb befindlichen Geräte, aufgrund der relativ langen Nutzungsdauer, technisch stark unterscheiden und damit auch unterschiedliches Störfestigkeitsniveau besitzen. Die Anzahl der Geräte mit geringerer Störfestigkeit reduziert sich zwar im Laufe der Zeit, muss aber natürlich bei der Festlegung der zulässigen Magnetfelder berücksichtigt werden. Der zulässige Grenzwert (außer DC-Wert) von ICNIRP 1998 und z. B. DIN VDE 848-3-1 (Herzschrittmacher der Kategorie 1) [4] (siehe Abbildung 2-2) unterscheidet sich nur geringfügig, die Bewertung beim Auftreten mehrerer

Frequenzen ist allerdings unterschiedlich. Bei den ICNIRP-Grenzwerten ist die bekannte Aufsummierung der einzelnen Harmonischen gefordert, bei der DIN VDE 848-3-1 nicht. Damit ist bei kombinierter Anforderung, ICNIRP 1998 Grenzwert und DIN VDE 848-3-1 (Herzschrittmacher der Kategorie 1), bis auf den DC-Grenzwert, praktisch nur auf die Einhaltung des ICNIRP-Grenzwertes zu achten.

### **2.3 Kundenspezifische Forderungen**

Manche Kunden legen die Grenzwerte der magnetischen Felder hinsichtlich Personenschutz selbst fest. Zumeist ist die Quelle, auf deren Basis die Grenzwerte festgelegt werden, nicht zugänglich. Wenn die festgelegten Grenzwerte nahe am technisch Machbaren bzw. unmöglich einzuhalten sind, ist eine oft sehr schwierige und lange Diskussion die Folge.

Nicht selten werden Grenzwerte festgelegt, die bereits durch den Betriebsstrom in der Oberleitung oder 3.Schiene überschritten werden.

Wenn keine Grenzwerte angegeben werden und auch keine nationalen Vorschriften zur Verfügung stehen, werden für neue Projekte die ICNIRP-Guidelines von 1998 und ein DC-Wert von 0,5 mT (aufgrund der Angabe in der EU-Richtlinie 2013/35/EU [12]) als Grenzwert angenommen. Dies unter Berücksichtigung der Messvorschrift EN 50500.

Diese Eigenfestlegung auf Basis von anerkannten Normen ist auch aus Gründen der Produkthaftung (siehe Kapitel 4) notwendig.



### 3. Anforderungen hinsichtlich Zugbeeinflussungssystemen

#### 3.1 Allgemeines

Die Einrichtungen zur Zugbeeinflussung dienen, wie der Name schon sagt, zur Übertragung von Daten zum und vom Schienenfahrzeug, um das Verhalten des Schienenfahrzeuges zu beeinflussen. Diese magnetische Übertragung kann aus einfachen uncodierten Signalen oder aus aufwendig zusammengesetzten Bitmustern bestehen.

Beiden gemein ist, dass ein zu hohes magnetisches Störfeld die fehlerlose Übertragung behindern kann. Dadurch kann im Fall der uncodierten Signale auch ein gefährlicher Zustand entstehen, bei den codierten wird die Verfügbarkeit des Schienenfahrzeuges reduziert.

Bei Neubaustrecken werden nahezu ausschließlich codierte Zugbeeinflussungssysteme eingesetzt, wodurch gefährliche Zustände nicht auftreten. Die Einschränkung in der Verfügbarkeit, verursacht durch störende Magnetfelder, muss allerdings weiterhin vermieden werden.

#### 3.2 Funktion

Die Zugbeeinflussungssysteme, die hier behandelt werden, arbeiten, wie erwähnt, im Frequenzbereich DC bis 20 kHz und verwenden als Empfangsantenne eine Spule.

Diese Spule ist am Drehgestell oder Wagenkasten vor der ersten Achse befestigt und detektiert das Magnetfeld von in der Schiene eingespeisten Strömen. Die Abbildung 3-1 zeigt die prinzipielle Anordnung und die Funktion des ATP-Systems.

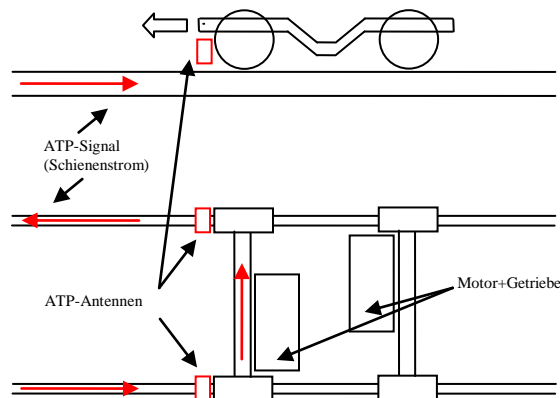


Abbildung 3-1: Funktion ATP-System

Der eingespeiste Strom, das ATP-Signal, wird von der ersten Achse kurzgeschlossen und fließt über diese Achse und die zweite Schiene wieder zurück zur Quelle. Durch Unterbrechungen oder sogenannten „Impedance-bonds“, die den Stromfluss verhindern, werden mehrere ATP-Abschnitte gebildet. In diesen Abschnitten können dann, unabhängig voneinander, Vorgaben für z. B. die Fahrzeuggeschwindigkeit gegeben werden.

Durch die Verwendung von jeweils zwei ATP-Spulen und phasenrichtiger Addition der Signale kann der Einfluss der Traktionsrückströme eliminiert werden. Dies funktioniert natürlich nur, wenn die Aufteilung des Rückstromes symmetrisch auf beide Schienen verteilt ist. Da dies nicht sichergestellt werden kann, werden Störstromgrenzwerte vorgeschrieben.

### Anforderungen

Da die ATP-Antennen das magnetische Feld, der in den Schienen fließenden Signalströme, aufnehmen, tun sie dies auch bei jedem Magnetfeld, das entsprechend orientiert ist.

Bei angetriebenen Drehgestellen sitzen der oder die Motoren und deren Verkabelung zwangsweise relativ nahe zu den ATP-Antennen. Die Anforderungen an das zulässige Magnetfeld an der Position der ATP-Antennen werden vom minimalen Nutzpegel des ATP-Signals abgeleitet. Der minimale Pegel hängt von der verwendeten Arbeitsfrequenz und der Länge der ATP-Abschnitte ab.

### Beispiel:

Minimaler ATP-Signalpegel: 100 mA

Zulässiges Magnetfeld an der ATP-Antenne:

- Annahme: Abstand Achse der ATP-Antenne 20 cm über Schienenoberkante
- $$B \approx \mu_0 \cdot \frac{100mA}{2 \cdot \pi \cdot 0,2m} = 100nT$$
- Faktor 2 als Störsicherheitsabstand
- Maximales Magnetfeld an der Position der ATP-Antenne für die ATP-Arbeitsfrequenz beträgt 50 nT

Wenn der minimale Signalpegel des ATP-Systems nicht bekannt ist, muss man sich an den Störstromgrenzwerten z. B. TS 50238-2 orientieren.

## **3.3 Normen und Grenzwerte**

Wie weiter oben bereits erwähnt, gibt es für das zulässig magnetische Störfeld an den Antennen meist keinen Grenzwert. Gezwungenermaßen muss man daher den indirekten Weg über die Störströme gehen.

### **3.3.1 Normen**

Derzeit existiert praktisch nur eine Vornorm bzw. Technische Spezifikation, die die Kompatibilität von Schienenfahrzeugen mit Gleisstromkreisen behandelt.

Im Folgenden wird kurz beschrieben, worauf bei der Verwendung der in der TS 50238-2 angegebenen Störstromgrenzwerte geachtet werden muss.

Die vollständige Bezeichnung der Technischen Spezifikation mit dem Ausgabedatum vom Juni 2011 lautet:

„TS 50238-2 Bahnanwendungen – Kompatibilität zwischen Fahrzeugen und Gleisfreimeldesystemen – Teil 2: Kompatibilität mit Gleisstromkreisen“

Zur praktischen Umsetzung der europäischen Richtlinien zur Interoperabilität des Eisenbahnsystems sind entsprechende Normen sehr hilfreich. Die TS 50238-2 ist eine solche Norm bzw. Technische Spezifikation und legt Folgendes fest (aus der Einleitung der Norm):

- Störstromgrenzwerte für Fahrzeuge auf der Basis definierter Gleisstromkreise;
- Messverfahren zur Überprüfung der Aussendung von Störströmen durch Fahrzeuge und Nachweis der Kompatibilität mit den Gleisstromkreisen;
- die Rückverfolgbarkeit der Kompatibilitätsanforderungen (Gleisstromkreistypen und zugehörige Grenzwerte)

Bewertungsverfahren:

Bei der Verwendung, der in der Norm/Technischen Spezifikation festgelegten Störstromgrenzwerte für bestimmte Gleisstromkreise, muss natürlich auch das zugrundeliegende Bewertungsverfahren berücksichtigt werden. Z. B. Auswertung über festgelegtes Messfilter, Messzeiten, Bandbreiten uvm..

Ableitung des Störstromes aus der Empfindlichkeit des Gleisstromkreises:

Bei der Festlegung, des vom Fahrzeug zulässigen Störstromes aus der festgestellten Empfindlichkeit des Gleisstromkreises, werden unterschiedliche Sicherheitsreserven berücksichtigt. Da nicht alle dieser Sicherheitsreserven auch für das aus dem zulässigen Störstrom abgeleitete Magnetfeld zutreffen, hat man dadurch bereits einen erhöhten Sicherheitsabstand.

Berücksichtigt werden:

- Abweichungen aufgrund der Installation (Montageabweichungen) und Fehler der Infrastruktur
- Störempfindlichkeit der Gleisstromkreise unter geminderten Gleisbedingungen (Schienenbruch)
- Sicherheitsreserve

Die Sicherheitsreserve hängt dabei von der Art des Gleiskreises und damit von der Klassifizierung der Störung ab. Sie liegt zwischen 10 % (50 %) bei eigensicheren Gleiskreisen und 300 % bei einfachen Gleiskreisen mit nur einer Frequenz.

In der TS 50238-2 ist, neben dem ausführlich beschriebenen Bewertungsverfahren, auch eine Übersicht über die in Europa verwendeten Gleiskreise zu finden.

Diese Übersicht mit den angegebenen Grenzwerten und der entsprechenden Bewertung ist sehr hilfreich.

### **3.3.2 Kundenspezifische Forderungen**

Für Zugbeeinflussungssysteme, die auf magnetischer Basis arbeiten, sind die vom Kunden zur Verfügung gestellten Angaben meist unzureichend.

Interessanterweise wird in den meisten Anforderungsspezifikationen, wenn überhaupt, die Arbeitsfrequenz angegeben, bei der das Zugbeeinflussungssystem arbeitet. Diese Angabe wird als ausreichend empfunden, weil man davon ausgeht, dass damit dem potenziellen Störfeldverursacher ein verbotener Bereich angegeben wird, den er tunlichst zu vermeiden hat.

Aus Sicht des Fahrzeugherstellers wünschenswert wären folgende Angaben:

- Arbeitsfrequenz (Mittelfrequenz)
- Bandbreite des Eingangsfilters
- Art des Eingangsfilters
- Ansprechzeit
- Grenzwert des Magnetfeldes unter Berücksichtigung der obigen Parameter

Da diese Daten in den meisten Fällen nicht zur Verfügung gestellt werden, ist Kreativität gefragt. Aus eventuell vorhandenen anderen Grenzwerten (z. B. Störstrom), der genauen Kenntnis des Funktionsprinzips des Zugbeeinflussungssystems und Erfahrung aus anderen Projekten wird eine Anforderung erstellt. Dies birgt natürlich ein gewisses Risiko.

## 4. Produkthaftung und Produktsicherheit

### 4.1 Produkthaftung

(vollständig zitiert aus [13])

Die Produkthaftung umfasst **Personenschäden** und **Sachschäden**, die durch **Fehler** verursacht werden, welche das **Produkt beim Inverkehrbringen** durch den Haftpflichtigen hatte. Personenschäden werden ohne Unterscheidung zwischen Verbraucher und Unternehmer uneingeschränkt ersetzt (kein Selbstbehalt). Der Sachschaden muss bei einer vom fehlerhaften Produkt verschiedenen Sache eingetreten sein, wobei nur **privat** genutzte Sachen im Rahmen des Produkthaftungsgesetzes (PHG) ersetzt werden.

Als Produkt im Sinne des PHG gilt jede **bewegliche körperliche Sache**, auch wenn sie ein Teil einer anderen beweglichen Sache oder mit einer unbeweglichen Sache verbunden worden ist, einschließlich Energie. Ein Produkt gilt als fehlerhaft, wenn es nicht die Sicherheit bietet, die man unter Berücksichtigung aller Umstände zu erwarten berechtigt ist. Dabei kommt es auf die objektiv berechtigten Sicherheitserwartungen und die Darbietung des Produkts an.

Grundsätzlich trifft die Schadenersatzpflicht den **Hersteller** (Produzenten von End- und Teilprodukten bzw. Grundstoffen), den **Quasi-Hersteller** (das sind Unternehmer, die fremdproduzierte Produkte mit ihren Erkennungszeichen, Namen, Marke etc. versehen) und den **Importeur**, der das Produkt erstmals zum Vertrieb in den europäischen Wirtschaftsraum (EWR) bzw. EU eingeführt und hier **in den Verkehr** gebracht hat.

Es kann jedoch auch ein **Händler** haftpflichtig werden, wenn für den Geschädigten der Hersteller oder Importeur nicht festgestellt werden kann. Der Händler kann sich jedoch dadurch von der Haftung befreien, wenn er dem Geschädigten innerhalb **angemessener Frist** (ca. 1-2 Wochen) den Hersteller oder seinen Vorlieferanten nachweislich namhaft machen kann (Händler sollten möglichst genau die Herkunft der Produkte festhalten). Quasi-Hersteller können sich durch Benennung des tatsächlichen Herstellers nicht von der Produkthaftung befreien.

Teil- oder Grundstoffhersteller müssen nur für die von ihnen fehlerhaft hergestellten Produkte einstehen, wenn genau dieses Teilprodukt bzw. der Grundstoff für den Schaden ursächlich ist. Der Hersteller von Endprodukten haftet auch für die Fehler von Grundstoffen bzw. Teilprodukten (jedoch Regressmöglichkeit beim Teilersteller!).

### 4.2 Produktsicherheit

(vollständig zitiert aus [13])

Zum Beispiel verpflichtet in Österreich das Produktsicherheitsgesetz, das vom Bundesministerium für Arbeit, Soziales und Konsumentenschutz (BMAK) vollzogen wird, Unternehmen, nur sichere Produkte auf den Markt zu bringen bzw. nötigenfalls Schritte zur Gefahrenabwehr zu treffen - also z.B. ein Produkt vom Markt zurückzunehmen.

Die zuständigen Behörden können, falls erforderlich, Unternehmen auch zu geeigneten Maßnahmen verpflichten. Im Extremfall kann sogar ein Rückruf von den VerbraucherInnen und die Vernichtung eines Produktpostens angeordnet werden.

Maßnahmen gegen gefährliche Produkte werden EU-weit über das RAPEX-Verfahren ausgetauscht. Im Jahr 2010 wurden von der Europäischen Kommission rund 2000 RAPEX-Meldungen verlautbart.

### **4.3 Minimalanforderungen**

Aufgrund der Produktsicherheit und der Produkthaftung ist es ratsam, bei fehlender Anforderung, selbst definierte Minimalanforderungen bezüglich der maximal auftretenden Magnetfelder zu erfüllen. Diese Minimalanforderungen sollten vernünftigerweise auf der Basis allgemein anerkannter Richtlinien und Normen basieren.

Besonders ist dabei auf die Grenzwerte für medizinische Implantate zu achten, weil besonders hier eine unmittelbare Wirkung auftreten kann und damit ein Schaden im Sinne der Produkthaftung vorliegt.

## 5. Messung der Magnetfelder

### 5.1 Im Handel erhältliche Messgeräte

Obwohl die Anforderungen an das Messgerät sehr hoch sind, wurde zu Beginn versucht, am Markt ein geeignetes Gerät zu finden. Dabei war von Anfang an klar, dass eine Echtzeit-Schnittstelle vorhanden sein musste, um die Verbindung mit den Fahrzeugdaten herstellen zu können. In den Jahren 2003 bis 2005 waren diejenigen Messgeräte, die Echtzeitausgänge zur Verfügung stellten, aufgrund deren niedriger Auflösung, für die gedachten Zwecke nicht geeignet.

Diese Tatsache war der Antrieb für eine Eigenentwicklung, die im Folgenden genauer erörtert wird.

### 5.2 Eigenentwicklung zur Bewertung von Schienenfahrzeugen

#### 5.2.1 Motivation

Die Motivation war anfänglich, wie oben beschrieben, die Not ein geeignetes Messgerät zu benötigen und wurde rasch durch die ersten Erfolge und der Freude an der Entwicklung gesteigert. Dazu kam, dass man eben genauso gute, wenn nicht bessere Messgeräte als sehr große namhafte Hersteller entwickeln kann. Der Vorteil war, das Messgerät genau auf die besonderen Bedürfnisse hin zu entwickeln und auch eine synchrone Mehrfachmessung möglich zu machen. Diese erlaubt es z. B. zwei bis drei Messstellen gleichzeitig zu erfassen und damit effizienter zu sein.

#### 5.2.2 Vorgaben

Die Vorgaben wurden in erster Linie von den Anforderungen der EN 50500 abgeleitet. Die Eignung für hoch empfindliche Messungen wurde erst nach dem Prototyp entdeckt.

- Frequenzbereich: DC und 5 Hz bis 20 kHz
- Messbereich: DC bis 3 mT; AC von 10 nT bis 100 mT
- Sensorfläche für die AC-Sonde: 100 cm<sup>2</sup>
- Mindestens 2 Sonden (DC+AC) synchron messbar
- Synchrone Erfassung der Fahrzeugdaten (8 Kanäle)
- Kabellänge der Sonden mindestens 5 m
- Messkabeln unempfindlich gegenüber Magnetfeldern
- Aufzeichnung der Rohdaten (nachträglich unterschiedliche Bewertungen möglich)

#### 5.2.3 Prinzip

Das Messprinzip ist sehr einfach und beruht auf dem Induktionsgesetz. Es wird die induzierte Spannung in einer Leiterschleife gemessen:

$$U = - \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{Formel 1}$$

Der Fluss kann also durch Integration der gemessenen Spannung berechnet werden. Dies ist, wie später gezeigt wird, für die zeitliche Bewertung des Magnetfeldes notwendig. Für die Bewertung im Frequenzbereich kann unter der Annahme, dass nur sinusförmige Felder vorhanden sind bzw. jedes beliebige zeitliche periodische Signal durch die Summe aus sinusförmigen Signalen gebildet werden kann, der einfache Zusammenhang zwischen der induzierten Spannung und dem verursachenden Fluss verwendet werden:

$$\Phi = \hat{\Phi} \cdot \sin \omega t \quad \text{Formel 2}$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = \omega \cdot \hat{\Phi} \cdot \cos \omega t \quad \text{Formel 3}$$

$$\hat{U} = -\omega \cdot \hat{\Phi} \cdot \cos \omega t \quad \text{Formel 4}$$

Für eine bestimmte Frequenz ergibt sich somit der Betrag des Flusses zu:

$$\hat{\Phi} = \frac{\hat{U}}{\omega} = \frac{\hat{U}}{2\pi f} \quad \text{Formel 5}$$

Die Leiterschleife (Spule) ist nach den Anforderungen der EN 50500 kreisförmig und hat eine Fläche von 100 cm<sup>2</sup>. Den Betrag der Induktion für eine bestimmte Frequenz erhält man unter Einbeziehung der Fläche und der Windungszahl der Spule zu:

$$\hat{B} = \frac{\hat{U}}{N \cdot A \cdot \omega} = \frac{\hat{U}}{N \cdot A \cdot 2\pi f} \quad \text{Formel 6}$$

Für die Bewertung im Frequenzbereich wird also lediglich die Spannung gemessen, eine FFT durchgeführt, durch die Windungszahl der Spule, die Fläche (100 cm<sup>2</sup>) und die Kreisfrequenz dividiert. So erhält man den Betrag der Induktion für jede der drei Einzelspulen. Um das magnetische Feld vollständig erfassen zu können, werden drei senkrecht aufeinander stehende Spulen verwendet.

Der Gesamtbetrag für eine bestimmte Frequenz ergibt sich durch geometrische Addition somit zu:

$$\hat{B}_{ges} = \sqrt{\hat{B}_x^2 + \hat{B}_y^2 + \hat{B}_z^2} \quad \text{Formel 7}$$

Diese Annahme gilt nur bei Vorhandensein einer einzigen Quelle für das Magnetfeld. Bei mehreren Quellen entspricht diese Art der Auswertung dem Worst Case. Um den tatsächlichen Betrag bei mehreren Magnetfeldquellen zu erhalten, ist die Berücksichtigung der Phasenlage in den einzelnen Messspulen notwendig.

Phasenrichtiges Erfassen des Magnetfeldes bei Vorhandensein mehrerer Quellen:

$$\hat{B}_n(t) = \sqrt{\left(\hat{B}_{nx} \sin(\omega_n \cdot t + \varphi_{nx})\right)^2 + \left(\hat{B}_{ny} \sin(\omega_n \cdot t + \varphi_{ny})\right)^2 + \left(\hat{B}_{nz} \sin(\omega_n \cdot t + \varphi_{nz})\right)^2} \quad \text{Formel 8}$$

Gesucht ist die Zeit t zur Erreichung des Maximalwertes  $\hat{B}_n$  in Abhängigkeit der einzelnen Phasenwinkel.

Der Maximalwert wird durch Differenziation und Nullsetzen des Ausdrucks unter der Wurzel errechnet:

$$\begin{aligned}
& \left( \left( \hat{B}_{nx} \sin(\omega_n \cdot t + \varphi_{nx}) \right)^2 + \left( \hat{B}_{ny} \sin(\omega_n \cdot t + \varphi_{ny}) \right)^2 + \left( \hat{B}_{nz} \sin(\omega_n \cdot t + \varphi_{nz}) \right)^2 \right)' = \\
& \hat{B}_{nx}^2 \cdot \omega_n \cdot 2 \cdot \sin(\omega_n \cdot t + \varphi_{nx}) \cdot \cos(\omega_n \cdot t + \varphi_{nx}) + \hat{B}_{ny}^2 \cdot \omega_n \cdot 2 \cdot \sin(\omega_n \cdot t + \varphi_{ny}) \cdot \cos(\omega_n \cdot t + \varphi_{ny}) + \\
& \hat{B}_{nz}^2 \cdot \omega_n \cdot 2 \cdot \sin(\omega_n \cdot t + \varphi_{nz}) \cdot \cos(\omega_n \cdot t + \varphi_{nz}) = \\
& \hat{B}_{nx}^2 \cdot \omega_n \cdot 2 \cdot (\sin(\omega_n \cdot t) \cdot \cos(\varphi_{nx}) + \cos(\omega_n \cdot t) \cdot \sin(\varphi_{nx})) \cdot (\cos(\omega_n \cdot t) \cdot \cos(\varphi_{nx}) - \sin(\omega_n \cdot t) \cdot \sin(\varphi_{nx})) + \\
& \hat{B}_{ny}^2 \cdot \omega_n \cdot 2 \cdot (\sin(\omega_n \cdot t) \cdot \cos(\varphi_{ny}) + \cos(\omega_n \cdot t) \cdot \sin(\varphi_{ny})) \cdot (\cos(\omega_n \cdot t) \cdot \cos(\varphi_{ny}) - \sin(\omega_n \cdot t) \cdot \sin(\varphi_{ny})) + \\
& \hat{B}_{nz}^2 \cdot \omega_n \cdot 2 \cdot (\sin(\omega_n \cdot t) \cdot \cos(\varphi_{nz}) + \cos(\omega_n \cdot t) \cdot \sin(\varphi_{nz})) \cdot (\cos(\omega_n \cdot t) \cdot \cos(\varphi_{nz}) - \sin(\omega_n \cdot t) \cdot \sin(\varphi_{nz})) = \\
& \hat{B}_{nx}^2 \cdot \omega_n \cdot 2 \cdot (\sin(\omega_n \cdot t) \cdot \cos(\omega_n \cdot t) \cdot \cos^2(\varphi_{nx}) - \sin^2(\omega_n \cdot t) \cdot \cos(\varphi_{nx}) \cdot \sin(\varphi_{nx}) + \cos^2(\omega_n \cdot t) \cdot \sin(\varphi_{nx}) \cdot \cos(\varphi_{nx}) \\
& - \cos(\omega_n \cdot t) \cdot \sin(\omega_n \cdot t) \cdot \sin^2(\varphi_{nx})) + \hat{B}_{ny}^2 \cdot \omega_n \cdot 2 \cdot (\sin(\omega_n \cdot t) \cdot \cos(\omega_n \cdot t) \cdot \cos^2(\varphi_{ny}) - \sin^2(\omega_n \cdot t) \cdot \cos(\varphi_{ny}) \cdot \sin(\varphi_{ny}) + \\
& \cos^2(\omega_n \cdot t) \cdot \sin(\varphi_{ny}) \cdot \cos(\varphi_{ny}) - \cos(\omega_n \cdot t) \cdot \sin(\omega_n \cdot t) \cdot \sin^2(\varphi_{ny})) + \hat{B}_{nz}^2 \cdot \omega_n \cdot 2 \cdot (\sin(\omega_n \cdot t) \cdot \cos(\omega_n \cdot t) \cdot \cos^2(\varphi_{nz}) - \\
& \sin^2(\omega_n \cdot t) \cdot \cos(\varphi_{nz}) \cdot \sin(\varphi_{nz}) + \cos^2(\omega_n \cdot t) \cdot \sin(\varphi_{nz}) \cdot \cos(\varphi_{nz}) - \cos(\omega_n \cdot t) \cdot \sin(\omega_n \cdot t) \cdot \sin^2(\varphi_{nz})) = \\
& \hat{B}_{nx}^2 \cdot \omega_n \cdot 2 \cdot [\sin(\omega_n \cdot t) \cdot \cos(\omega_n \cdot t) \cdot (\cos^2(\varphi_{nx}) - \sin^2(\varphi_{nx})) + \cos(\varphi_{nx}) \cdot \sin(\varphi_{nx}) \cdot (\cos^2(\omega_n \cdot t) - \sin^2(\omega_n \cdot t))] + \\
& \hat{B}_{ny}^2 \cdot \omega_n \cdot 2 \cdot [\sin(\omega_n \cdot t) \cdot \cos(\omega_n \cdot t) \cdot (\cos^2(\varphi_{ny}) - \sin^2(\varphi_{ny})) + \cos(\varphi_{ny}) \cdot \sin(\varphi_{ny}) \cdot (\cos^2(\omega_n \cdot t) - \sin^2(\omega_n \cdot t))] + \\
& \hat{B}_{nz}^2 \cdot \omega_n \cdot 2 \cdot [\sin(\omega_n \cdot t) \cdot \cos(\omega_n \cdot t) \cdot (\cos^2(\varphi_{nz}) - \sin^2(\varphi_{nz})) + \cos(\varphi_{nz}) \cdot \sin(\varphi_{nz}) \cdot (\cos^2(\omega_n \cdot t) - \sin^2(\omega_n \cdot t))] = \\
& \hat{B}_{nx}^2 \cdot \omega_n \cdot 2 \cdot [\sin(\omega_n \cdot t) \cdot \cos(\omega_n \cdot t) \cdot \cos(2\varphi_{nx}) + \cos(\varphi_{nx}) \cdot \sin(\varphi_{nx}) \cdot \cos(2\omega_n \cdot t)] + \\
& \hat{B}_{ny}^2 \cdot \omega_n \cdot 2 \cdot [\sin(\omega_n \cdot t) \cdot \cos(\omega_n \cdot t) \cdot \cos(2\varphi_{ny}) + \cos(\varphi_{ny}) \cdot \sin(\varphi_{ny}) \cdot \cos(2\omega_n \cdot t)] + \\
& \hat{B}_{nz}^2 \cdot \omega_n \cdot 2 \cdot [\sin(\omega_n \cdot t) \cdot \cos(\omega_n \cdot t) \cdot \cos(2\varphi_{nz}) + \cos(\varphi_{nz}) \cdot \sin(\varphi_{nz}) \cdot \cos(2\omega_n \cdot t)] = \\
& \hat{B}_{nx}^2 \cdot \omega_n \cdot 2 \cdot \left[ \frac{1}{2} \sin(2\omega_n \cdot t) \cdot \cos(2\varphi_{nx}) + \frac{1}{2} \sin(2\varphi_{nx}) \cdot \cos(2\omega_n \cdot t) \right] + \\
& \hat{B}_{ny}^2 \cdot \omega_n \cdot 2 \cdot \left[ \frac{1}{2} \sin(2\omega_n \cdot t) \cdot \cos(2\varphi_{ny}) + \frac{1}{2} \sin(2\varphi_{ny}) \cdot \cos(2\omega_n \cdot t) \right] + \\
& \hat{B}_{nz}^2 \cdot \omega_n \cdot 2 \cdot \left[ \frac{1}{2} \sin(2\omega_n \cdot t) \cdot \cos(2\varphi_{nz}) + \frac{1}{2} \sin(2\varphi_{nz}) \cdot \cos(2\omega_n \cdot t) \right] = \\
& \hat{B}_{nx}^2 \cdot \omega_n \cdot [\sin(2\omega_n \cdot t) \cdot \cos(2\varphi_{nx}) + \sin(2\varphi_{nx}) \cdot \cos(2\omega_n \cdot t)] + \\
& \hat{B}_{ny}^2 \cdot \omega_n \cdot [\sin(2\omega_n \cdot t) \cdot \cos(2\varphi_{ny}) + \sin(2\varphi_{ny}) \cdot \cos(2\omega_n \cdot t)] + \\
& \hat{B}_{nz}^2 \cdot \omega_n \cdot [\sin(2\omega_n \cdot t) \cdot \cos(2\varphi_{nz}) + \sin(2\varphi_{nz}) \cdot \cos(2\omega_n \cdot t)] = 0 / : \cos(2\omega_n \cdot t) \\
& \hat{B}_{nx}^2 \cdot \omega_n \cdot [\tan(2\omega_n \cdot t) \cdot \cos(2\varphi_{nx}) + \sin(2\varphi_{nx})] + \\
& \hat{B}_{ny}^2 \cdot \omega_n \cdot [\tan(2\omega_n \cdot t) \cdot \cos(2\varphi_{ny}) + \sin(2\varphi_{ny})] + \\
& \hat{B}_{nz}^2 \cdot \omega_n \cdot [\tan(2\omega_n \cdot t) \cdot \cos(2\varphi_{nz}) + \sin(2\varphi_{nz})] = 0
\end{aligned}$$

$$\tan(2\omega_n \cdot t) = - \frac{\hat{B}_{nx}^2 \cdot \sin(2\varphi_{nx}) + \hat{B}_{ny}^2 \cdot \sin(2\varphi_{ny}) + \hat{B}_{nz}^2 \cdot \sin(2\varphi_{nz})}{\hat{B}_{nx}^2 \cdot \cos(2\varphi_{nx}) + \hat{B}_{ny}^2 \cdot \cos(2\varphi_{ny}) + \hat{B}_{nz}^2 \cdot \cos(2\varphi_{nz})} \Rightarrow$$

Formel 9

$$t_{\max} = - \frac{1}{2\omega_n} \left[ \arctan \left( \frac{\hat{B}_{nx}^2 \cdot \sin(2\varphi_{nx}) + \hat{B}_{ny}^2 \cdot \sin(2\varphi_{ny}) + \hat{B}_{nz}^2 \cdot \sin(2\varphi_{nz})}{\hat{B}_{nx}^2 \cdot \cos(2\varphi_{nx}) + \hat{B}_{ny}^2 \cdot \cos(2\varphi_{ny}) + \hat{B}_{nz}^2 \cdot \cos(2\varphi_{nz})} \right) + \pi \right]$$



Grenzfälle:

Zur Vereinfachung wird vorausgesetzt, dass die Amplituden in den drei Spulen  $\hat{B}_x = \hat{B}_y = \hat{B}_z = 1$  sind.

- Alle Phasenwinkel sind gleich. Das Feld wird von einer einzigen Quelle erzeugt:

Für die Zeit  $t_{\max}$  zur Erreichung des Maximums des magnetischen Feldes wird der Ausdruck zu:

$$t_{\max}(\varphi_n = \varphi_{nx} = \varphi_{ny} = \varphi_{nz}) = -\frac{1}{2\omega_n} \left[ \arctan\left(\frac{\hat{B}_{nx}^2 \cdot \sin(2\varphi_n) + \hat{B}_{ny}^2 \cdot \sin(2\varphi_n) + \hat{B}_{nz}^2 \cdot \sin(2\varphi_n)}{\hat{B}_{nx}^2 \cdot \cos(2\varphi_n) + \hat{B}_{ny}^2 \cdot \cos(2\varphi_n) + \hat{B}_{nz}^2 \cdot \cos(2\varphi_n)}\right) + \pi \right]$$

$$t_{\max}(\varphi_n = \varphi_{nx} = \varphi_{ny} = \varphi_{nz}) = -\frac{1}{2\omega_n} \left[ \arctan\left(\frac{(\hat{B}_{nx}^2 + \hat{B}_{ny}^2 + \hat{B}_{nz}^2) \cdot \sin(2\varphi_n)}{(\hat{B}_{nx}^2 + \hat{B}_{ny}^2 + \hat{B}_{nz}^2) \cdot \cos(2\varphi_n)}\right) + \pi \right]$$

$$t_{\max}(\varphi_n = \varphi_{nx} = \varphi_{ny} = \varphi_{nz}) = -\frac{1}{2\omega_n} [\arctan(\tan(2\varphi_n)) + \pi]$$

$$t_{\max}(\varphi_n = \varphi_{nx} = \varphi_{ny} = \varphi_{nz}) = -\frac{1}{2\omega_n} [2\varphi_n + \pi]$$

Bei  $\varphi_n = 0$  wird das Maximum nach  $t_{\max} = \frac{\pi}{2\omega_n}$  erreicht, also nach einer Viertelperiode, was bei einem sinusförmigen Verlauf eben zu erwarten war.

$$\hat{B} = \sqrt{\hat{B}_x^2 + \hat{B}_y^2 + \hat{B}_z^2} = \sqrt{3}$$

- Jeweils 45 ° Phasenverschiebung zwischen den einzelnen Spulen:

Für die Zeit  $t_{\max}$  zur Erreichung des Maximums des magnetischen Feldes wird der Ausdruck zu:

$$t_{\max}(\varphi_{nx} = 0, \varphi_{ny} = 45^\circ, \varphi_{nz} = 90^\circ) = -\frac{1}{2\omega_n} \left[ \arctan\left(\frac{\hat{B}_{ny}^2}{\hat{B}_{nx}^2 - \hat{B}_{nz}^2}\right) + \pi \right]$$

$$t_{\max}(\varphi_{nx} = 0, \varphi_{ny} = 45^\circ, \varphi_{nz} = 90^\circ) = -\frac{1}{2\omega_n} [\arctan(\infty) + \pi]$$

$$t_{\max}(\varphi_{nx} = 0, \varphi_{ny} = 45^\circ, \varphi_{nz} = 90^\circ) = -\frac{1}{2\omega_n} \left[ \frac{\pi}{2} + \pi \right]$$

$$t_{\max}(\varphi_{nx} = 0, \varphi_{ny} = 45^\circ, \varphi_{nz} = 90^\circ) = -\frac{3\pi}{4\omega_n} (\hat{=} 225^\circ)$$

$$\hat{B} = \sqrt{\hat{B}_x^2 \cdot \sin^2(225^\circ + 0) + \hat{B}_y^2 \cdot \sin^2(225^\circ + 45^\circ) + \hat{B}_z^2 \cdot \sin^2(225^\circ + 90^\circ)} = \sqrt{2}$$

- Jeweils 60 ° Phasenverschiebung zwischen den einzelnen Spulen:

Für die Zeit  $t_{\max}$  zur Erreichung des Maximums des magnetischen Feldes wird der Ausdruck zu:

$$t_{\max}(\varphi_{nx} = 0, \varphi_{ny} = 60^\circ, \varphi_{nz} = 120^\circ) = -\frac{1}{2\omega_n} \left[ \arctan\left(\frac{\hat{B}_{ny}^2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} - \hat{B}_{nz}^2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}{\hat{B}_{nx}^2 - \hat{B}_{ny}^2 \cdot \frac{1}{2} - \hat{B}_{nz}^2 \cdot \frac{1}{2}}\right) + \pi \right]$$

$$t_{\max}(\varphi_{nx} = 0, \varphi_{ny} = 60^\circ, \varphi_{nz} = 120^\circ) = -\frac{1}{2\omega_n} \left[ \arctan\left(\frac{0}{0}\right) + \pi \right]$$

$$t_{\max}(\varphi_{nx} = 0, \varphi_{ny} = 60^\circ, \varphi_{nz} = 120^\circ) = \text{unbestimmt}$$

Für diesen Fall ergeben sich unendlich viele Lösungen.  
 Unabhängig von der Zeit ( $x$ ) ergibt sich der Maximalwert zu:

$$\hat{B} = \sqrt{\hat{B}_x^2 \cdot \sin^2(x^\circ + 0) + \hat{B}_y^2 \cdot \sin^2(x^\circ + 60^\circ) + \hat{B}_z^2 \cdot \sin^2(x^\circ + 120^\circ)} = \sqrt{1,5} = 1,225$$

Bei einer Phasenverschiebung von jeweils  $60^\circ$  bzw.  $120^\circ$  ergibt sich der geringste Wert des Summenvektors.

Bei der Annahme von gleichen Amplituden in den einzelnen Spulen liegt der maximale Unterschied zwischen phasenrichtiger Messung und Nichtberücksichtigung der Phasenverschiebung bei einem Faktor von  $\sqrt{2}$ .

Die obige Formel ist durch die Anwendung der Winkelfunktionen nur in bestimmten Grenzen gültig. Sie wird im Onlinemodus des Mess-Programmes als Vergleichsgröße zur Erkennung von eventuell auftretenden Phasenverschiebungen in den einzelnen Spulen verwendet. Die detaillierte Auswertung der Phasenverschiebung kann, aufgrund des Rechenaufwandes, nur offline erfolgen. Dabei wird frequenzselektiv eine Maximalwertbestimmung des Feldvektors durchgeführt.

## 5.2.4 Spezifikation

- Messbereich
- Genauigkeit
- Linearität
- Auswertungsmöglichkeiten
- Aufzeichnungsmöglichkeit – Offline-Auswertungen
- Fahrzeugdaten
- Softwareeinstellungen
- Erweiterbarkeit der Software

## 5.2.5 Aufbau

Der Aufbau des Magnetfeldmesssystems besteht aus folgenden Komponenten:

- B-Feld-Sonde (3-achsig) inkl. Messkabeln (AC- und DC-Erfassung)
- PXI-Datenerfassungskarte für die AC-Erfassung, DC-Erfassung und für die Fahrzeugdaten
- PXI-Chassis inkl. Stromversorgung für die DC-Erfassung
- Laptop

### 5.2.5.1 B-Feld-Sonde

Die B-Feld-Sonde besteht aus der Erfassung des AC- und des DC-Magnetfeldes. Eine B-Feld-Sonde kann daher den Frequenzbereich von DC bis 20 kHz durchgehend erfassen. Bei der Auswertung im Frequenzbereich werden die getrennt gemessenen Bereiche zu einem Gesamtergebnis (Gesamt-FFT) zusammengefasst. Wenn im Folgenden von einer Magnetfeld-Sonde gesprochen wird, ist die Kombination aus AC- und DC-Erfassung zu verstehen.

### 5.2.5.1.1 AC-Feld-Erfassung

Die AC-Feld-Erfassung besteht aus drei senkrecht aufeinander stehenden Spulen (siehe Abbildung 5-1). Von jeder Spule führt jeweils ein Koaxialkabel zu einem Anschluss an der Datenerfassungskarte. Jeweils drei Kabel (also pro AC-Feld-Erfassung) sind in einem gemeinsamen Kabelmantel zusammengefasst. Die induzierten Spannungen in den einzelnen Spulen sind damit vollkommen unabhängig voneinander erfassbar.

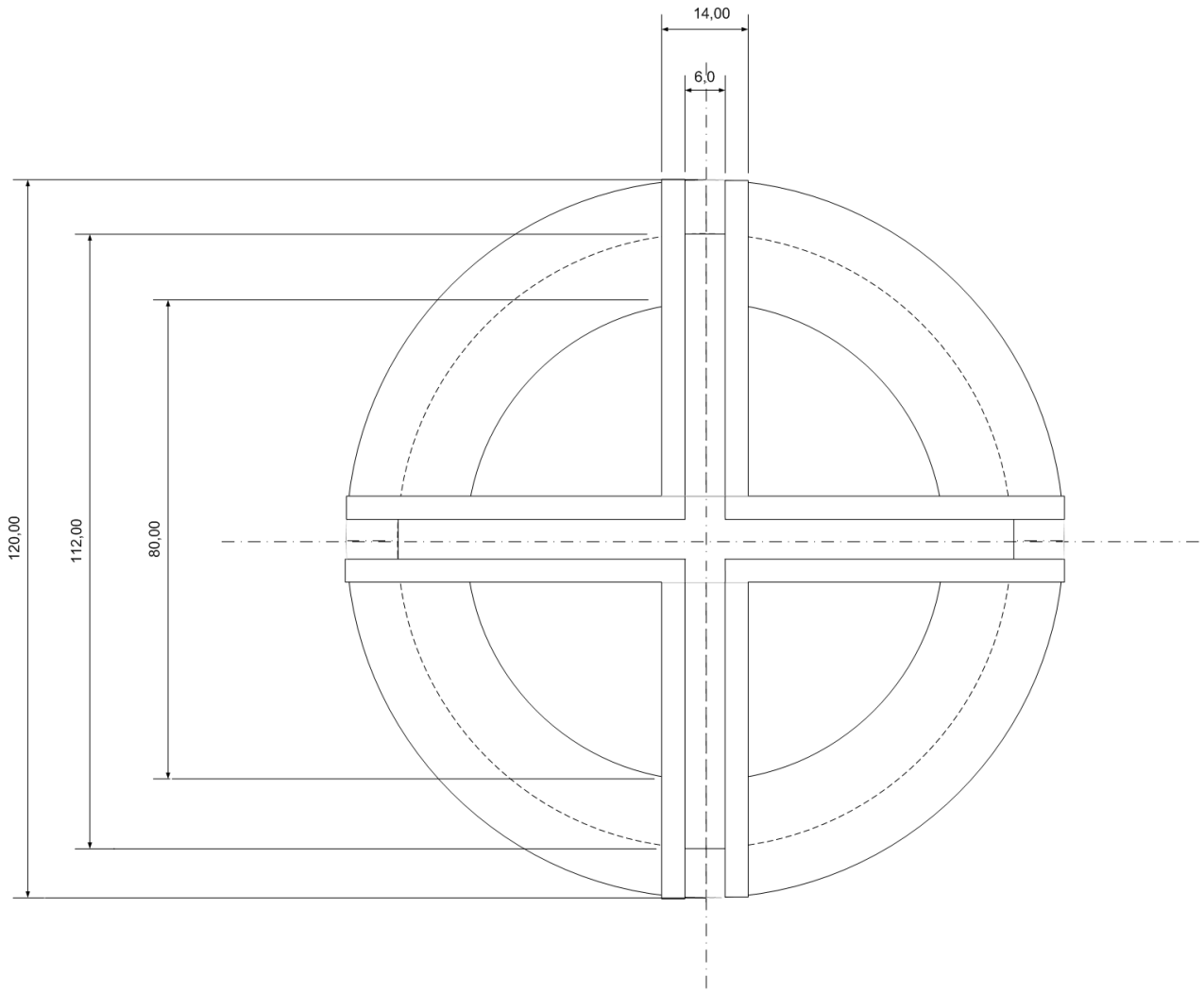


Abbildung 5-1: Aufbau AC-Erfassung

### 5.2.5.1.2 DC-Feld-Erfassung

Die DC-Feld-Erfassung von der Firma Wuntronic (Abbildung 5-2) ist ein 3-achsiges Magnetometer, das für einen Frequenzbereich von DC bis 400 Hz geeignet ist. In dem vorgestellten B-Feld Messsystem wird das Magnetometer für den Frequenzbereich von DC bis 5 Hz eingesetzt. Durch diesen eingeschränkten Frequenzbereich ist eine Beeinflussung der Verbindungskabel durch externe Magnetfelder sehr unwahrscheinlich. Das Magnetometer wird von einem im PXI-Chassis eingebauten und entstörten Netzteil versorgt (+/- 15 V DC).



Abmessungen:

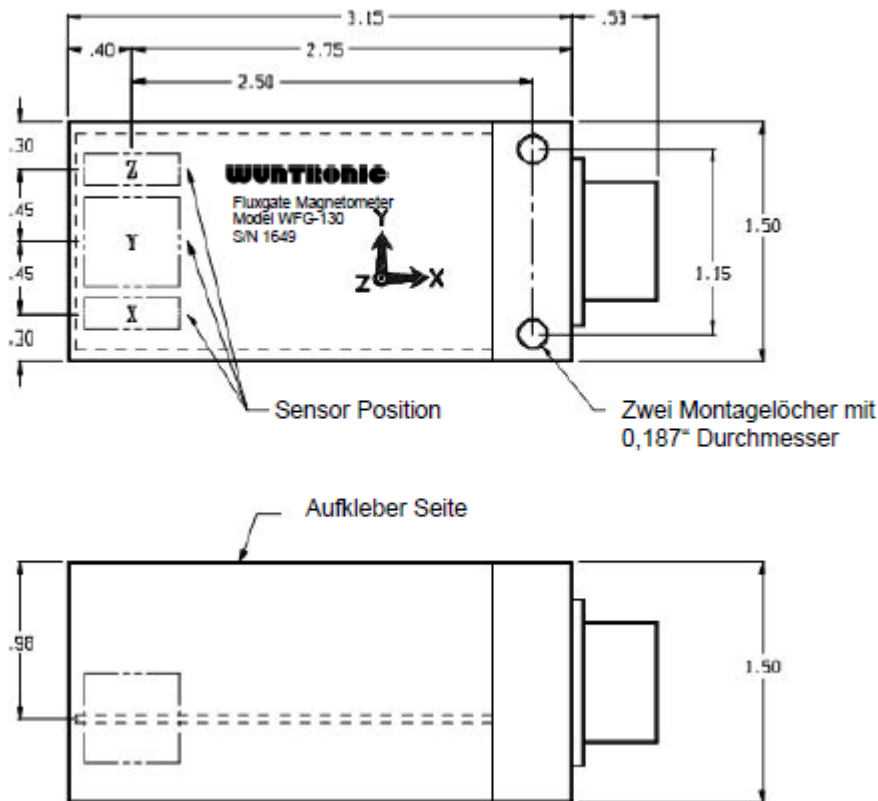


Abbildung 5-2: DC-Erfassung

### Spezifikation:

Empfindlichkeit: ..... 2V/Gauss (bei  $\pm 30$  G dann 1 V/Gauss)  
 Dynamischer Bereich: .....  $\pm 5$  Gauss (  $\pm 30$  G Bereich möglich)  
 Linearität: .....  $\pm 0,2\%$   
 Orthogonalität und Ausrichtung mit einer Referenz-Oberfläche: .....  $\pm 0,2^\circ$   
 Rauschen: .....  $< 0,02$  mG eff. bei 1 Hz $^{1/2}$   
 Frequenzgang: ..... DC bis 400 Hz (-3 db)  
 Fehlererkennungs-Signal: ..... 0,05 Gauss bei 1000 Hz  
 Fehlererkennungs-Ausgang: ..... TTL HIGH für Ok, low für Fehler

Speisung: .....  $\pm 15$ V  
 Stromverbrauch: ..... +55 mA bei 15V -43 mA bei -15V

Grösse (ohne Stecker): ..... 38,10 mm x 38,10 mm x 76,20 mm

Steckverbindung: ..... 10 pin Bendix

Bestell Nr.	Modell	Beschreibung
WFG-130-100	WFG-130	3-achsiges Fluxgate Magnetometer $\pm 5$ G Bereich
WFG-130-110	WFG-130-30	3-achsiges Fluxgate Magnetometer $\pm 30$ G Bereich
WFG-131-100	Fail tone	Aktive Fehlerkennung

### 5.2.5.2 PXI-Datenerfassungskarten

Es wird jeweils eine Datenerfassungskarte für die Erfassung der Signale der AC-Feld-Erfassung, der DC-Feld-Erfassung und der Fahrzeugdaten, der Firma National Instruments vom Typ NI-PXI-4472B verwendet (Abbildung 5-3).



Abbildung 5-3: NI-PXI 4472B

Die Datenerfassungskarte NI-PXI-4472B hat folgende Eigenschaften:

- Synchronisation von bis zu 5000 Kanälen in einem PXI-System
- A/D-Wandler mit 24-bit Auflösung und einem Dynamikbereich von 110 dB
- Eingangsspannungsbereich  $\pm 10$  V
- 8 simultan abgetastete Analogeingänge, 102,4 kS/s
- Über Software konfigurierbare AC/DC-Kopplung
- Variable Antialiasing-Filter

Das Modul PXI-4472B ist für die Messung von niederfrequenten AC-Signalen optimiert. Dieses Modul mit acht Kanälen (für die beiden AC- und DC-Sonden werden jeweils sechs Kanäle verwendet) ermöglicht die Durchführung hochgenauer Messungen im Frequenzbereich. Die acht Kanäle ermöglichen die simultane Digitalisierung der Eingangssignale über eine Bandbreite von DC bis 45 kHz.

### 5.2.5.3 PXI-Chassis

Als PXI-Chassis wird ein Chassis vom Typ PXI 1033 mit integriertem Controller der Firma National Instruments verwendet. Von den fünf möglichen Steckplätzen werden drei für die Datenerfassungskarten vom Typ PXI-4472B verwendet, der noch zur Verfügung stehende Platz wird für die Stromversorgung und die Ankopplung der DC-Feld-Erfassung verwendet (siehe Abbildung 5-4)

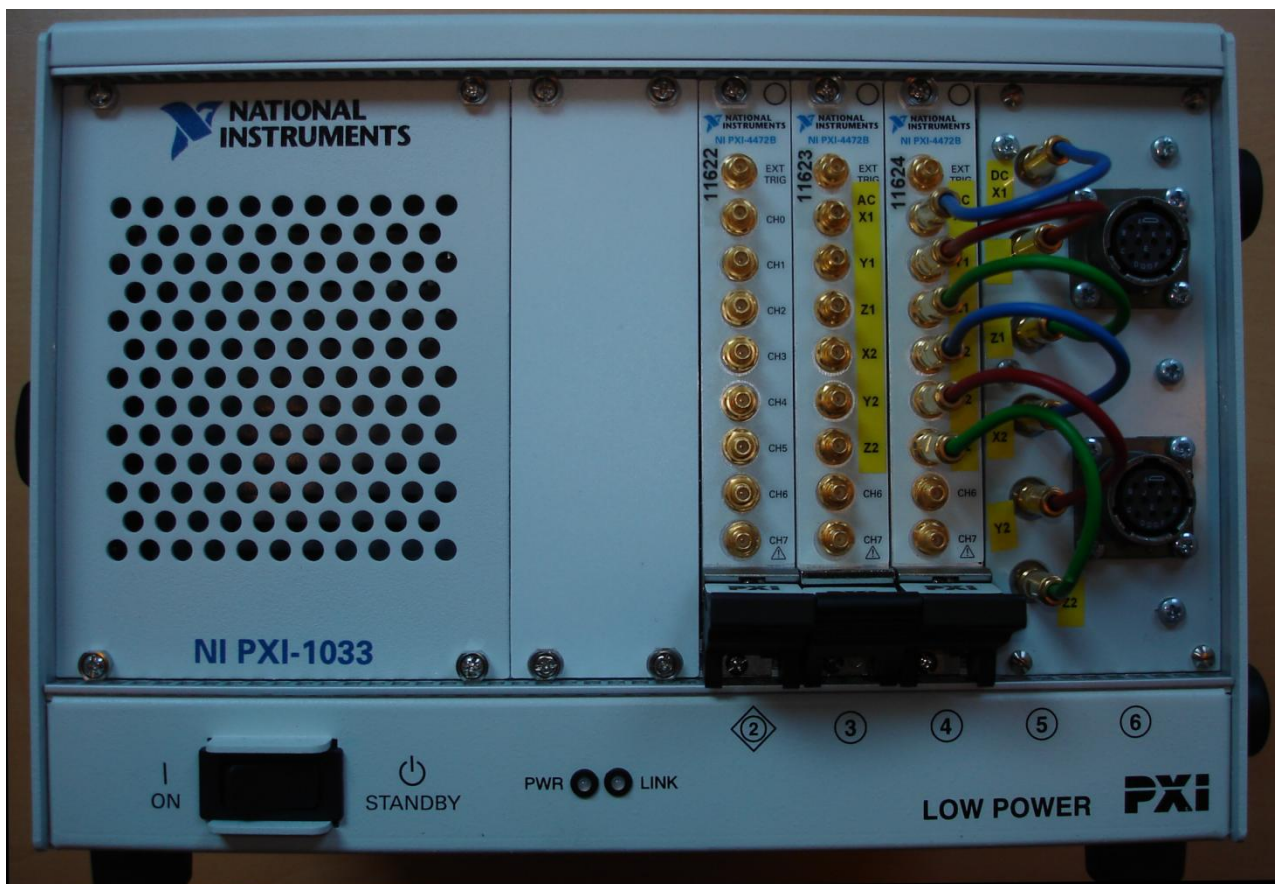


Abbildung 5-4: PXI-Chassis mit DAQ-Karten

Das Chassis verfügt über keine interne Datenverarbeitung. Diese wird vollständig vom steuernden Personal Computer (Laptop) übernommen.

### 5.2.6 LabView-Software

Die Software des B-Feld-Messsystems ist so aufgebaut, dass sie den jeweiligen Anforderungen angepasst werden kann.

#### 5.2.6.1 Bedienoberfläche

Die Abbildung 5-5 zeigt ein Front-Panel mit zusätzlicher Anzeige der Induktion in den Frequenz-Bändern des verwendeten ATP-Systems.

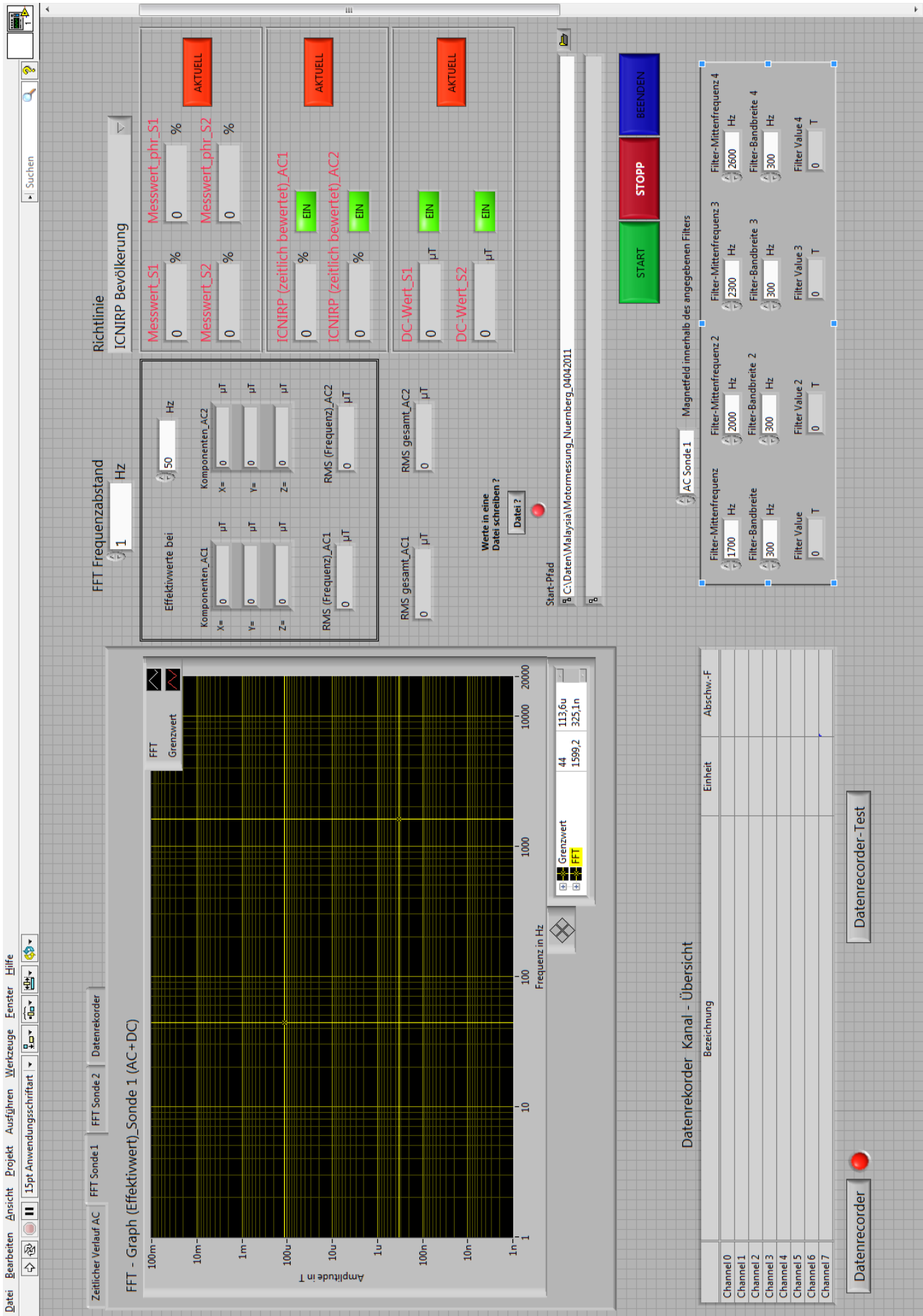


Abbildung 5-5: Bedienoberfläche Messsoftware



Das Front-Panel (lesbar, also um 90° im Uhrzeigersinn gedreht) kann man grob in 4 Bereiche einteilen.

Visualisierung	Personenschutz Einzelfrequenz
Datenrekorder	Zusatzfunktionen

### Visualisierung

Die Visualisierung bietet vier Anzeigen

- Den zeitlichen Verlauf der induzierten Spannungen in jede einzelne Spule der AC-Feld-Erfassung
- Die FFT der Sonde 1
- Die FFT der Sonde 2
- Den Datenrekorder

Der zeitliche Verlauf der induzierten Spannungen der einzelnen Spulen der AC-Feld-Erfassung ist vor allem zur Überprüfung der einwandfreien Funktion, zusammen mit dem später gezeigten Testrahmen, notwendig.

Die FFT-Anzeigen sind eine gute optische Kontrolle für den Abstand zum jeweiligen Grenzwert und der Zuordnung einzelner auftretender Frequenzen zu möglichen Verursachern.

Der Datenrekorder zeigt die zur Charakterisierung des Fahrzeugzustandes notwendigen Daten an. Um die auftretenden Felder richtig bewerten zu können, ist deshalb, je nachdem um welches Fahrzeug es sich handelt, die Aufzeichnung von z. B. der Netzspannung, des Netzstromes, des Motorstromes, der Motorfrequenz usw. notwendig.

### Personenschutz / Einzelfrequenz

Auf der rechten Seite sieht man die Anzeigen des Kernprogrammes, die sich auf die Bewertung des B-Feldes hinsichtlich des Personenschutzes beziehen.

- Die Wahl des anzuwendenden Grenzwertes bzw. der Richtlinie
- Die Ergebnisse der beiden Magnetfeld-Sonden (gesamter Frequenzbereich von DC bis 20 kHz), ohne und mit Berücksichtigung der Phasenverschiebung
- Die zeitliche Bewertung nach ICNIRP (nur AC-Feld-Erfassung > 5 Hz)
- Das DC-Magnetfeld

Es besteht die Wahl einer Quasi-Echtzeit-Anzeige und einer Max-Hold-Anzeige, um sofort den maximal erreichten Wert zu sehen.

Auf der linken Seite oben wird der FFT-Frequenzabstand bzw. die Aufzeichnungslänge für jede einzelne Bewertung gewählt.

Darunter gibt es die Möglichkeit der Auswertung einzelner Frequenzen der AC-Feld-Erfassung. Die Auswertung erfolgt unter der Anwendung eines Filters mit der Bandbreite des doppelten FFT-Frequenzabstandes, um eine Fehlmessung durch die immer vorhandene Frequenzabweichung zu vermeiden.

Zusätzlich wird noch der Gesamteffektivwert des Feldes der jeweiligen AC-Feld-Erfassung angezeigt.

#### Datenrekorder

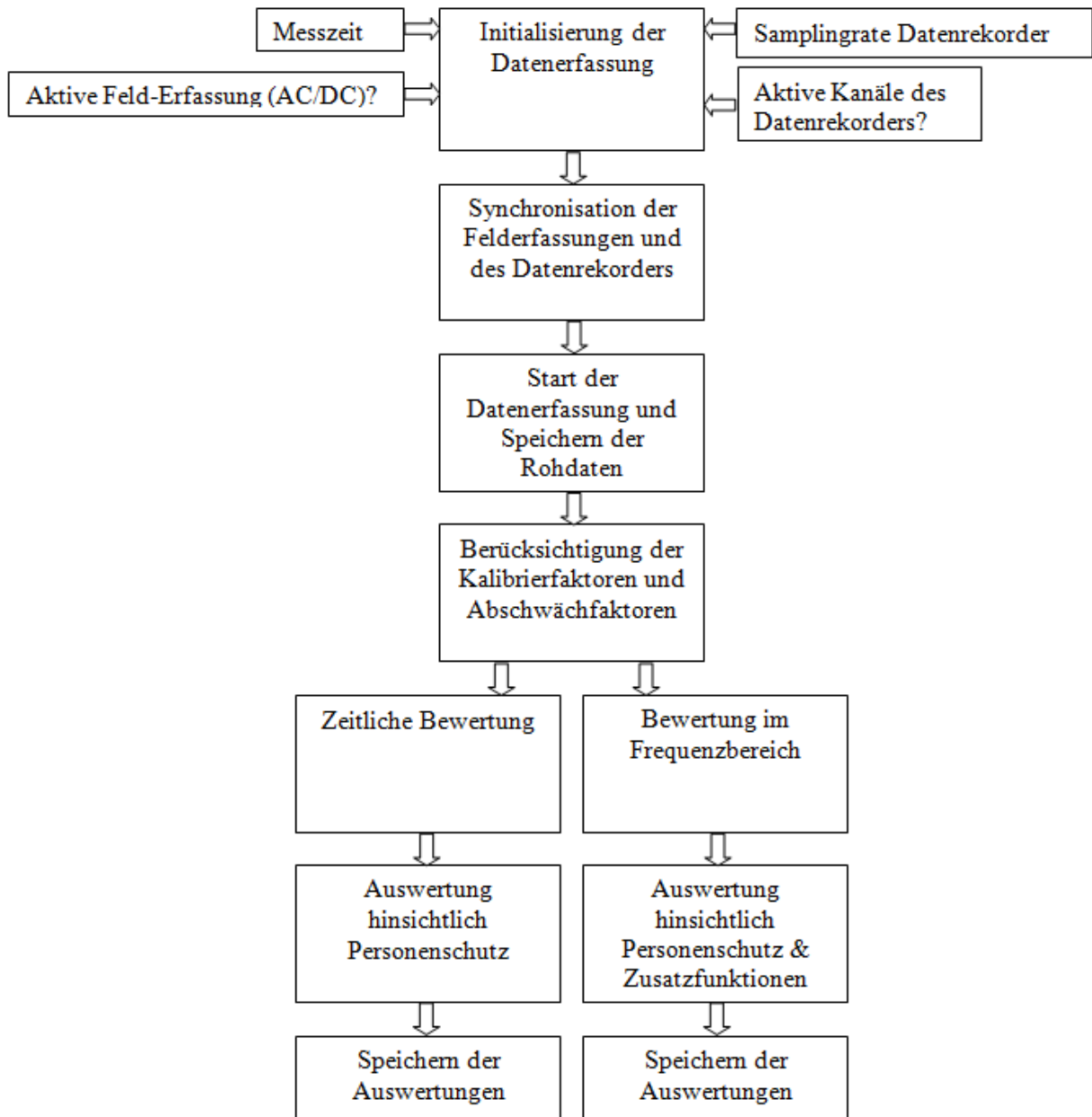
Der Datenrekorder zeigt die Fahrzeugdaten an. Dabei muss die zu erfassende Größe als Spannungswert mit einer Amplitude von maximal +/- 10 V zur Verfügung gestellt werden. Die Bezeichnung, die Einheit und die notwendige Abschwächung können für jeden der acht möglichen Kanäle angegeben werden. Die Daten werden unter Berücksichtigung dieser Angaben abgespeichert. Durch die Synchronisation mit der Messung der Magnetfelder kann ein bestimmtes Magnetfeld viel leichter einer verursachenden Quelle zugeordnet oder der Wert korrigiert werden.

#### Zusatzfunktionen

Projektabhängig kann es erforderlich sein, zusätzliche Messungen bzw. Auswertungen zu machen. Im gezeigten Beispiel wird das Magnetfeld entsprechend den vorhandenen ATP-Frequenzbändern bewertet.

### 5.2.6.2 Programm-Aufbau

Vereinfacht ergibt sich folgender Aufbau des Programmes:



### 5.2.6.3 Programm-Beschreibung

#### 5.2.6.3.1 Datenerfassung

Durch die Trennung der Datenerfassung der AC- und DC - Signale auf zwei Datenerfassungskarten sind unterschiedliche Abtastraten möglich. Dadurch wird sowohl Rechenzeit als auch Speicherplatz gespart, weil eben die DC – Erfassung mit wesentlich geringeren Abtastraten auskommt.

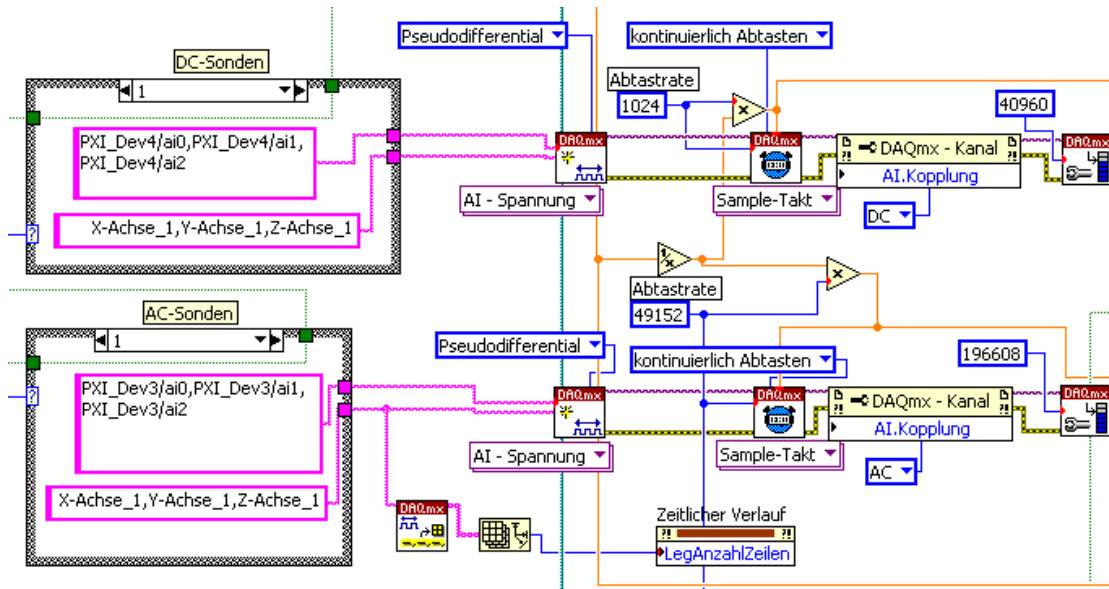


Abbildung 5-6: AC- und DC-Erfassung

Durch die Deaktivierung einzelner Sonden kann ebenfalls Rechenzeit und Speicherplatz gespart werden, falls diese nicht benötigt werden. Zu sehen links in der Abbildung 5-6 bei den Auswahlkästen mit der Überschrift „DC-Sonden“ und „AC-Sonden“.

Die Abtastraten wurden mit 1024 S/s (minimale Abtastrate der Datenerfassungskarte NI 4472) für die DC-Erfassung und 49152 S/s für die AC-Erfassung festgelegt. Aufgrund der in der Datenerfassungskarte installierten Antialiasing-Filter ergibt sich die obere Messfrequenz zu (Angabe im Datenblatt):

$$f_{\max} = 0,4535 \cdot f_s = 0,4535 \cdot 49152 \text{ S/s} = 22290 \text{ Hz}$$

Damit ergibt sich oberhalb von 20 kHz noch ein kleiner Sicherheitsabstand bis das Antialiasing-Filter abschwächt. Bei Abtastraten bis zu 51 kS/s beträgt außerdem der Dynamikbereich der Datenerfassungskarte 130 dB (darüber maximal 120 dB).

Die Datenerfassungskarte NI 4472 erlaubt die Festlegung der Signalkopplung. Diese wurde entsprechend der Aufgabe für die DC-Erfassung und AC-Erfassung eingestellt.

Für den Datenrekorder (Abbildung 5-7) kann die Anzahl der Kanäle (bis maximal acht), die Bezeichnung der Kanäle und die Abtastrate (in bestimmten Grenzen) frei gewählt werden. Die Messzeit wird sinnvollerweise gleich wie bei den Messsonden gewählt.

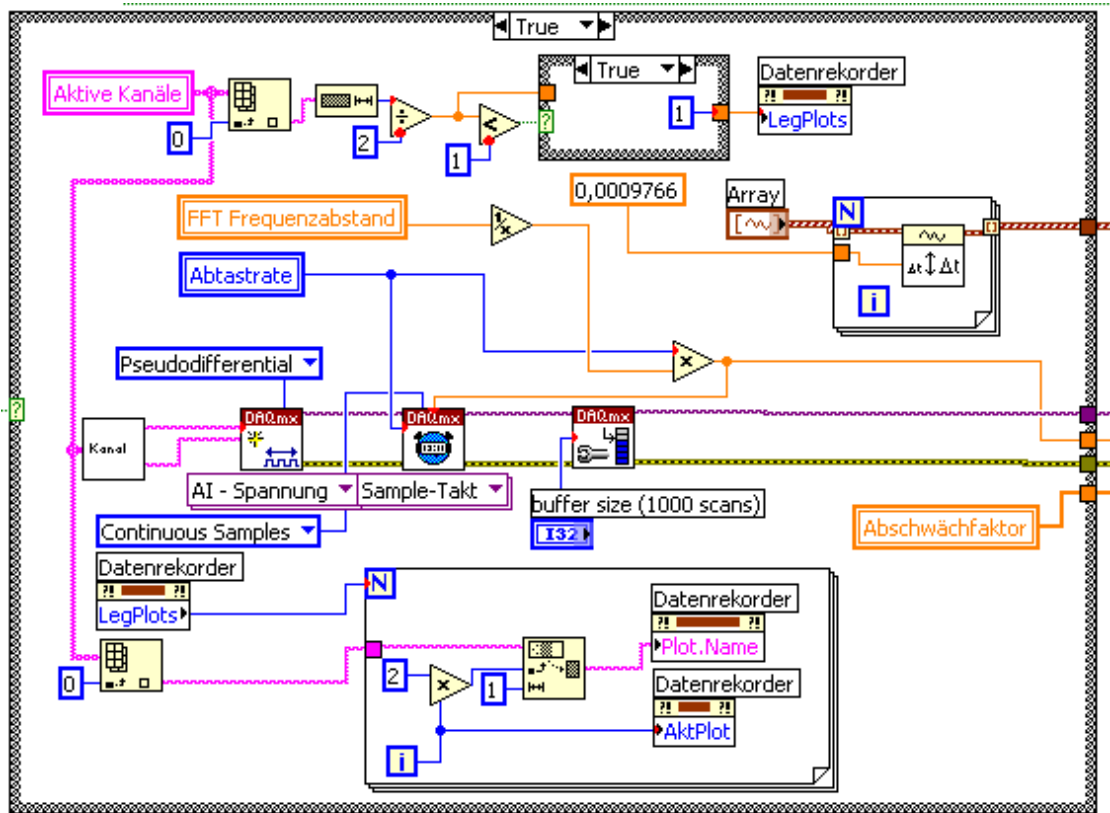


Abbildung 5-7: Datenrekorder

### 5.2.6.3.2 Synchronisierung

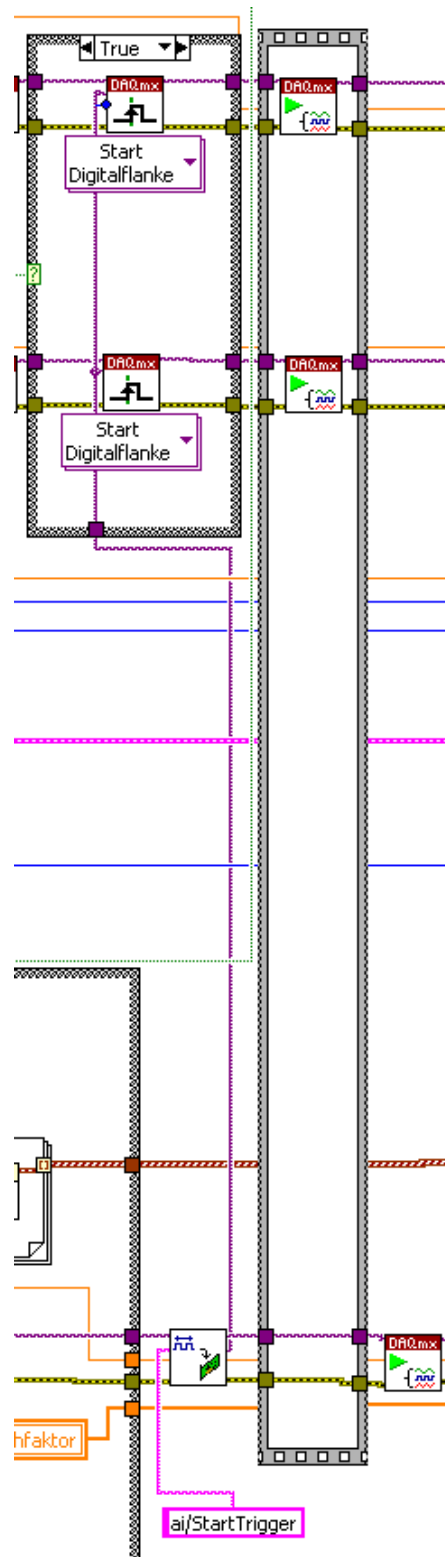


Abbildung 5-8: Synchronisierung

Die Synchronisierung (Abbildung 5-8) wird rein durch die Software bewerkstelligt und hat sich als ausreichend erwiesen. Eine hardwaremäßige Synchronisierung wäre ebenfalls möglich.

### 5.2.6.3.3 Kalibrierfaktoren

Das gesamte Messsystem wurde in einem akkreditierten Labor kalibriert. Bis zu der definierten Messfrequenz von 20 kHz bleibt die AC-Erfassung relativ frequenzunabhängig, wodurch nur geringfügige Abweichungen gegenüber den rechnerisch ermittelten Werten auftreten.

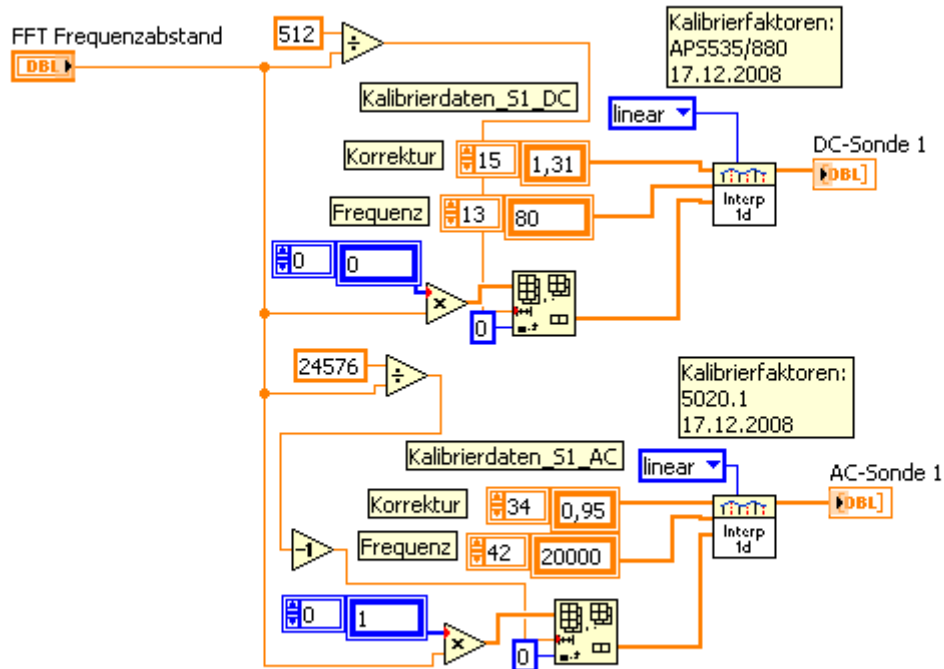


Abbildung 5-9: Kalibrierfaktoren inkl. Aufbereitung

Die bei der Kalibrierung erhaltenen Faktoren werden durch Interpolation an den gewählten FFT-Frequenzabstand angepasst (siehe Abbildung 5-9). Da jede AC- und DC-Erfassung ihre eigenen Kalibrierfaktoren hat, muss dies beim Anschluss an das PXI-System beachtet werden. Wie oben erwähnt, würde, aufgrund der geringen Abweichungen im Frequenzverhalten, bei einem fehlerhaften Anschluss der AC-Erfassungen, aber nur ein geringer Fehler entstehen.

### 5.2.6.3.4 Grenzkurven

Die Grenzkurven, die aus mehreren Frequenzabschnitten bestehen, werden programmatisch erstellt. In Abbildung 5-10 als Beispiel die ICNIRP 1998 – Grenzkurve für die Allgemeinbevölkerung

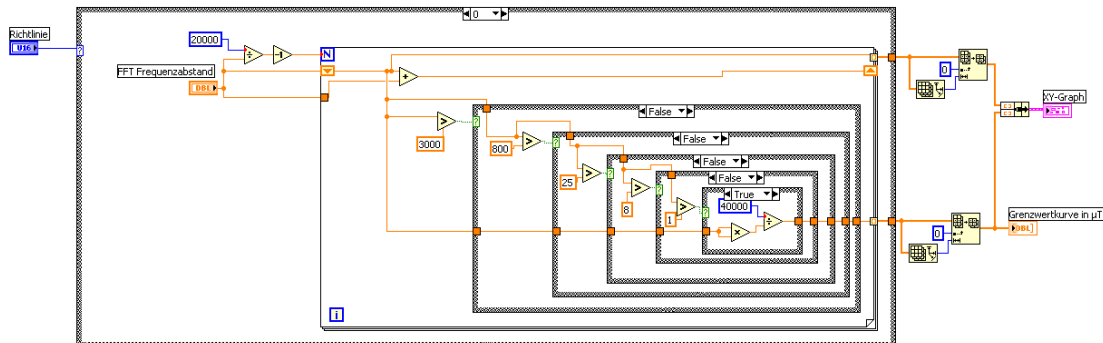


Abbildung 5-10: Erstellen der Grenzkurven (z. B.: ICNIRP Public)

### 5.2.6.3.5 Datenpufferung

Aufgrund des relativ hohen Rechenaufwandes für die Online-Auswertung werden die von der Datenerfassungskarte erhaltenen Messdaten in einen Datenpuffer (Abbildung 5-11) geschrieben, damit das Messprogramm nicht durch einen Laufzeitfehler gestoppt wird.

Die am Display angezeigten Auswertungen sind dann zwar nicht mehr exakt online, das Programm zeigt aber, etwas zeitverzögert, alle Informationen ohne Datenverlust an.

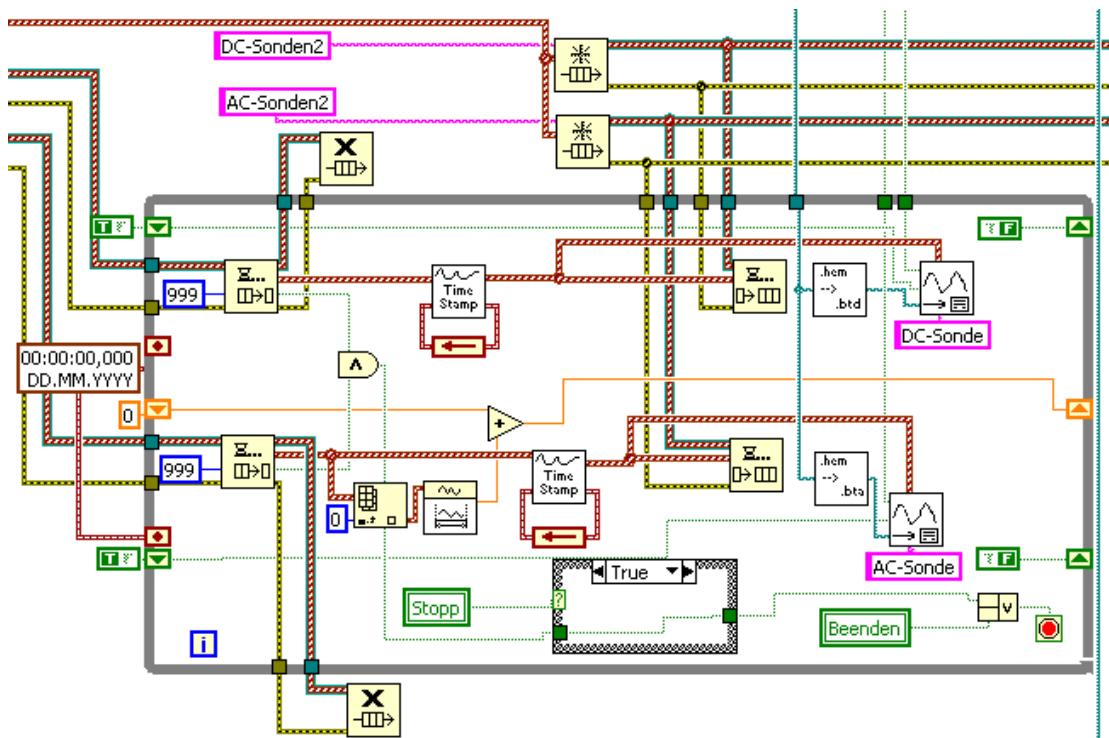


Abbildung 5-11: Datenpufferung und Speichern der Rohdaten



### 5.2.6.3.6 Auswertung

Das Programm wertet die Daten nach der in der EN 50500 beschriebenen FFT-Methode und nach der zeitlichen Methode aus. Die zeitliche Methode wird nur als Vergleichsmessung herangezogen.

#### FFT-Bewertung

Jeweils getrennt für die DC- und AC-Erfassung wird eine FFT erstellt und die notwendigen Faktoren berücksichtigt, um Werte der magnetischen Flussdichte zu erhalten. Danach werden die Einzel-FFTs zu einer Gesamt-FFT (Abbildung 5-12), die den gesamten Frequenzbereich von 0 Hz bis 20 kHz abdeckt, zusammengesetzt.

Diese Gesamt-FFT wird dann, je nach gewünschtem Grenzwert, bewertet. Als Ergebnis erhält man für jede Sonde einen Einzelwert in %, der angibt in welchem Ausmaß man den Grenzwert erreicht.

Diesen Einzelwert in % kann man als jeweils aktuellen Wert oder als Max-Hold-Wert anzeigen lassen.

Zusätzlich ist es möglich für eine bestimmte Einzelfrequenz, die angegeben werden muss, folgende Auswertungen zu erhalten:

- Effektivwert der magnetischen Flussdichte für jede einzelne Achse bei dieser Frequenz
- Gesamt-Effektivwert der magnetischen Flussdichte bei dieser Frequenz

Bei diesen Auswertungen wird, um eine etwaige Frequenzgenauigkeit auszugleichen, ein Filter mit der Bandbreite des doppelten FFT-Frequenzabstandes verwendet.

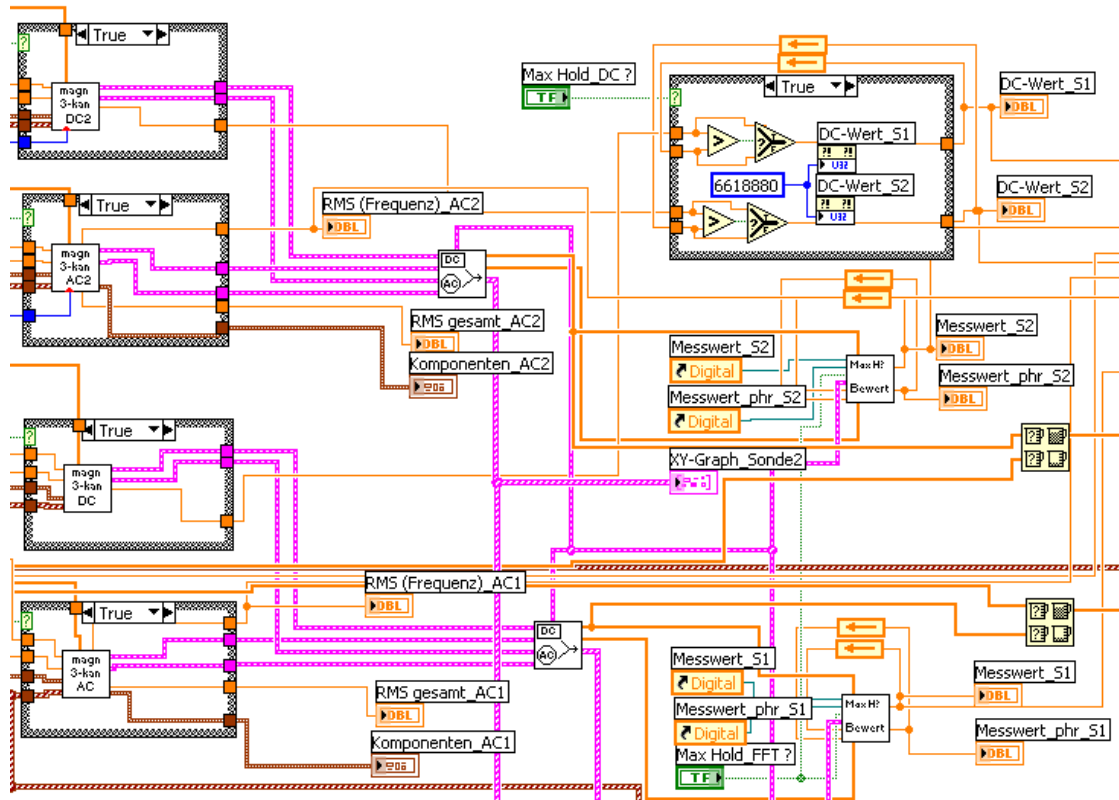


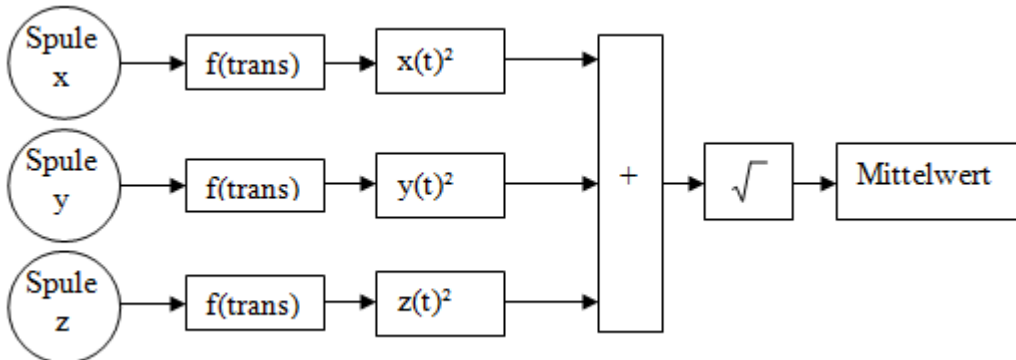
Abbildung 5-12: FFT-Bewertung mit Max-Hold-Funktionen

## Zeitliche Bewertung (ICNIRP)

Die zeitliche Bewertung (Abbildung 5-14) wird entsprechend der aus der EN 62233 entnommenen Transferfunktion (Abbildung 5-13) durchgeführt. Diese Transferfunktion entspricht dem ICNIRP-Statement [9]. Bei der Bewertung der Allgemeinbevölkerung wird eine Frequenz von 800 Hz beim Hochpass angewendet, bei der beruflichen Exposition 820 Hz.

Die Transferfunktion ist im Prinzip eine inverse Grenzkurve, die Frequenzen oberhalb von 50 Hz entsprechend anhebt, unterhalb von 50 Hz abschwächt. Dementsprechend wird das so gewonnene Ergebnis mit dem Grenzwert von 50 Hz verglichen.

Die EN 62233 schlägt folgende Bewertung vor:



Der zeitliche Verlauf der Induktion jeder einzelnen Spule wird mit der Transferfunktion bewertet. Danach wird durch Quadrieren, Aufsummieren und Wurzelbildung die Amplitude des zeitlichen Verlaufes des bewerteten Induktionsvektors gebildet. Durch die folgende Mittelwertbildung wird das Ergebnis im Vergleich zur FFT-Bewertung wesentlich entschärft.

Anstatt des Mittelwertes führt die Bildung des Spitzenwertes und Umrechnung in einen äquivalenten Effektivwert (Division durch  $\sqrt{2}$ ) zu einem Ergebnis, das dem der FFT-Methode gleichwertig ist. Da aber im Vergleich zur FFT-Bewertung die Phasenverschiebung der einzelnen Oberschwingungen mit berücksichtigt wird, ergibt sich immer ein Wert der kleiner oder gleich der FFT-Bewertung ist.

EN 62233:2008

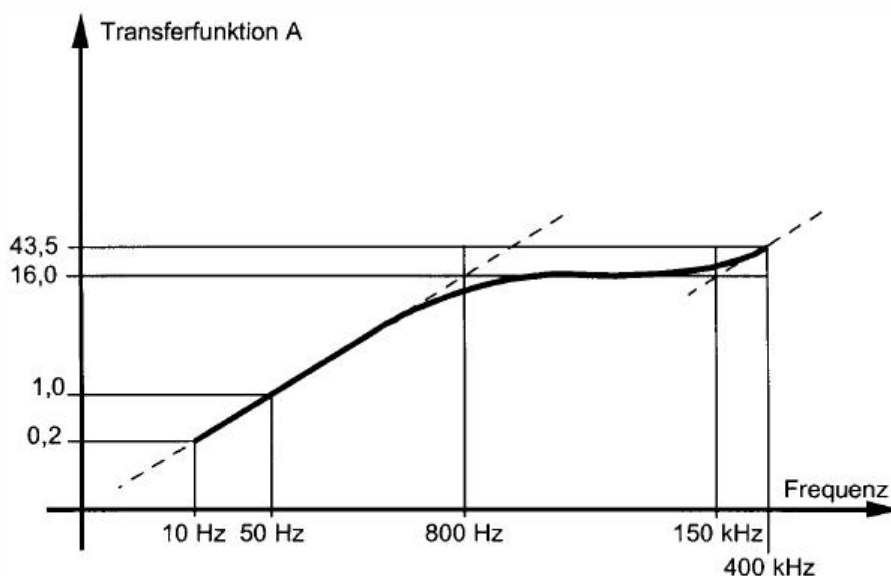


Abbildung 5-13: Transferfunktion nach EN 62233

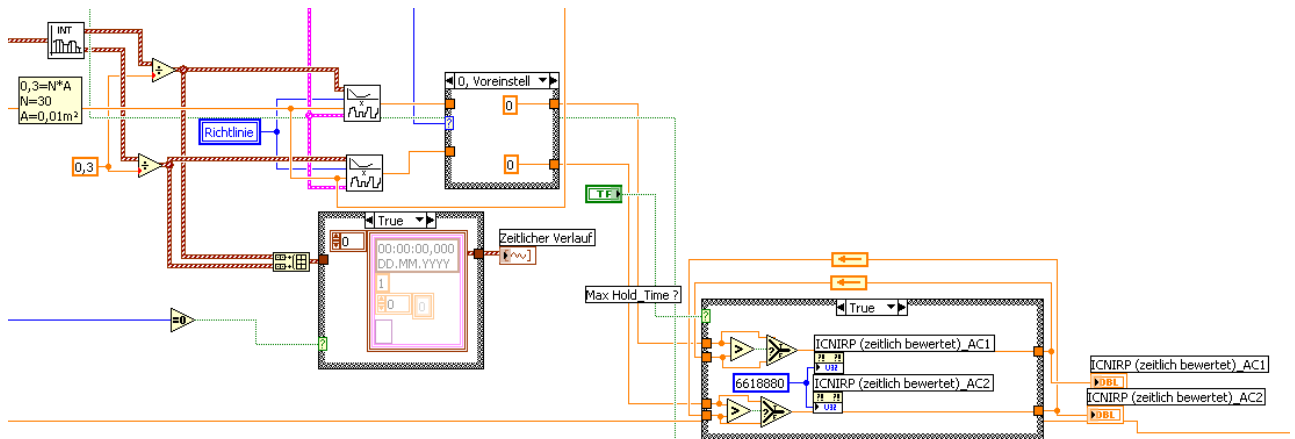


Abbildung 5-14: Zeitliche Bewertung (ICNIRP)

Aufgrund der getrennten Erfassung für den Frequenzbereich DC bis 5 Hz (DC-Erfassung) und oberhalb von 5 Hz (AC-Erfassung) wird die zeitliche Bewertung nur mit der AC-Erfassung, also für Frequenzen größer als 5 Hz, durchgeführt.

#### 5.2.6.4 Anzeigen

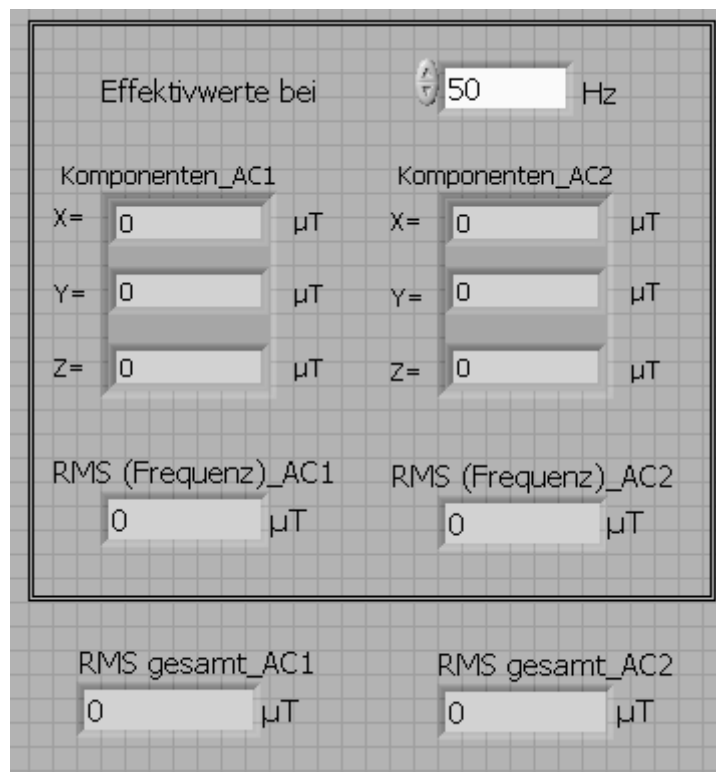


Abbildung 5-15: Einzelfrequenz (Filter-BB 2xFFT Frequenzabstand)

Wie unter 5.2.6.3.6 (FFT-Bewertung) bereits erklärt, können bei einer bestimmten, in den Frequenzgrenzen frei wählbaren Frequenz, die Einzelkomponenten und der Gesamtwert der magnetischen Flussdichte eben bei dieser Frequenz angezeigt werden (Abbildung 5-15).

Dies ist dann sehr hilfreich, wenn man über das Fahrspiel oder bei bestimmten Betriebspunkten beobachten will, wie sich das magnetische Feld verhält. Oft verwendet bei der Beurteilung von etwaiger Beeinflussung von ATP-Antennen.

Die Bewertung des magnetischen Feldes der einzelnen Sonden erfolgt nach der gewünschten Richtlinie.

Richtlinie  
 ICNIRP Bevölkerung

Messwert\_S1    Messwert\_phr\_S1  
 0 %    0 %

Messwert\_S2    Messwert\_phr\_S2  
 0 %    0 %

ICNIRP (zeitlich bewertet)\_AC1  
 0 %    EIN

ICNIRP (zeitlich bewertet)\_AC2  
 0 %    EIN

DC-Wert\_S1  
 0  $\mu$ T    EIN

DC-Wert\_S2  
 0  $\mu$ T    EIN

AKTUELL

(nur zum Vergleich)

Messwert_S1	Grenzwert in % der gewählten Richtlinie der Sonde 1
Messwert_phr_S1	Grenzwert in % der gewählten Richtlinie, unter Berücksichtigung der Phasenlage in den einzelnen Achsen, der Sonde 1
Messwert_S2	Grenzwert in % der gewählten Richtlinie der Sonde 2
Messwert_phr_S2	Grenzwert in % der gewählten Richtlinie, unter Berücksichtigung der Phasenlage in den einzelnen Achsen, der Sonde 2
DC-Wert_S1	Wert der magnetischen Flussdichte bei 0 Hz der Sonde 1
DC-Wert_S2	Wert der magnetischen Flussdichte bei 0 Hz der Sonde 2

Für die Bewertung der magnetischen Flussdichte in den Frequenzbändern von ATP-Antennen ist die untenstehende Auswertung sehr nützlich.

AC Sonde 1 Magnetfeld innerhalb des angegebenen Filters

Filter-Mittenfrequenz	Filter-Mittenfrequenz 2	Filter-Mittenfrequenz 3	Filter-Mittenfrequenz 4
1700 Hz	2000 Hz	2300 Hz	2600 Hz
Filter-Bandbreite	Filter-Bandbreite 2	Filter-Bandbreite 3	Filter-Bandbreite 4
300 Hz	300 Hz	300 Hz	300 Hz
Filter Value	Filter Value 2	Filter Value 3	Filter Value 4
0 T	0 T	0 T	0 T

Für eine bestimmte AC-Erfassung (Sonde 1 oder Sonde 2) ist die Auswertung entsprechend der Eigenschaften eines Zugbeeinflussungssystems oder Gleiskreises möglich. Durch die Angabe der Mittenfrequenz und der Bandbreite wird ein Effektivwert unter Annahme eines Rechteckfilters berechnet.

#### 5.2.6.4.1 Datenspeicherung

##### Speichern der Rohdaten

Das Speichern der Rohdaten wird im Zuge der Datenpufferung durchgeführt, siehe Punkt 5.2.6.3.5.

##### Speichern von ausgewerteten Daten

Es wird eine Reihe an bereits während der Messung online ausgewerteter Daten gespeichert (Abbildung 5-16). Dabei sind jene Daten ausgewählt worden, die einen raschen Überblick und eine gute Einschätzung der vorhandenen Magnetfelder ermöglichen.

Durch die ebenfalls gespeicherten Rohdaten ist jede denkbare Offline-Auswertung möglich.

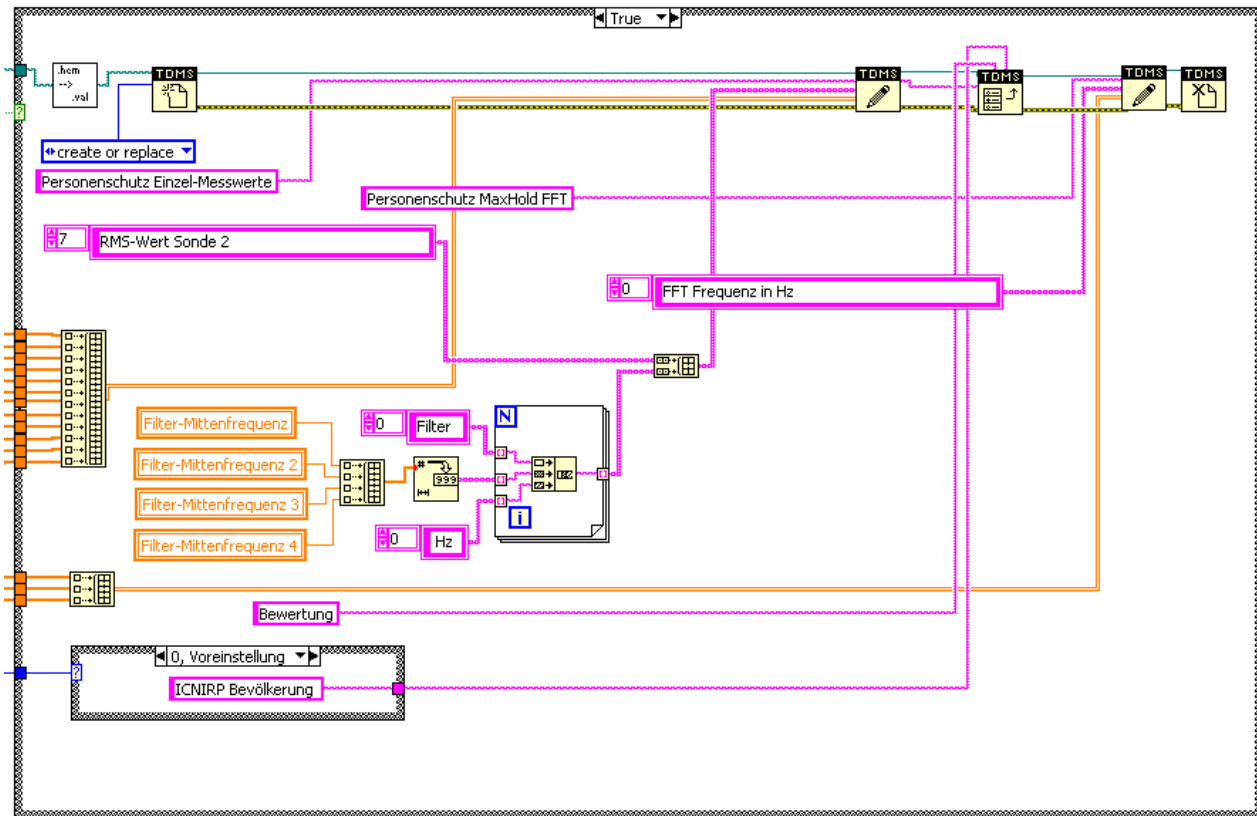


Abbildung 5-16: Datenspeicherung der Online-Auswertung

Folgende Einzel-Messwerte (abhängig vom FFT-Frequenzabstand bzw. der Messzeit) und eine Max-Hold-FFT (Sonde 1 und Sonde 2) werden gespeichert:

#### Einzelwerte:

Messzeit	Zeit für eine Einzelmessung (= 1/FFT-Frequenzabstand)
DC-Wert_S1	Wert der magnetischen Flussdichte bei 0 Hz der Sonde 1
DC-Wert_S2	Wert der magnetischen Flussdichte bei 0 Hz der Sonde 2
Bewertung S1	Grenzwert in % der gewählten Richtlinie der Sonde 1
Bewertung S2	Grenzwert in % der gewählten Richtlinie der Sonde 2
Einzelfrequenz	Frequenz für die Einzelauswertung
RMS-Wert Sonde 1	Gesamteffektivwert der magnetischen Flussdichte der Sonde 1 bei der Einzelfrequenz
RMS-Wert Sonde 2	Gesamteffektivwert der magnetischen Flussdichte der Sonde 2 bei der Einzelfrequenz
RMS-Wert Filter 1	Gesamteffektivwert der magnetischen Flussdichte des Filter 1(Angabe der Mittelfrequenz)
RMS-Wert Filter 2	Gesamteffektivwert der magnetischen Flussdichte des Filter 2(Angabe der Mittelfrequenz)
RMS-Wert Filter 3	Gesamteffektivwert der magnetischen Flussdichte des Filter 3(Angabe der Mittelfrequenz)
RMS-Wert Filter 4	Gesamteffektivwert der magnetischen Flussdichte des Filter 4(Angabe der Mittelfrequenz)

**Max-Hold-Werte:**

FFT-Frequenzwerte	Alle Frequenzen von DC bis 20 kHz
Max-Hold-FFT (RMS) S1	Max-Hold-RMS-FFT-Werte der magnetischen Flussdichte der Sonde 1
Max-Hold-FFT (RMS) S2	Max-Hold-RMS-FFT-Werte der magnetischen Flussdichte der Sonde 2

Für die Bewertung des magnetischen Feldes hinsichtlich Personenschutz sind aktuell folgende Grenzwertkurven verfügbar (für die Angaben in %):

- ICNIRP 1998 Bevölkerung
- ICNIRP 1998 Beruf
- ÖNORM S1119 Bevölkerung
- ÖNORM S1119 Beruf
- ICNIRP 2010 Bevölkerung
- ICNIRP 2010 Beruf
- VDE 848-3-1 (Kategorie 1)

Dabei wird jede Grenzkurve so behandelt als ob eine Bewertung entsprechend der Aufsummierung nach ICNIRP vorgesehen ist. Es wird also der entsprechende %-Wert mit Bezug auf die gewählte Grenzkurve gebildet.

**5.2.7 Funktionen****5.2.7.1 Grundfunktionen**

Die Grund- bzw. Hauptfunktion des Magnetfeldmesssystems ist die Erfassung des Magnetfeldes im Frequenzbereich von DC bis 20 kHz. Das erfasste Magnetfeld wird als Diagramm der Flussdichte über der Frequenz und als Flussdichte einer, im genannten Frequenzbereich liegenden, frei wählbaren Einzelfrequenz, angezeigt.

Dabei wird für den Frequenzbereich von DC bis 5 Hz ein, in den einschlägigen Normen nicht näher spezifiziertes, 3-achsiges Magnetometer verwendet.

Für den Frequenzbereich ab 5 Hz bis 20 kHz wird eine 3-achsige Sonde mit jeweils einer kreisrunden Fläche von 100 cm<sup>2</sup> nach EN 50500 verwendet.

**5.2.7.2 Zusatzfunktionen**

Folgende Zusatzfunktionen sind in der Basisversion der Software implementiert:

- Bewertung des gemessenen Magnetfeldes hinsichtlich bestimmter Normen (z. B.: ICNIRP Public und ICNIRP Workers) nach der FFT-Methode unter Berücksichtigung der EN 50500
- Bewertung des gemessenen Magnetfeldes hinsichtlich ICNIRP Public und ICNIRP Workers auf Basis des zeitlichen Verlaufes
- Mit dem Magnetfeld synchronisierte Erfassung von Fahrzeugdaten (8 analoge Kanäle)
- Anzeige der in den Spulen der AC-Feld-Erfassung induzierten Spannung zur Funktionskontrolle und Indikation der Feldausrichtung
- Auswertung des Magnetfeldes für bestimmte Frequenzen innerhalb einer bestimmten Bandbreite
- Aufzeichnung der Rohdaten für spätere Auswertungen

Die Software kann jederzeit durch zusätzliche Funktionen erweitert werden.

Die mögliche Online-Auswertung wird durch die Leistungsfähigkeit des verwendeten Personal Computers (Laptop) begrenzt. Die gleichzeitige Datenerfassung und Auswertung muss sichergestellt sein. Diese hängt stark von der Anzahl der erfassten Signale und im Fall des Datenrekorders von der tatsächlich gewählten Samplingrate ab.

Offline-Auswertungen sind nahezu unbegrenzt möglich.

### **5.2.8 Vor- und Nachteile**

#### Vorteile:

- Parallele Mehrfachmessung von AC- und DC-Magnetfeldern gleichzeitig
- Synchrone Aufzeichnung von Fahrzeugdaten
- Flexible Anpassung an die Anforderungen
- Flexible Anpassung an Grenzwerte
- Auswertung jeder Einzelspule (Berücksichtigung der Feldrichtung für z. B. ATP-Antennen)
- Beliebige Online-Auswertungen
- Beliebige Auswertungen zu einem späteren Zeitpunkt durch Aufzeichnung der Rohdaten
- Hohe Genauigkeit und Linearität
- Hohe Dynamik

#### Nachteile:

Der einzige Nachteil des Magnetfeldmesssystems ist die eingeschränkte Flexibilität bzw. Mobilität, die sich aufgrund des komplexen Aufbaues ergibt.

Das ist einerseits die Notwendigkeit einer Stromversorgung (AC 230 V) für das PXI-System und die eines Personal Computers zur Anzeige und Datenspeicherung. Andererseits ist durch die Möglichkeit paralleler Mehrfachmessung und Aufzeichnung von Fahrzeugdaten eine Verkabelung notwendig, die den Radius der Messung entsprechend einschränkt.



## 6. Schirmung von Magnetfeldern

Um die geforderten Grenzwerte für den Personenschutz einhalten zu können, ist oft eine zusätzliche Schirmung des magnetischen Feldes notwendig.

Die Anforderungen an das Fahrzeug bezüglich Personenschutz werden den relevanten Komponenten zugeordnet und entsprechend spezifiziert.

Nicht immer ist es möglich oder sinnvoll die notwendige Schirmung in der betroffenen Komponente zu integrieren.

Um ein Gefühl dafür zu bekommen, wie in solchen Fällen vorgegangen werden kann, sei als Beispiel das DC-Magnetfeld der Netzdrossel eines Traktionsstromrichters genannt:

- Spezifikation des DC-Magnetfeldes in einem bestimmten Abstand zum Stromrichtergehäuse in Richtung Fahrgastraum (z. B.: 1 mT in 50 cm Entfernung vom Stromrichtergehäuse)
- Die Netzdrossel muss über einen weiten Eingangsbereich linear sein. Daher wird meist eine Luftdrossel gewählt. Damit verbunden sind relativ hohe magnetische Felder
- Durch die Luftkühlung ist die Netzdrossel nahe der Gehäusewand platziert
- Das notwendige Schirmblech reicht weit über die Gehäuseabmessungen des Traktionsstromrichters hinaus und ist durch die direkte Anbringung am Gehäuse sehr nahe an der Netzdrossel
- Die Abmessungen des Schirmbleches sind nicht optimal und damit schwer
- Gewicht ist ein mitentscheidender Faktor

Abgesehen davon, dass die konstruktive Umsetzung eines solchen Schirmbleches, das direkt im/am Traktionsstromrichter integriert ist, sehr aufwendig ist, müssen eben, wie am Beispiel des Gewichts erwähnt, andere Faktoren berücksichtigt werden, die nur gemeinschaftlich sinnvoll gelöst werden können.

Damit verbunden ist ein gewisser Datenaustausch zwischen den beteiligten Parteien, der aus verschiedensten Gründen auch auf technischer Basis nicht immer einfach ist.

### 6.1 Berücksichtigung der Fahrzeugstruktur

Bei der Spezifikation der einzelnen Komponenten hinsichtlich Personenschutz ist es sinnvoll, auch den Einfluss der Fahrzeugstruktur bzw. des Wagenkastens zu berücksichtigen.

Abhängig vom Material, den Abmessungen und der Struktur des Wagenkastens ist dieser als magnetische Schirmung wirksam. Die Berücksichtigung dieses Umstandes in den Spezifikationen der einzelnen Komponenten kann durch folgende Umstände behindert werden:

- Das Material des Wagenkastens ist zum Zeitpunkt der Erstellung der Spezifikation und damit der Anfrage beim Komponentenlieferanten noch nicht fixiert.
- Die konstruktiven Details bezüglich Aufhängungspunkte sind noch nicht final und damit der exakte Abstand zum Wagenkasten nicht bekannt.
- Bei ferromagnetischen Materialien gibt es üblicherweise keine garantierten Werte der magnetischen Eigenschaften

## 6.2 Zusätzliche Schirmungen

Wie oben erwähnt ist vor allem bei der Netzdrossel eines Traktionsstromrichters, aber auch manchmal bei Traktionstransformatoren, eine zusätzliche Schirmung notwendig, um die geforderten Grenzwerte bezüglich Personenschutz einzuhalten.

Wie in Punkt 6.3 beispielhaft gezeigt wird, ist für die Berechnung des magnetischen Feldes eine exakte Kenntnis des Aufbaues der betreffenden Komponente notwendig.

Meistens wird deshalb die Berechnung des Magnetfeldes und die Festlegung der Schirmung in Form und Material die Aufgabe des Herstellers sein. Wie unter Punkt 6 erwähnt, kann es aus Gewichts-, Kosten- und Designgründen sinnvoll sein, eine integrierte gemeinsame Lösung zu finden.

## 6.3 FEM-Berechnungen

Bei bestimmten Projekten wird vorab ein rechnerischer Nachweis des Magnetfeldes verlangt. Mit relativ einfachen Mitteln ist bei diesem Projekt gezeigt worden, dass nur die Netzdrossel des Traktionsstromrichters hinsichtlich des DC-Magnetfeldes näher betrachtet werden muss. Im Folgenden werden die Ergebnisse einer 3D-FEM-Berechnung gezeigt. Dabei ist vor allem eine genaue Nachbildung der Netzdrossel notwendig. Aus Gewichtsgründen und wie bereits erwähnt aufgrund des großen Eingangsstrombereiches, in dem die Netzdrossel linear arbeiten muss, wird oft, wie auch in diesem Fall, eine Luftdrossel verwendet, die dann eben durch zusätzliche Schirmungsmaßnahmen ertüchtigt werden muss.

### DC-Magnetfeld einer Netzdrossel

Die Kundenforderung für das magnetische Feld war 1 mT direkt am Fahrzeugboden und 0,5 mT ab einer Höhe von 60 cm über dem Fahrzeugboden. Diese Grenzwerte der magnetischen Flussdichte müssen beim maximalen Drosselstrom von 1570 A (DC) eingehalten werden.

In den nachfolgenden Grafiken wird die magnetische Flussdichte nur im Bereich zwischen 0,5 mT und 1 mT dargestellt. Die Farbe rot ist dabei die Grenze zu 1 mT, die Farbe blau die Grenze zu 0,5 mT. Das heißt, dass die magnetische Flussdichte innerhalb der roten Umrandung größer als 1 mT und außerhalb der blauen Umrandung kleiner als 0,5 mT ist.

Die durchgehende horizontale Linie, jeweils in der zweiten Grafik, entspricht dem Niveau des Fahrzeuginnenraumes.

Als Schirmungsmaterial war ursprünglich magnetisches Nirosta-Blech vorgesehen. Da aber von Nirosta-Blechen keine magnetischen Eigenschaften vom Blechhersteller garantiert werden können, hat man sich mit dem Fahrzeughersteller auf die nicht kornorientierte Elektrobandsorte M400-50A geeinigt.

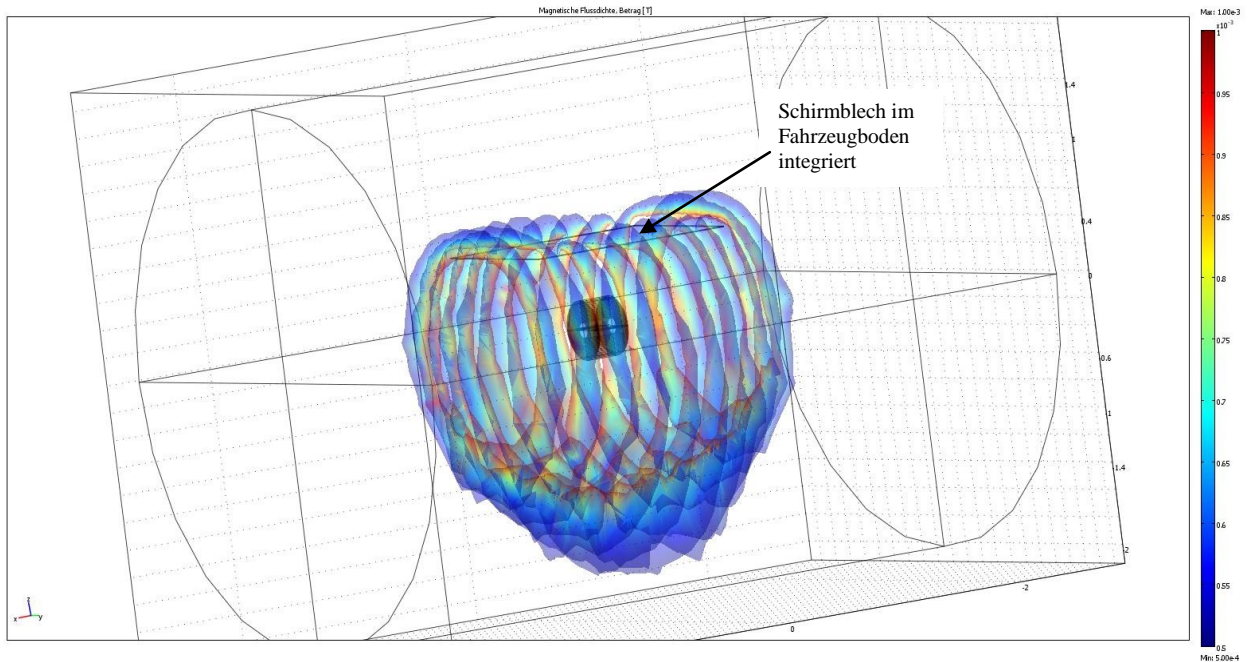
Es wurden 3 Varianten untersucht. Bei 2 Varianten wurde angenommen, dass die Schirmbleche im Fahrzeugboden integriert werden. Bei der 3. Variante sollte das Schirmblech direkt am Stromrichtergehäuse montiert werden.

**Variante 1:**

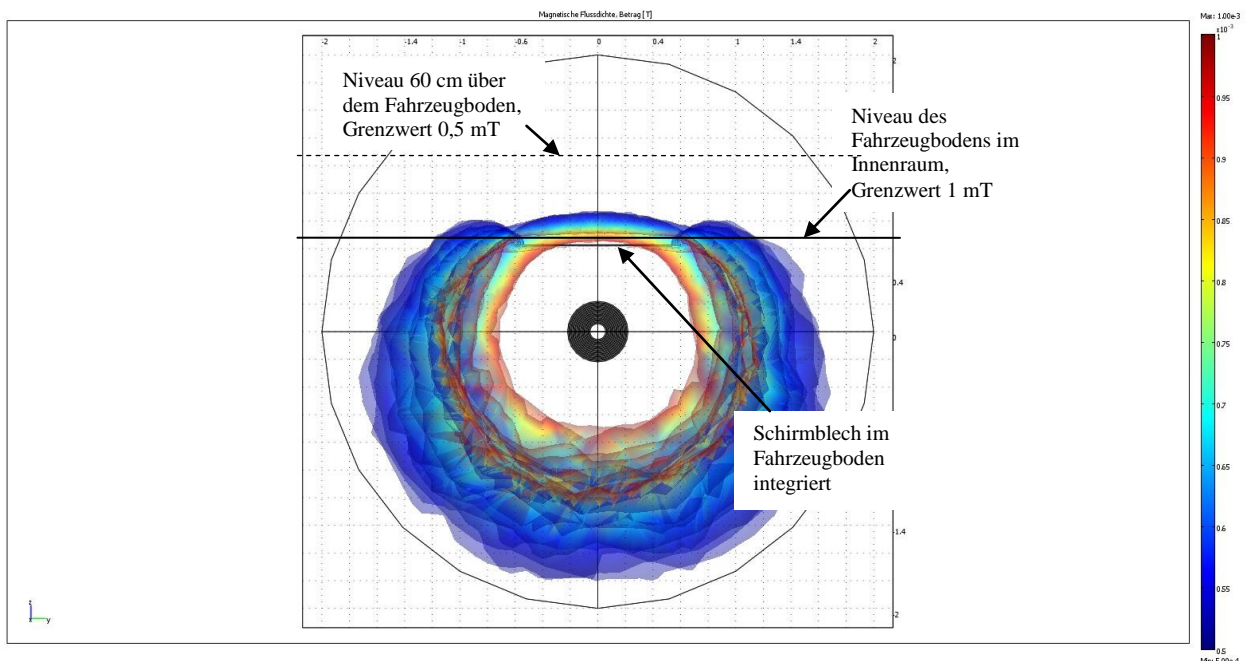
Schirmblech M400-50 (10 Stück = 5mm) im Fahrzeugboden

Abmessungen 1600 mm x 1200 mm

Abstand 332 mm vom Stromrichtergehäuse

**Abbildung 6-1: DC-Magnetfeld der Netzdrossel bei  $I=1570$  A.**

Innerhalb des roten Bereiches ist das DC-Magnetfeld  $>$  als 1 mT, außerhalb des blauen Bereiches  $<$  als 0,5 mT. Die 3D-Darstellung zeigt das Schirmblech und den Verlauf des Magnetfeldes.

**Abbildung 6-2: DC-Magnetfeld der Netzdrossel bei  $I=1570$  A.**

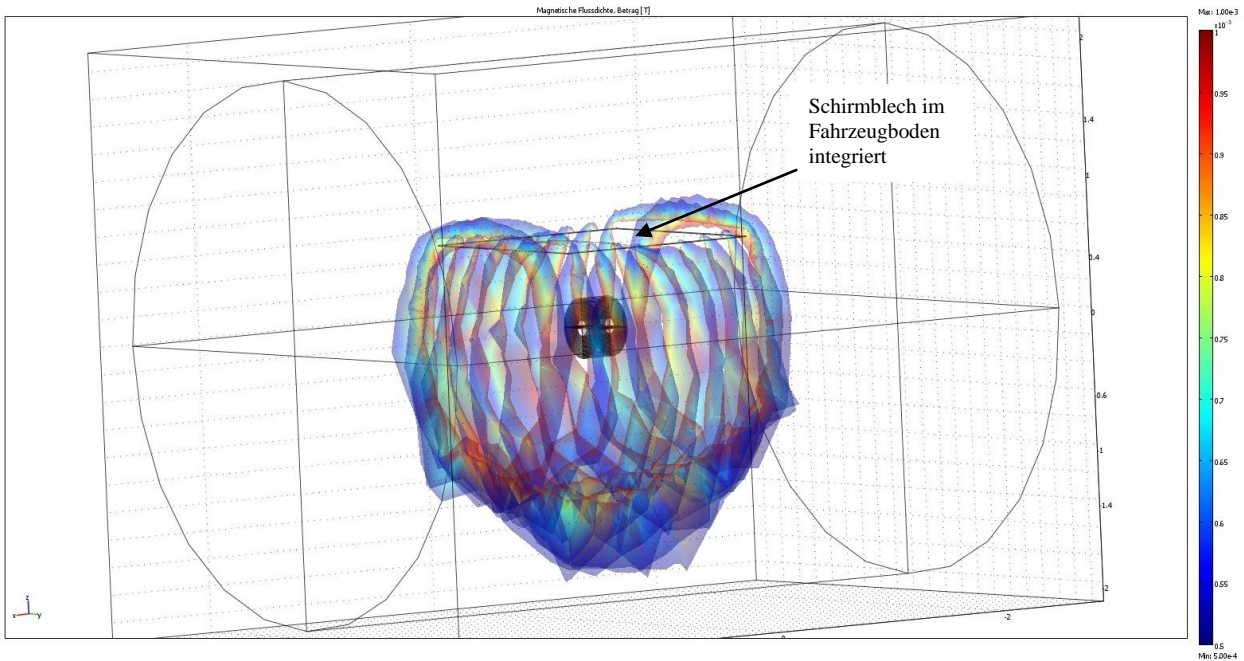
Innerhalb des roten Bereiches ist das DC-Magnetfeld  $>$  als 1 mT, außerhalb des blauen Bereiches  $<$  als 0,5 mT. Diese Darstellung zeigt die maximal im Fahrzeuginneren auftretenden DC-Magnetfelder. Der Grenzwert von 1 mT direkt am Fahrzeugboden wird nicht überschritten.

**Variante 2:**

Schirmblech M400-50 (10 Stück = 5mm) im Fahrzeugboden

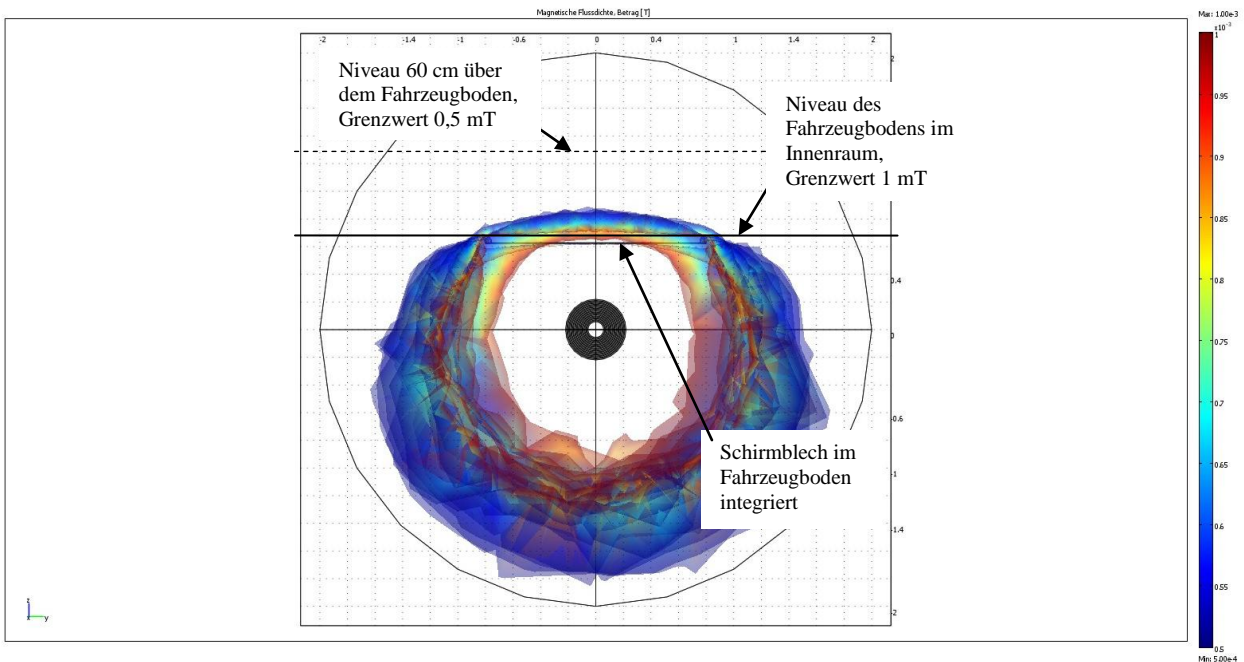
Abmessungen 1600 mm x 1600 mm

Abstand 332 mm vom Stromrichtergehäuse



**Abbildung 6-3: DC-Magnetfeld der Netzdrossel bei I=1570 A.**

Innerhalb des roten Bereiches ist das DC-Magnetfeld > als 1 mT, außerhalb des blauen Bereiches < als 0,5 mT. Die 3D-Darstellung zeigt das Schirmblech und den Verlauf des Magnetfeldes.



**Abbildung 6-4: DC-Magnetfeld der Netzdrossel bei I=1570 A.**

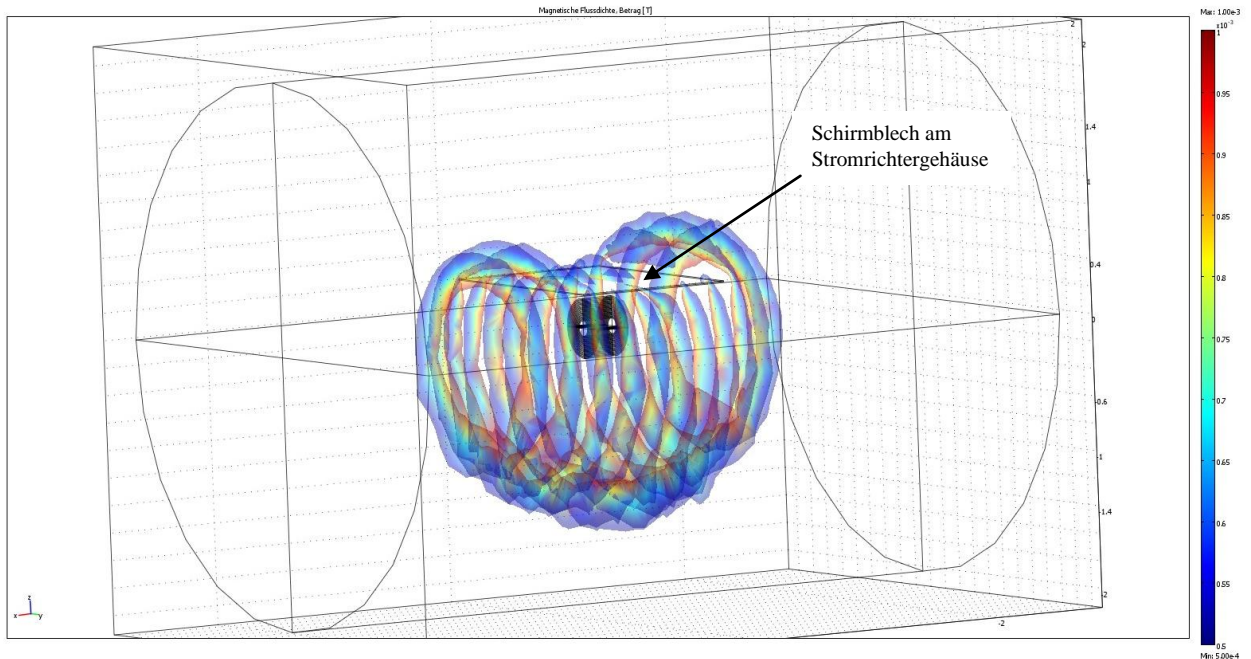
Innerhalb des roten Bereiches ist das DC-Magnetfeld > als 1 mT, außerhalb des blauen Bereiches < als 0,5 mT. Diese Darstellung zeigt die maximal im Fahrzeuginnenen auftretenden DC-Magnetfelder. Der Grenzwert von 1 mT direkt am Fahrzeugboden wird nicht überschritten. Bezüglich der auftretenden Maximalwerte keine Vorteile gegenüber Variante 1.

**Variante 3:**

Schirmblech M400-50 (14 Stück = 7mm) an den Aufhängepunkten des Stromrichtergehäuses

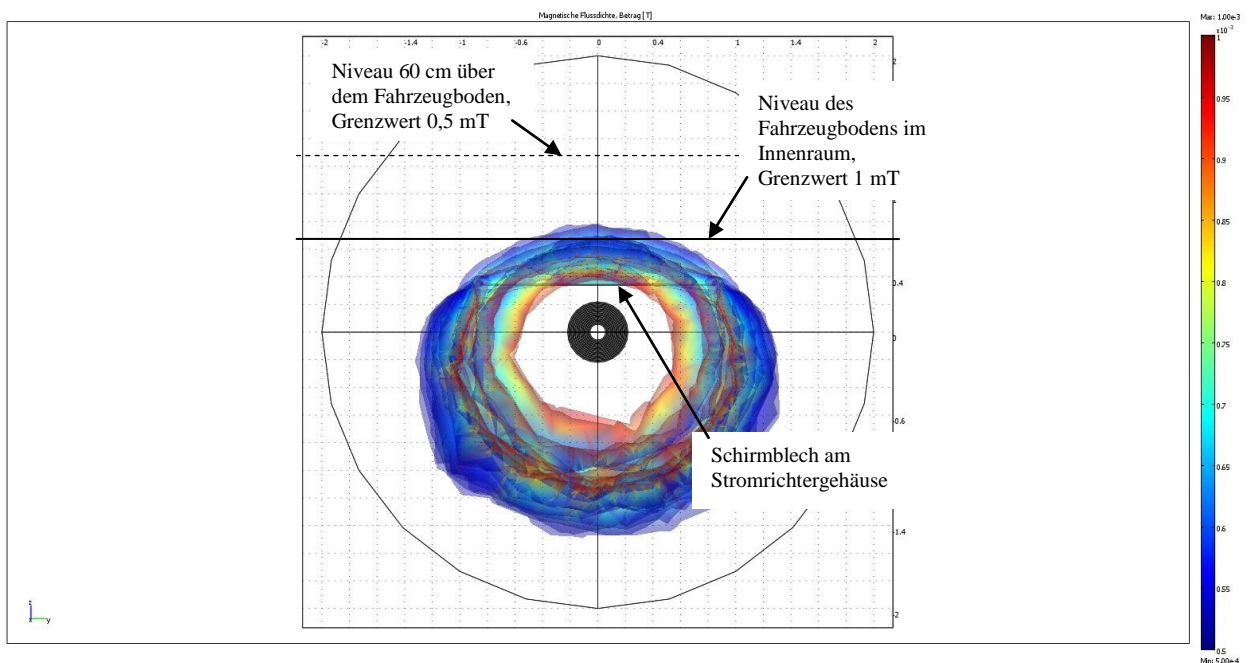
Abmessungen 1700 mm x 1200 mm

Abstand 50 mm vom Stromrichtergehäuse



**Abbildung 6-5: DC-Magnetfeld der Netzdrossel bei I=1570 A.**

Innerhalb des roten Bereiches ist das DC-Magnetfeld > als 1 mT, außerhalb des blauen Bereiches < als 0,5 mT. Die 3D-Darstellung zeigt das Schirmblech und den Verlauf des Magnetfeldes.



**Abbildung 6-6: DC-Magnetfeld der Netzdrossel bei I=1570 A.**

Innerhalb des roten Bereiches ist das DC-Magnetfeld > als 1 mT, außerhalb des blauen Bereiches < als 0,5 mT. Diese Darstellung zeigt die maximal im Fahrzeuginneren auftretenden DC-Magnetfelder. Der Grenzwert von 1 mT direkt am Fahrzeugboden wird nicht überschritten. Die Werte des Magnetfeldes im Fahrzeuginneren sind bei dieser Version am

Niedrigsten. Allerdings wurde keine sinnvolle Lösung für die Montage am Stromrichter gefunden. Ca. 50 % Mehrgewicht gegenüber Variante 1.

Alle drei berechneten Varianten erfüllen die Anforderungen hinsichtlich der Magnetfeldgrenzwerte. Für die Montage direkt am Stromrichtergehäuse ließ sich keine vernünftige konstruktive Lösung finden. Es wurde daher die Variante 1 mit einer Breite des Schirmbleches von 1200 mm gewählt, weil die maximal erhältliche Breite dieses Schirmbleches, das in Bandform vorliegt, mit 1250 mm begrenzt ist.

## 7. Komponentenqualifikation

Die Anforderungen für die einzelnen Komponenten müssen von den Fahrzeuganforderungen abgeleitet werden. Dabei müssen folgende Randbedingungen beachtet werden:

- Einbauort
- Anzahl der Komponenten
- Mögliche Betriebszustände und deren Umsetzung im Prüffeld/Labor
- Frequenzbereich der Aussendung – mögliche Überschneidung unterschiedlicher Komponenten
- Umgebende Materialien
- Einfluss des Fahrzeugchassis
- Relativbewegungen des Fahrzeugchassis

### 7.1 Spezifikation hinsichtlich NF-Magnetfelder

Für den Nachweis der spezifizierten Magnetfelder sind bestimmte Betriebsbedingungen erforderlich. Diese sind im Prüffeld bzw. Labor nicht immer einstellbar. Für den Motortest steht z. B. die notwendige Belastung nicht zur Verfügung, beim Traktionstransformator oft kein Stromrichter, wodurch nur mit sinusförmiger Grundschiwingung gemessen werden kann. Die Spezifikationen müssen daher entsprechend angepasst werden. Die fehlenden Informationen können dann vor der Fahrzeugmessung nur mehr bei einem Systemtest erfasst werden. Der Systemtest hat allerdings den Nachteil, dass er üblicherweise schon recht spät im Projektablauf stattfindet und notwendige Änderungen dann wesentlich teurer sind. Außerdem ist die Erfassung der Magnetfelder durch Anwesenheit vieler Quellen und deren gegenseitiger Beeinflussung nicht mehr einfach möglich. Etwaige Abweichungen von der Spezifikation erfordern dann zumindest einen erhöhten Diskussionsbedarf.

Unabhängig von den jeweiligen Möglichkeiten betreffend Betriebspunkte und Messung muss eine klare Messspezifikation erstellt werden, um jene Daten erfassen zu können, die es erlauben, ein ausreichend genaues Bild von den auftretenden Magnetfeldern zu erhalten und damit das Risiko einer Grenzwertüberschreitung am Fahrzeug zu minimieren.

Im Folgenden werden beispielhaft die Anforderungen hinsichtlich des niederfrequenten Magnetfeldes für einen Traktionstransformator und einen Traktionsmotor gezeigt. Die Anforderungen für andere Komponenten gestalten sich ähnlich, die jeweilige Einbausituation muss dabei berücksichtigt werden.

Dies sieht man eben besonders deutlich beim Traktionsmotor, wo die Beeinflussung der ATP-Antenne mit in die Spezifikation genommen wurde. Neben dem Fahrzeugchassis wurden auch mehrere Magnetfeldquellen berücksichtigt.

Dem Traktionstransformator wiederum wurden 100 % des Grenzwertes zugestanden, das Chassis allerdings nicht berücksichtigt, die Sicherheit damit in die Dämpfung des Chassis gelegt.

Diese scheinbar inkonsequente Vorgangsweise hat mit dem Befinden der einzelnen Komponentenhersteller zu tun, das sich in den Anforderungsspezifikationen widerspiegelt.

## 7.1.1 Motorspezifikation

In den folgenden Kapiteln ist ein einfaches Beispiel für eine Motorspezifikation hinsichtlich niederfrequenter Magnetfelder angegeben. Dabei wird sowohl ein Grenzwert für den Personenschutz (Kapitel 7.1.1.1) als auch für ein ATP (Automatic Train Protection) – System (Kapitel 7.1.1.2) angegeben.

### 7.1.1.1 Schutz von Personen allgemein und Personen mit Herzschrittmachern

Schutz der Allgemeinbevölkerung und beruflich exponierter Personen sowie Schutz von Personen mit Herzschrittmachern

Anforderung:

*Für den Traktionsmotor im ausgebauten Zustand, ohne Getriebe und ohne Zuleitungseinflüsse, gelten unter allen Betriebsbedingungen die ICNIRP (1998) - Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung und die Grenzwerte aus der DIN VDE 848-3-1 (Herzschrittmacher der Kategorie 1) für magnetische Felder im Frequenzbereich 0 Hz bis 20 kHz in einem Abstand von 40 cm von der Motorgehäuseaußenhaut.*

*Im Bereich ab 30 cm von der Motorgehäuseaußenhaut ist ein maximaler DC-Wert von 1 mT, über 40 cm ein maximaler DC-Wert von 500  $\mu$ T, einzuhalten.*

Für den Fahrzeuginnenraum bzw. für die Messung mit einer 5 mm Alu-Platte dürfen die Dämpfungswerte nach Tabelle 7-1 für das magnetische Feld angenommen werden.

Frequenz	Dämpfungsfaktor
0 Hz	1
1 Hz	1
10 Hz	1
20 Hz	1
50 Hz	2
100 Hz	3
200 Hz	4
500 Hz	4
1000 Hz	4
2000 Hz	4
5000 Hz	4
10000 Hz	4
20000 Hz	4

Lineare Interpolation zwischen den Stützstellen  
**Tabelle 7-1: Dämpfungsfaktoren Magnetfeldschirmung**

Messung mit einer 5 mm dicken Alu-Platte:

Die Alu-Platte mit den Mindestabmessungen von 1,25 m x 2,5 m ist im Abstand von 20 cm von der Motorgehäuseaußenwand, zentrisch zum Motor, anzubringen.

Die Messung erfolgt nach EN 50500 mit den oben angegebenen Messabständen.



### 7.1.1.2 Schutz vor der Beeinflussung von fahrzeug- und wegseitigen Signalantennen

Anforderung:

*Zur Sicherstellung der EMF-Verträglichkeit, zwischen Bahnfahrzeugen und wegseitigen Signalantennen, muss der Traktionsmotor im ausgebauten Zustand, ohne Getriebe und ohne Zuleitungseinflüsse, unter allen Betriebsbedingungen folgende Anforderungen einhalten:*

*Es ist ein Wert der magnetischen Flussdichte (Effektivwert) von 100 nT, bei den Mittenfrequenzen 1700 Hz, 2000 Hz, 2300 Hz und 2600 Hz, in einem Abstand von 50 cm ab Gehäuseaußenwand, unter Berücksichtigung der Mess-Parameter, einzuhalten.*

Mess-Parameter für die Erfassung der Magnetfelder:

- Messbandbreite: 300 Hz
- Messfilter: Rechteckfilter (Worst Case)
- Messdauer: 1 s
- FFT-Messung

Für die Messung wird eine AC-Sonde nach EN 50500 verwendet.

## 7.1.2 Trafospezifikation

Im Folgenden ist ein einfaches Beispiel für eine Trafospezifikation hinsichtlich niederfrequenter Magnetfelder angegeben. Dabei wird nur der Grenzwert für den Personenschutz spezifiziert. Zugbeeinflussungsanlagen am Fahrzeug befinden sich keine in der Nähe des Trafos. Die Beeinflussung von wegseitigen Anlagen wird als sehr unwahrscheinlich eingestuft.

### 7.1.2.1 Schutz von Personen allgemein und Personen mit Herzschrittmachern

Im Gesamtsystem Fahrzeug muss die Einhaltung der Magnetfeldgrenzwerte für Personen entsprechend der ICNIRP-Guidelines 1998 (Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung) und für Personen mit Herzschrittmachern gemäß DIN VDE 848-3-1 (Herzschrittmacher der Kategorie 1) für jeden Aufenthaltsort innerhalb des Fahrzeugs und auf dem Bahnsteig gewährleistet sein.

Anforderung:

*Für die Magnetfelder der Transformatoranlagen gelten in einem Abstand von 40 cm in Richtung Passagierraum des Fahrzeugs und seitlich der Transformatoranlagen 100 % der Grenzwerte der ICNIRP (1998) - Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung und der Grenzwerte aus der DIN VDE 848-3-1 (Herzschrittmacher der Kategorie 1) für magnetische Felder im Frequenzbereich 0 Hz bis 20 kHz.*

Die Einhaltung der Vorgaben wird durch eine Messung im Zuge des Antriebssystemtests überprüft. Eine Messung am Fahrzeug wird ebenfalls durchgeführt.

Die Trafowicklungen werden bei der Messung entsprechend dem für die Ausbildung der Magnetfelder ungünstigsten Fall belastet. Dabei können aufgrund des jeweils betroffenen Frequenzbereiches mehrere Lastpunkte notwendig sein.

Muss beim Antriebssystemtest aufgrund der Versorgungsleistung im Prüffeld bei Teillast gemessen werden, so leistet der Lieferant Unterstützung bei der Hochrechnung des Magnetfeldes, um sicherzustellen, dass mögliche Sättigungseffekte zu keinen falschen Ergebnissen führen.

## 7.2 Messvorschrift für den Nachweis

### 7.2.1 Messspezifikation für einen Traktionsmotor

Die hier angeführte Messspezifikation beschreibt die Messung eines Traktionsmotors im Leerlauf. Wie im Kapitel 7.1 erwähnt, muss die Messvorschrift dafür sorgen, dass die notwendigen Daten erfasst werden können. Daher müssen spezielle Einstellungen in der Antriebssoftware vorgenommen werden, um ein Verhalten des Traktionsmotors zu erreichen, das, hinsichtlich der erzeugten Magnetfelder nach außen, dem im Vollbetrieb entspricht.

Dazu kann auch, wie in diesem Beispiel angeführt, eine passende Korrektur der gemessenen Daten durchgeführt werden.

#### 7.2.1.1 Grund der Messung

Die Messung dient zur Erfassung des Motormagnetfeldes im Leerlauf und gleichzeitig zur Feststellung der Einhaltung der in der Motorspezifikation enthaltenen Grenzwerte.

Eine Umrechnung der Magnetfelder auf jene bei Motor-Nennfluss wird im Bedarfsfall offline durchgeführt.

#### 7.2.1.2 Messequipment

##### 7.2.1.2.1 Feldmessung

Es wird ein Magnetfeldmessgerät nach EN 50500 eingesetzt. Das Magnetfeldmessgerät setzt sich aus den Komponenten in Tabelle 7-2 zusammen.

Geräteart	Typ/Modell	Hersteller
Chassis	PXI 1033	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
AC-Feld-Erfassung	50.20.1	Eigenbau
AC-Feld-Erfassung	50.20.2	Eigenbau
DC-Feld-Erfassung	880	Wuntronic
DC-Feld-Erfassung	881	Wuntronic
Laptop	Celsius H700	Fujitsu/Siemens

**Tabelle 7-2: Aufstellung der Messkomponenten**

DC-Feld:

Aus den drei Richtungskomponenten des DC-Feldes wird der Feldvektor gebildet. Das Messgerät liefert einen DC-Messwert in  $\mu\text{T}$ .

**AC-Feld:**

Die Auswertung basiert auf einer FFT des gemessenen zeitlichen Verlaufs.

**FFT Parameter:**

Fenster-Funktion: .....Hanning

Messzeit: .....500 ms

Sampling Frequenz: .....49152 Hz

Aus den drei Richtungskomponenten des AC-Feldes wird der Feldvektor ohne Berücksichtigung der Phasenverschiebung gebildet (= Worst Case).

Die mit dem Grenzwert bewerteten Spektralkomponenten der FFT werden linear summiert (entsprechend EN 50500 werden Spektrallinien unter einem Wert von 10% des Grenzwertes nicht berücksichtigt).

Das Messgerät liefert einen Messwert in % des Grenzwertes der ICNIRP Richtlinie. Ein Auslesen der Induktionswerte (in  $\mu\text{T}$ ) für jede einzelne Frequenz ist ebenfalls möglich.

Es wird der zeitliche Verlauf des Feldes getrennt für jede Raumachse mit aufgezeichnet. Damit sind unterschiedlichste Offline-Auswertungen möglich.

**7.2.1.2.2 Motorstrom- und Motorspannungsmessung:**

Geräteart	Typ/Modell	Hersteller
Datenerfassungskarte (Messung)	NI 4461	National Instruments
PCI-Box	4-Slot PCI-Expansion	Magma
Laptop	Celsius H240	Fujitsu/Siemens
Stromzange NF	CWT3LFXB	PEM
Differenz-Tastkopf	SI-9010	Yokogawa

Die Messung des Motorstromes und der Motorspannung (Außenleiterspannung) wird mit der Datenerfassungskarte (NI 4461) von National Instruments durchgeführt. Die 24 Bit Datenerfassungskarte wird mit einer Abtastfrequenz von 51200 Hz betrieben. Sie ist mit Antialiasing-Filtern ausgestattet, um Fehlmessungen durch Signale mit höheren Frequenzen zu verhindern.

Mit den gemessenen Daten wird eine Echtzeit-FFT mit folgenden Parametern durchgeführt:

- Hanning Fenster
- Frequenzabstand 2 Hz
- Max-Hold-Messung

Der zeitliche Verlauf des Stromes und der Spannung wird aufgezeichnet.

### 7.2.1.3 Grenzwerte

Folgende Grenzwerte wurden für das Motorfeld spezifiziert.

#### 7.2.1.3.1 Grenzwerte nach Motorspezifikation

Die angegebenen Messabstände beziehen sich auf den Abstand von der Motorgehäuseaußenwand.

##### DC-Feld

Gemessen in 30 cm Abstand: 1 mT

Gemessen in 40 cm Abstand: 0,5 mT

##### AC-Feld

Gemessen in 40 cm Abstand: ICNIRP-Grenzwerte (Public) 1998

Gemessen in 40 cm Abstand: mit 5mm dicker Aluminiumplatte (1,25 m x 2,5 m) im Abstand von 20 cm zur Motorgehäuseaußenwand, Herzschrittmacher Grenzkurve entsprechend DIN VDE 848-3-1 Herzschrittmacher der Kategorie 1 (=HSM-Grenzwert)

Gemessen in 40 cm Abstand: Grenzkurve entsprechend DIN VDE 848-3-1 Herzschrittmacher der Kategorie 1, bewertet mit den Dämpfungsfaktoren (=HSM\_mod-Grenzwert)

#### Grenzwerte zur Verhinderung der Beeinflussung von fahrzeug- und wegseitigen Signalantennen

Die zu messenden Frequenzbänder (siehe Tabelle 7-3) für die Signalantennen sind:

Mittelfrequenz in Hz	Bandbreite in Hz
1700	300
2000	300
2300	300
2600	300

**Tabelle 7-3: Frequenzbänder der Signalantennen**

Für jedes Frequenzband aus Tabelle 7-3 gilt folgender Grenzwert, gemessen in 50 cm Abstand:

$$100 \text{ nT} \geq \sqrt{\sum_{f_u}^{f_o} \left( \frac{i_{\text{Motor Nennfluss}}(f)}{i_{\text{Motor gemessen}}(f)} \cdot B_{\text{gemessen}}(f) \right)^2} \quad \text{Formel 10}$$

$f_o$ ..... obere Grenzfrequenz des Filterbandes

$f_u$ ..... untere Grenzfrequenz des Filterbandes

$i_{\text{Motor Nennfluss}}$ ..... Motorstrom-Frequenzkomponente bei Motor-Nennfluss

$i_{\text{Motor gemessen}}$ ..... gemessene Motorstrom-Frequenzkomponente bei reduziertem Motorfluss

$B_{\text{gemessen}}$ ..... gemessene magnetische Flussdichte bei reduziertem Motorfluss

Die Formel 10 dient dazu, die bei reduziertem Motorfluss gemessenen magnetischen Flussdichten auf die bei Motor-Nennfluss zu erwartenden Werte umzurechnen. Die Hochrechnung nach Formel 10 ist nur eine Näherung, die stark von der magnetischen Ausnutzung der Maschine abhängt. Der lineare Zusammenhang zwischen Magnetisierungsstrom und äußerem Magnetfeld ist bei höheren Frequenzen (ATP-Frequenzen) weniger von der Ausnutzung der Maschine abhängig. Dieser Zusammenhang wurde durch Leerlaufmessungen an Traktionsmotoren, bei

Maschinenmagnetisierung zwischen 50 % und 130 % vom Motor-Nennfluss, im Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz (Messung in 50 cm Abstand zum Motorgehäuse) verifiziert. Allerdings sind, auch abhängig von der Verschaltung des Motors (Stern/Dreieck), nicht alle Harmonischen im Strom und im Magnetfeld gleichermaßen zu finden. Es empfiehlt sich jedenfalls, die Messung mit dem tatsächlich auftretenden maximalen Motorfluss durchzuführen.

Informationen zur Auslegung von Traktionsmotoren unter Berücksichtigung des äußeren Magnetfeldes sind in [17] zu finden.

Die quadratische Aufsummierung der einzelnen Frequenzanteile erfolgt zur Ermittlung des Gesamteffektivwertes der magnetischen Flussdichte über das ganze Filterband ( $f_u$  bis  $f_o$ ). Es wird also ein Rechteckfilter zur Erfassung des Worst Case angenommen.

Die Auswertung erfolgt offline.

### 7.2.1.4 Betriebspunkte

Für die Feldmessungen ist der Betrieb des Motors im Leerlauf vorgesehen. Der Motor wird dabei in folgenden Betriebspunkten (Tabelle 7-4) betrieben:

Die Taktfrequenz des Stromrichters beträgt: 800 Hz

Statorfrequenz in Hz	Grund für den Messpunkt	Motorfluss in %	mit Alu Schirmplatte	Messpunkte
1	DC-Feldmessung	100	NEIN	MP 1 bis 10
7,5	AC-Feldmessung HSM_mod; ICNIRP	100	NEIN	MP 1,2,3,7,10
16,7	AC-Feldmessung HSM_mod; ICNIRP	100	NEIN	MP 1,2,3,7,10
50	AC-Feldmessung HSM_mod; ICNIRP	100	NEIN	MP 1,2,3,7,10
100	AC-Feldmessung HSM_mod; ICNIRP	100	NEIN	MP 1,2,3,7,10
max. f	AC-Feldmessung HSM_mod; ICNIRP	100	NEIN	MP 1,2,3,7,10
1	DC-Feldmessung HSM	100	JA	MP 1,2 u. 3
7,5	AC-Feldmessung HSM	100	JA	MP 1,2 u. 3
16,7	AC-Feldmessung HSM	100	JA	MP 1,2 u. 3
50	AC-Feldmessung HSM	100	JA	MP 1,2 u. 3
100	AC-Feldmessung HSM	100	JA	MP 1,2 u. 3
max. f	AC-Feldmessung HSM	100	JA	MP 1,2 u. 3
1	DC-Feldmessung	110	NEIN	MP 1 bis 10
7,5	AC-Feldmessung HSM_mod; ICNIRP	110	NEIN	MP 1,2,3,7,10
16,7	AC-Feldmessung HSM_mod; ICNIRP	110	NEIN	MP 1,2,3,7,10
50	AC-Feldmessung HSM_mod; ICNIRP	110	NEIN	MP 1,2,3,7,10
100	AC-Feldmessung HSM_mod; ICNIRP	110	NEIN	MP 1,2,3,7,10
max. f	AC-Feldmessung HSM_mod; ICNIRP	110	NEIN	MP 1,2,3,7,10
1	DC-Feldmessung HSM	110	JA	MP 1,2 u. 3
7,5	AC-Feldmessung HSM	110	JA	MP 1,2 u. 3
16,7	AC-Feldmessung HSM	110	JA	MP 1,2 u. 3
50	AC-Feldmessung HSM	110	JA	MP 1,2 u. 3
100	AC-Feldmessung HSM	110	JA	MP 1,2 u. 3
max. f	AC-Feldmessung HSM	110	JA	MP 1,2 u. 3

Tabelle 7-4: Betriebspunkte

Weitere Betriebspunkte:

Zur Ermittlung von Oberschwingungsmaxima wird der Motor in 2 Hz Schritten von 1 Hz bis zur maximalen Statorfrequenz gefahren und dabei der Motorstrom innerhalb der für die Signalantennen angegebenen Frequenzbänder beobachtet. Die dabei ermittelten Betriebspunkte mit den maximalen Filterwerten für die angegebenen Signalantennenfrequenzbänder werden danach stationär gefahren und die entsprechenden Flussdichtemessungen in 50 cm Messabstand durchgeführt (MP11 bis MP 23). Durchführung der Messung ohne Alu Schirmplatte, Grenzwert 100 nT für jedes angegebene Filterband.

### **7.2.1.5 Messanordnung**

Der Motor wird auf einer Holzunterkonstruktion montiert, sodass seine Längsachse in etwa 62,5 cm über dem Fußboden zu liegen kommt. Der Motor wird dabei in der gleichen Lage wie im Fahrzeug montiert (siehe Abbildung 7-1, Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3).

Die Aufstellung der Anordnung soll so erfolgen, dass eine möglichst geringe Beeinflussung des Motorfeldes durch andere Betriebsmittel bzw. magnetisch leitfähige Materialien erfolgt (keine massiven bzw. großflächigen magnetisch leitfähigen Materialien in unmittelbarer Aufstellungsumgebung).

Die Verlegung der Motorkabel erfolgt im Dreierbündel um das Motorkabelfeld möglichst klein zu halten. Um den weiteren Einfluss des Motorkabelfeldes zu minimieren, wird die Verkabelung möglichst orthogonal zur Motorlängsachse, auf Höhe des Motorklemmenkastens abgeständert, an den Motor herangeführt.

Auf der Seite der Motorverkabelung wird das Feld, aufgrund des Einflusses des Motorkabelfeldes, nicht gemessen. Es wird angenommen, dass die Feldverteilung um den Motor in grober Näherung symmetrisch verläuft.

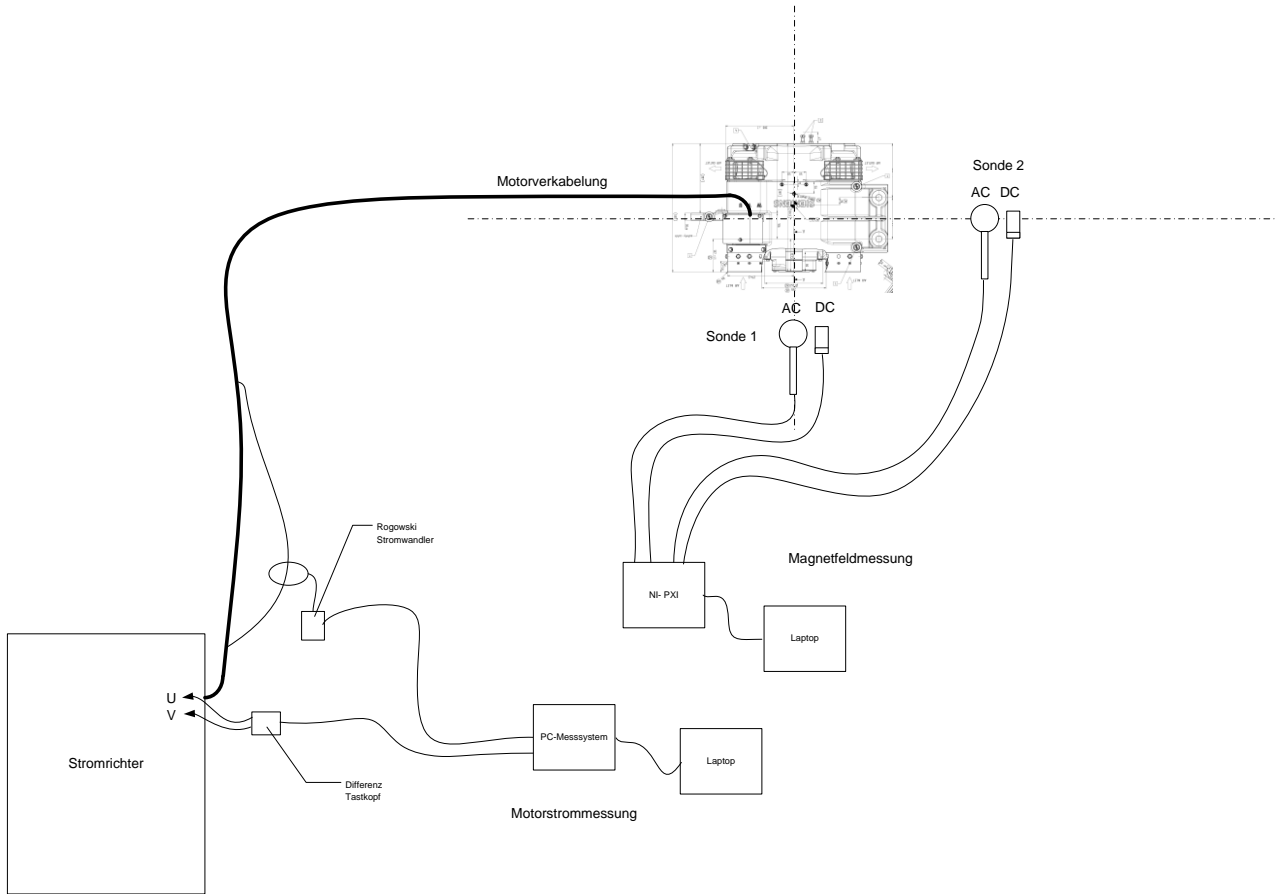


Abbildung 7-1: Übersicht Messanordnung - Traktionsmotor

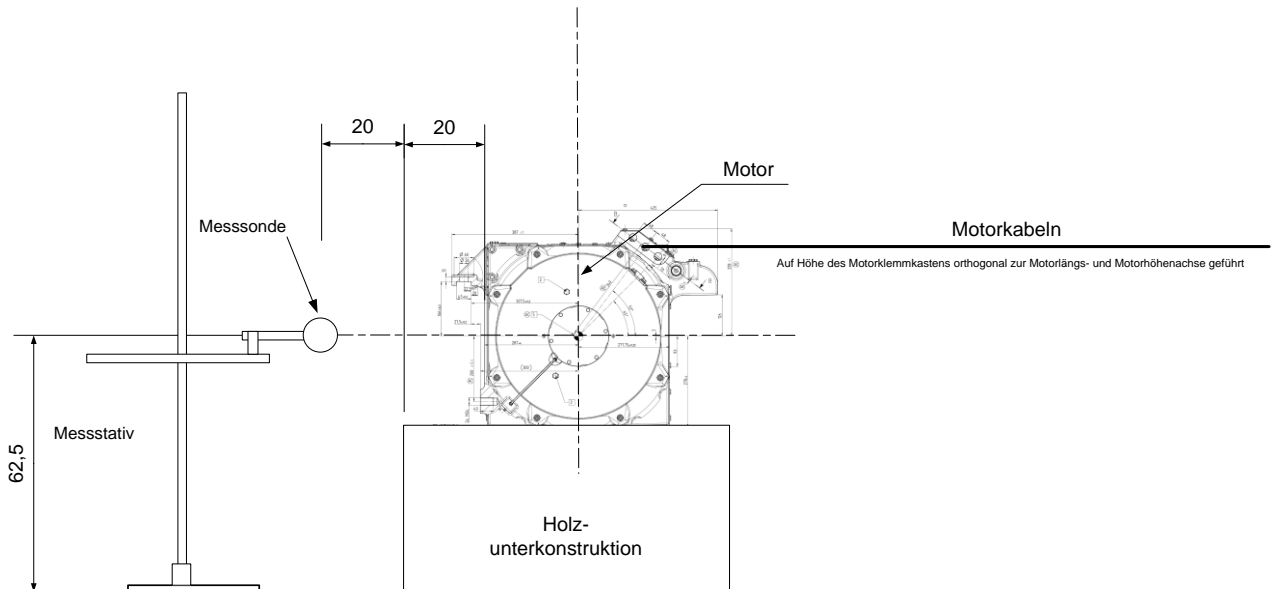


Abbildung 7-2: Messanordnung – Traktionsmotor, generell

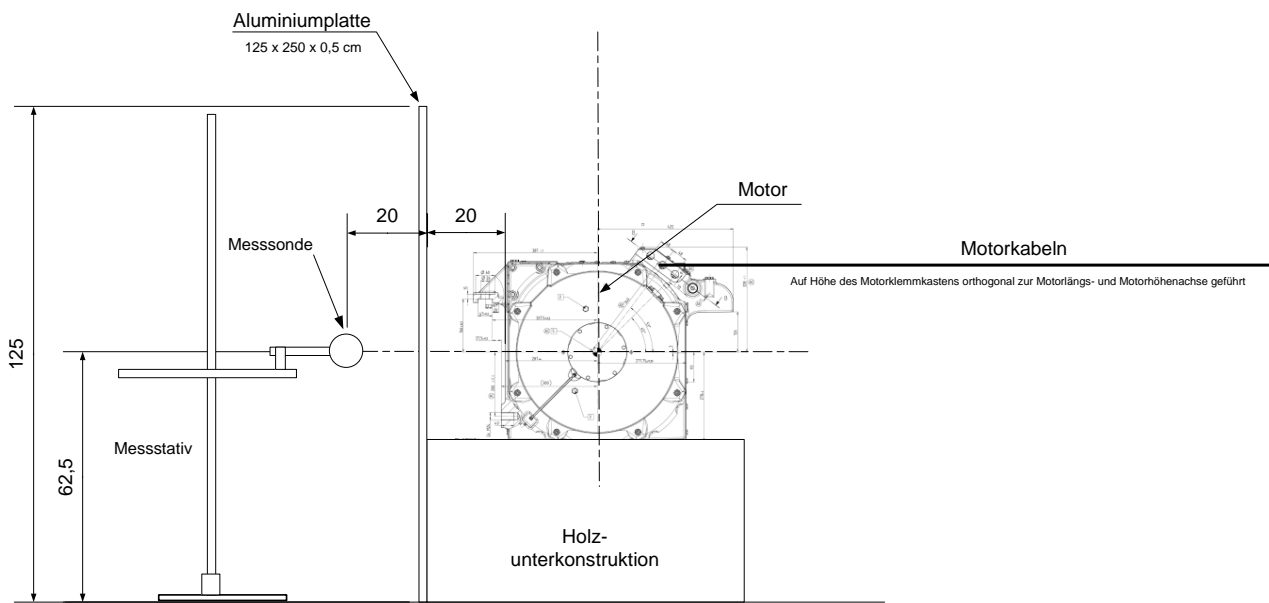


Abbildung 7-3: Messanordnung - Traktionsmotor (Herzschrittmachergrenzwert mit Alu – Schirmplatte)



### 7.2.1.6 Messpunkte

Die Messung ist an den Punkten entsprechend Abbildung 7-4 vorgesehen. Für die Verifikation der Motorspezifikation werden die MP 1,2,3,4,5 und MP 6 verwendet. Zusätzliche Messpunkte können während der Messung definiert werden.

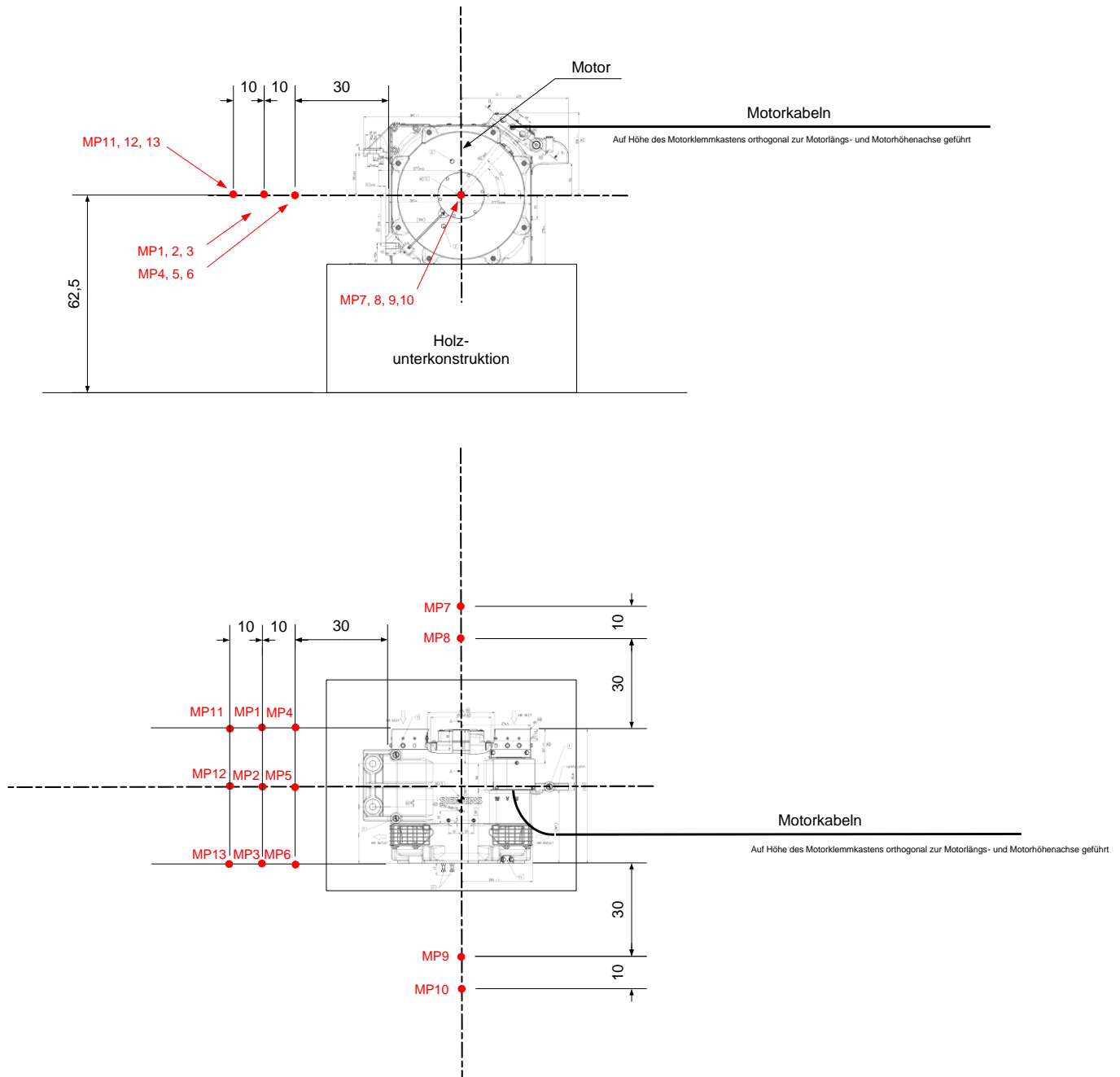


Abbildung 7-4: Messpunkte - Traktionsmotor

### **7.3 Abnahmemessung im Labor/Prüffeld**

Wie bereits im Punkt 7.1 angedeutet, ist die Abnahmemessung im Labor oder Prüffeld an Bedingungen geknüpft, die eine vollwertige Bewertung der einzelnen Komponenten nicht zulassen.

Dazu gehören:

- Minimierung von fremden Quellen
- Einstellbare Betriebspunkte
- Notwendige Quellen (Stromrichter) und Senken (Belastung)
- Verkabelung
- Umgebung (Drehgestell, Wagenkasten, ...)

Die einzelne Komponente soll möglichst unbeeinflusst von anderen Quellen getestet werden. Dabei sollen aber die verursachten Magnetfelder jenen im tatsächlichen Betrieb entsprechen. Dieser Unvereinbarkeit muss so gut als möglich durch eine geschickte Wahl der Testfälle gegengesteuert werden.

Die Testfälle müssen die Akzeptanz des Komponentenherstellers finden und sollen das Risiko von Grenzwertüberschreitungen minimieren. Dies ist deshalb oft nicht einfach, weil für die sinnvolle Wahl der Testfälle auch ein gewisser Datenaustausch zwischen den Parteien stattfinden muss. Wenn das notwendige gegenseitige Vertrauen nicht vorhanden ist, wird dieses Vorhaben scheitern.

Je größer die Unsicherheit diesbezüglich ist, desto wichtiger wird die Rolle des Systemtestaufbaues. Dort sind zwar mehrere Quellen des Magnetfeldes vorhanden, aber die Bewertung des Gesamtsystems möglich, was ja letztendlich entscheidend ist.

Wenn im Zuge des Systemtests zu hohe Magnetfelder auftreten, ist eine dezidierte Zuordnung zu einzelnen Komponenten zwar schwieriger, aber nicht unmöglich. Wie aber bereits erwähnt, ist es auch ein zeitliches Problem.

## 8. Fahrzeugqualifikation

Die abschließende Fahrzeugqualifikation liefert die Bestätigung über die Einhaltung der Fahrzeuganforderungen. Wenn die Fahrzeuganforderungen sinnvoll den betroffenen Komponenten zugeordnet wurden und diese auch entsprechend ausgeführt wurden, stellt die abschließende Messung im Idealfall nur mehr die Vervollständigung der Fahrzeugdokumentation dar.

In den vorangegangenen Kapiteln wurde aber deutlich, dass sich dieser einfach formulierte Satz nicht problemlos in die Praxis umsetzen lässt.

Damit bleiben auch die Abnahmemessungen und Funktionstests des Fahrzeuges spannend. Durch die gewissenhafte Planung und Vorarbeit können aber die Problemzonen und damit das Risiko sehr klein gehalten werden.

Bis auf Sonderfälle wird bei der Fahrzeugqualifikation hauptsächlich das magnetische Feld hinsichtlich Personenschutz überprüft. Auf eine Messung des magnetischen Feldes hinsichtlich der Anforderungen bezüglich der Gleiskreise wird üblicherweise verzichtet. Und zwar einerseits aufgrund der genauen Komponentenqualifikation und andererseits, weil die Erfassung des Magnetfeldes an der Stelle der Antenne (weil eben die Erfassungsantenne dort montiert ist) nicht möglich ist. Daher wird nur bei auftretenden Problemen und wenn die Komponentenqualifikation nicht ausreichend zufriedenstellend verlaufen ist, dieser Aufwand betrieben. Aus technischer Sicht ist die fehlende Rückmeldung, die den Einfluss des Fahrzeuges zeigt, jedenfalls bedauerlich.

### 8.1 Fahrzeuganforderungen

Die Fahrzeuganforderungen hinsichtlich magnetischem Feld sind im Wesentlichen:

- Kundenforderungen
- Nationale Anforderungen (Personenschutz) / Interoperabilität (TSI)
- Eigenanforderungen

Als Fahrzeughersteller muss man die systembedingten Einflüsse auf die Fahrzeuganforderungen klar kommunizieren und die Tests und Nachweise derart gestalten, dass eine Unterscheidung der Magnetfeldquellen möglich ist. Der Nachweis, wer welche Beiträge zum magnetischen Feld liefert, wird nie ganz eindeutig feststellbar sein. Die Akzeptanz hängt nicht zuletzt auch vom technischen Verständnis der beteiligten Parteien ab.

### 8.2 Messvorschrift für den Nachweis

Die Messvorschrift für den Nachweis der Einhaltung aller an das Fahrzeug gestellter Forderungen soll im Idealfall folgende Eigenschaften haben:

- Jede einzelne Anforderung muss für sich durch eine entsprechende Messung nachgewiesen werden. Dabei sind alle Attribute, die diese Anforderung verlangt, abzudecken. Durch die Aufzeichnung der Rohdaten sind einzelne Attribute auch durch eine Offline-Auswertung abzudecken.
- Es muss sichergestellt sein, dass für jede Anforderung der Worst Case Fall betrachtet wird. Ist dies nicht möglich, muss eine entsprechende Korrektur durchgeführt werden. Dies ist in der Messvorschrift anzugeben.
- Bei den Messungen sollten die Messpunkte so gewählt werden, dass eine Verbindung zur Feldquelle hergestellt werden kann. Damit können einerseits Problemkomponenten beobachtet und andererseits wichtige Erkenntnisse für die Komponentenqualifikation gewonnen werden. Dabei kann auch die Orientierung des Feldes eine entscheidende Rolle

spielen, weshalb die Messsonden immer in der gleichen Art und Weise ausgerichtet werden sollten.

- Durch die Ausrichtung der Messsonden können auch Fremdfelder (Oberleitung, dritte Schiene) ermittelt werden. Ist dies nicht einfach möglich, sollten zusätzliche Messpunkte (z. B. an Messorten im Fahrzeug, wo sich keine potenziellen Feldquellen befinden) festgelegt werden.
- Die Messvorschrift sollte gemeinsam mit dem Betreiber oder dem für die Fahrzeugabnahme zuständigen Organ abgestimmt und von diesem freigegeben werden. Für den Fall, dass Eigenanforderungen nachgewiesen werden, entfällt diese Freigabe natürlich.

### **8.3 Fahrzeugabnahme**

Wenn die Messvorschrift unter Einhaltung der in 8.2 empfohlenen Vorgaben erstellt und freigegeben wurde, sollte der Fahrzeugabnahme bei Einhaltung der Anforderungen nichts mehr im Wege stehen.

Der Betreiber oder das für die Fahrzeugabnahme zuständige Organ bestätigt die Einhaltung der Fahrzeuganforderungen.

## 9. Messung von Testsignalen

Durch die Kalibration wird die ordnungsgemäße Messung des magnetischen Feldes bestätigt. Die Überprüfung der ICNIRP-Bewertung war aber bei der Kalibrierstelle nicht möglich. Deshalb sind Testsignale (Tabelle 9-1, Tabelle 9-2 und Tabelle 9-3) mithilfe eines Testrahmens (Abbildung 9-1 und Abbildung 9-2) generiert worden, die die korrekte ICNIRP-Bewertung, unter Anwendung der EN 50500, möglich machen.

Die Testsignale wurden mit einem Arbiträr-Funktionsgenerator erzeugt. Dabei verursachte der Funktionsgenerator auch höherfrequente Harmonische, die sich nicht vermeiden ließen. Die Induktionswerte dieser Harmonischen waren zwar unter 10 nT, haben aber sicherlich einen, wenn auch geringen, Einfluss auf das Ergebnis der zeitlichen Bewertung. Bei der Erzeugung von reinen Einzelfrequenzen trat dieser Effekt nicht auf.

Ein weiterer Einfluss ist das immer vorhandene Magnetfeld bei 50 Hz und im Fall des Messlabors, das in der Nähe einer Bahnstrecke liegt, auch ein 16 2/3 Hz Feld in der Größe von ca. 2 µT.

Testsignal 1 (ICNIRP public & FFT nach EN 50500 = 90%):

Frequenz in Hz / Phasenwinkel	Induktion in µT	Grenzwert in µT	% vom Grenzwert
50 / 0 °	8	100	8
300 / 0 °	1,34	16,8	8
400 / 0 °	11,31	12,6	90
500 / 0 °	0,80	10	8
700 / 0 °	0,57	7,2	8
2000 / 0 °	0,50	6,3	8
5000 / 0 °	0,50	6,3	8
10000 / 0 °	0,50	6,3	8

**Tabelle 9-1: Testsignal 1**

Testsignal 2 (ICNIRP public & FFT nach EN 50500 = 52%):

Frequenz in Hz / Phasenwinkel	Induktion in µT	Grenzwert in µT	% vom Grenzwert
300 / 0 °	3,35	16,8	20
400 / 0 °	2,51	12,6	20
2000 / 0 °	0,75	6,3	12

**Tabelle 9-2: Testsignal 2**

Testsignal 3 (ICNIRP public & FFT nach EN 50500 = 90%):

Frequenz in Hz / Phasenwinkel	Induktion in µT	Grenzwert in µT	% vom Grenzwert
300 / 0 °	2,51	16,8	15
400 / 180 °	1,89	12,6	15
1000 / 0 °	0,94	6,3	15
3000 / 180 °	0,94	6,3	15
5000 / 0 °	0,94	6,3	15
10000 / 0 °	0,94	6,3	15

**Tabelle 9-3: Testsignal 3**

Neben diesen speziellen Testsignalen (Abbildung 9-3, Abbildung 9-4 und Abbildung 9-5) wurden auch einzelne Frequenzen (50 Hz - Abbildung 9-6, 100 Hz - Abbildung 9-7, 200 Hz - Abbildung 9-8 und 500 Hz - Abbildung 9-9) getestet.

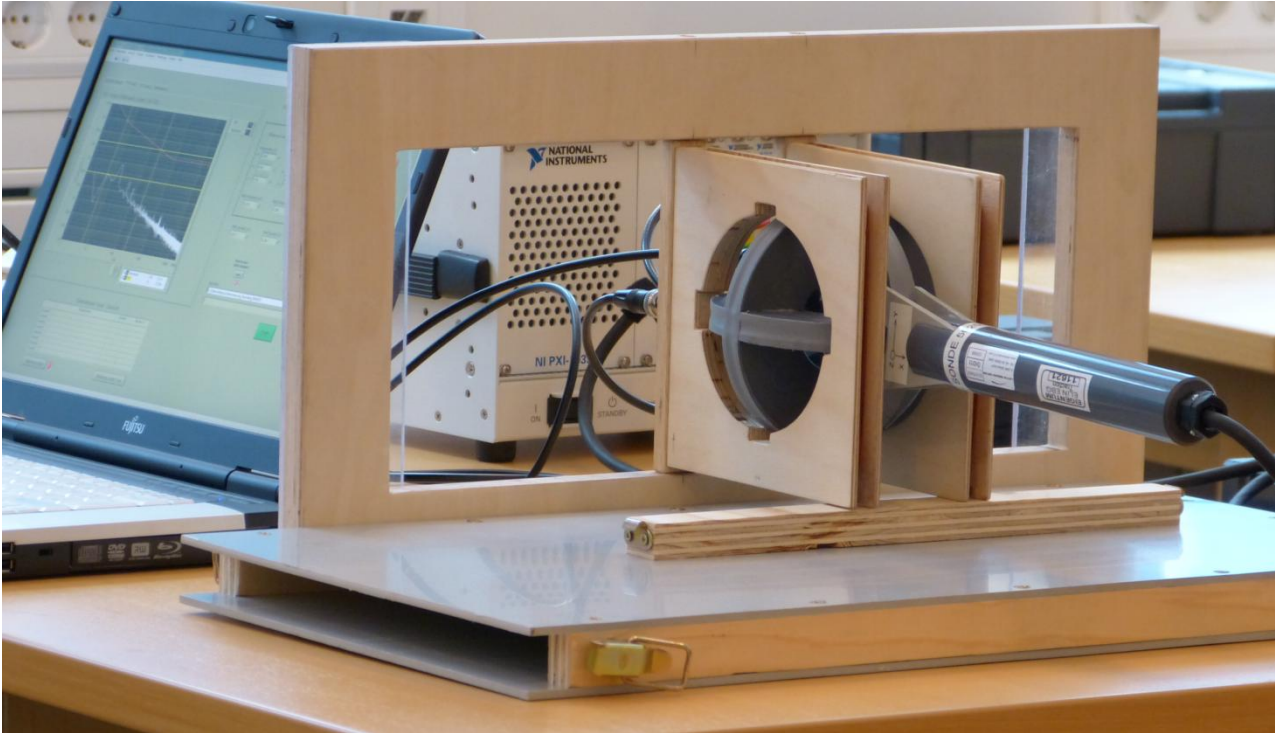


Abbildung 9-1: Testrahmen(1)



Abbildung 9-2: Testrahmen(2)

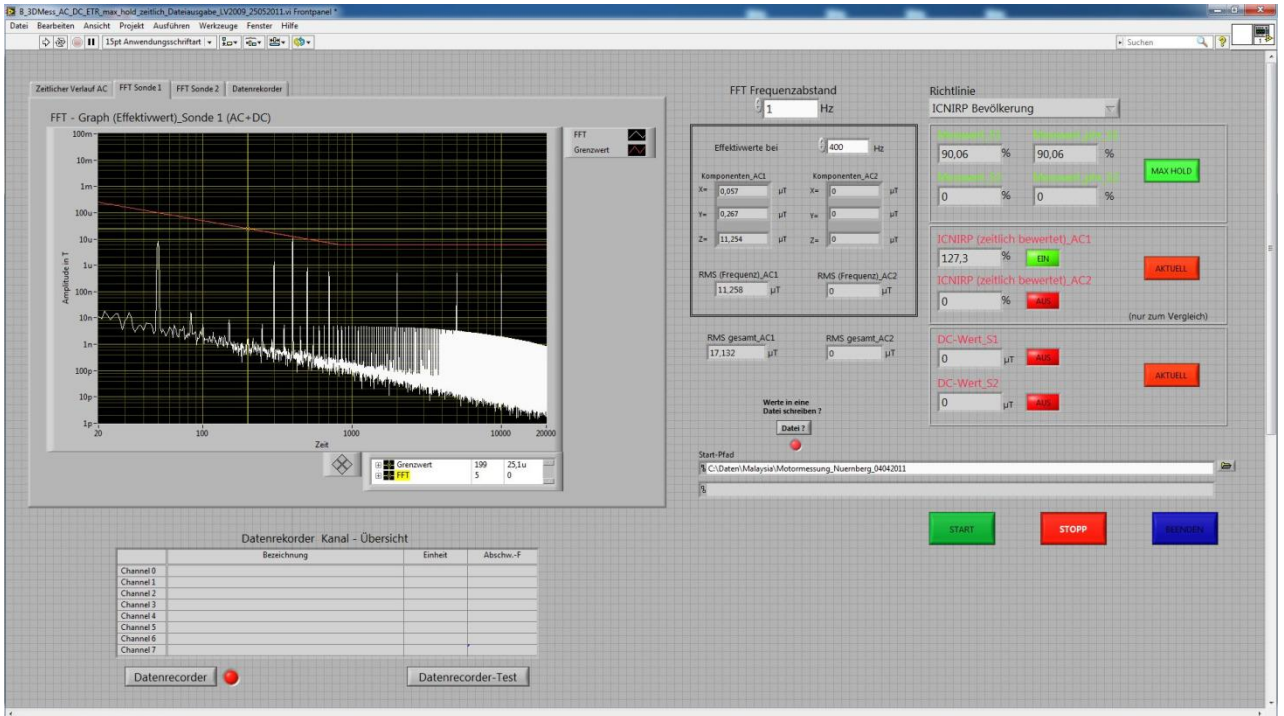


Abbildung 9-3: Testsignal 1

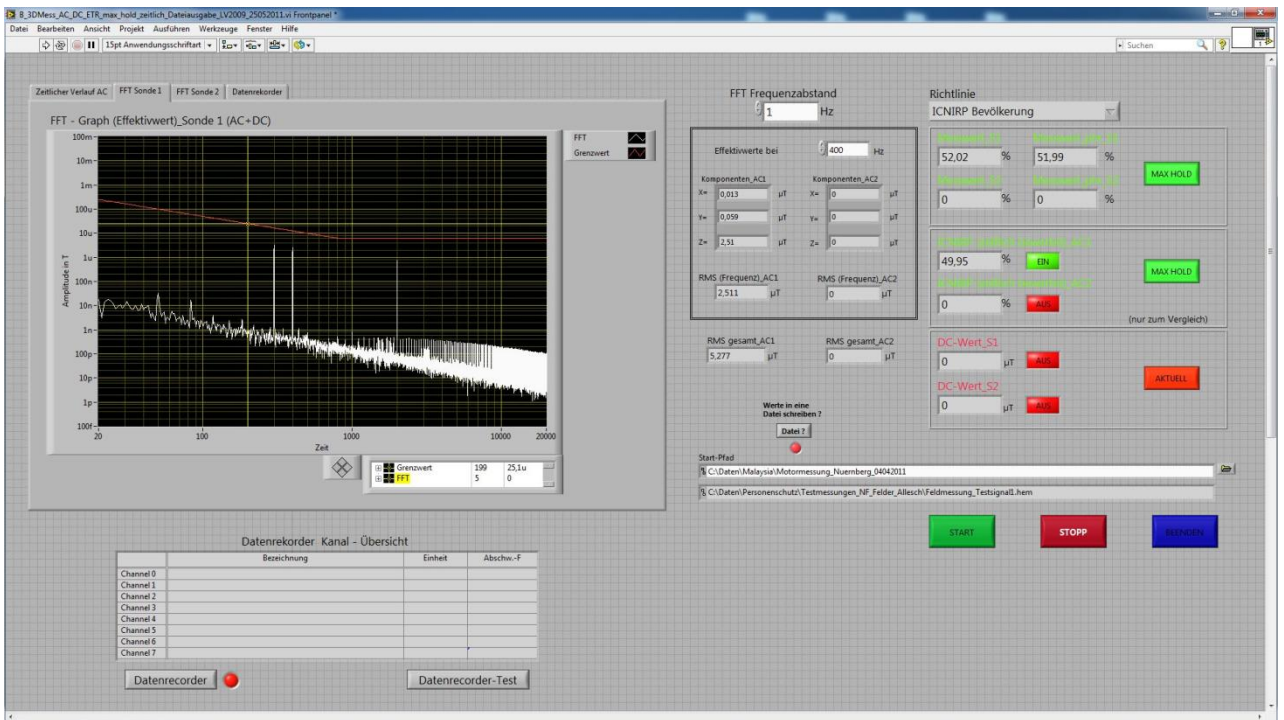


Abbildung 9-4: Testsignal 2

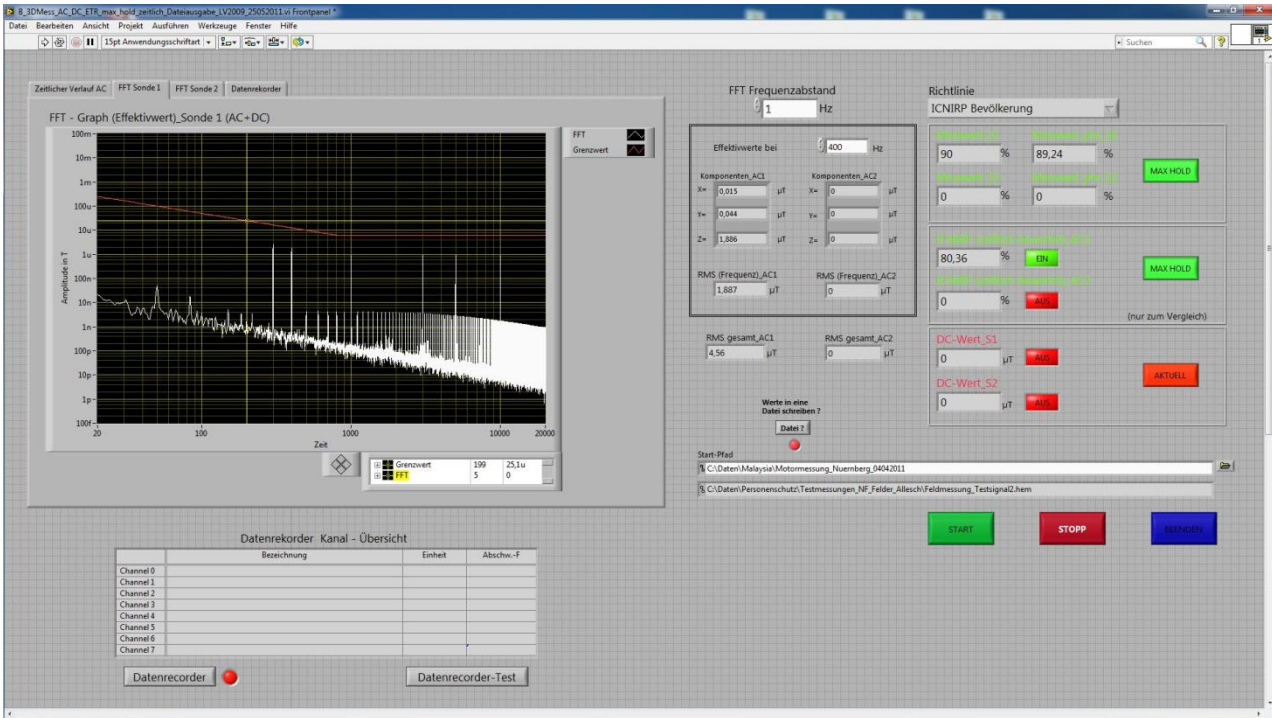


Abbildung 9-5: Testsignal 3

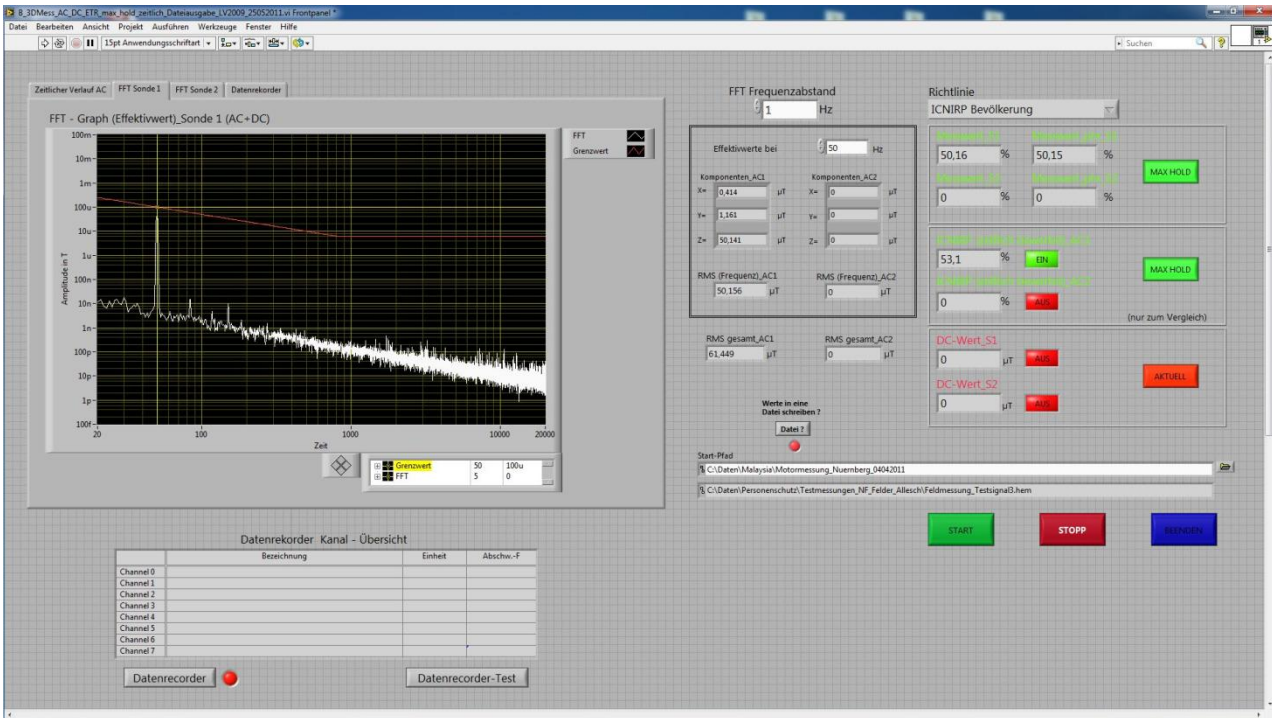


Abbildung 9-6: 50 Hz Signal



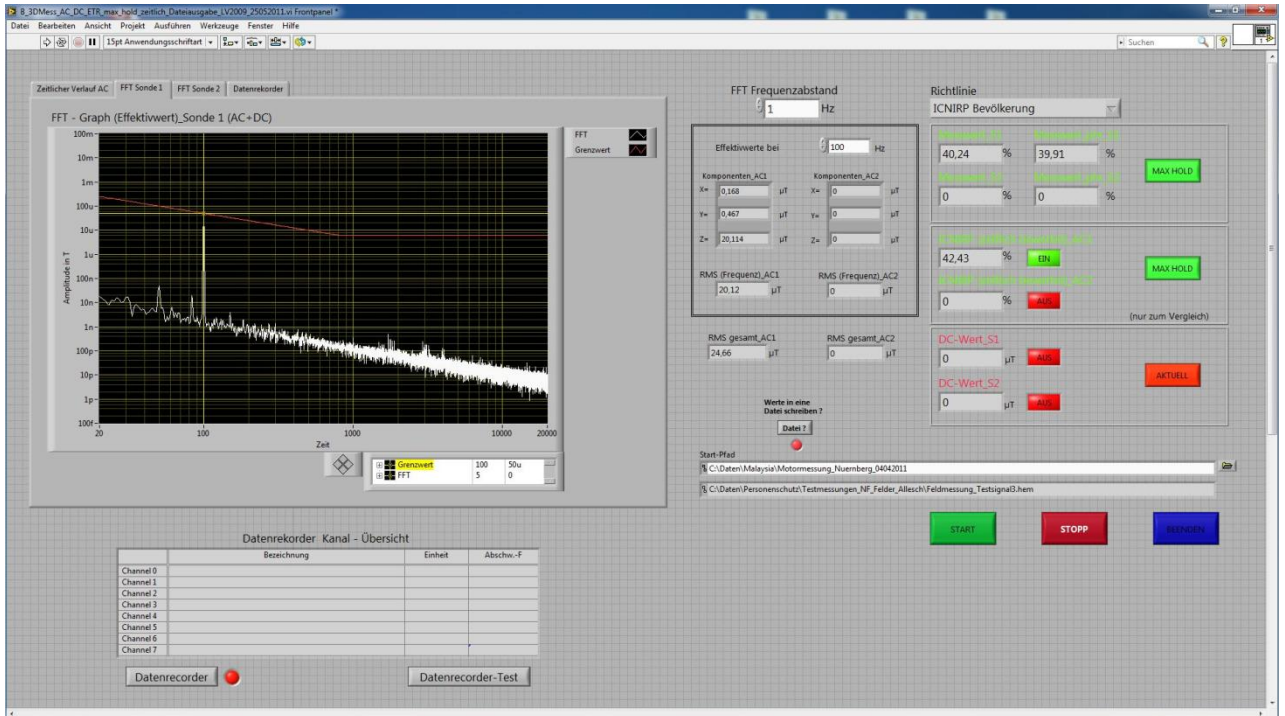


Abbildung 9-7: 100 Hz Signal

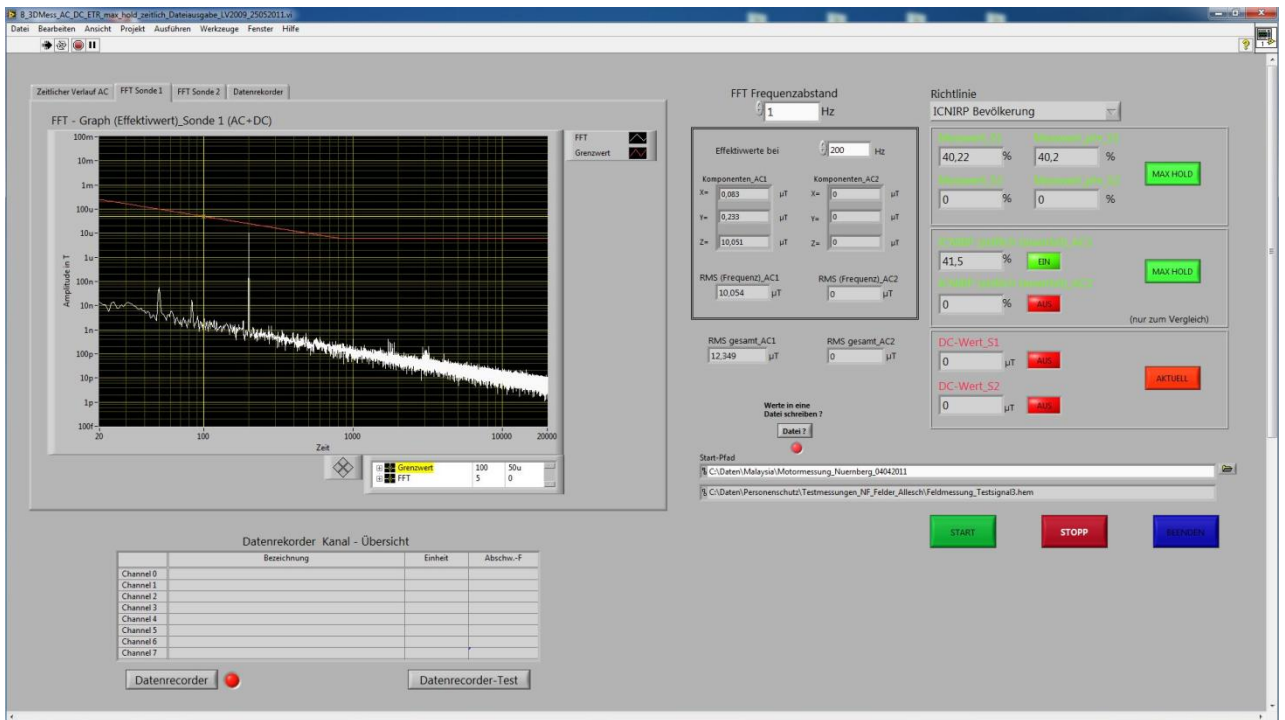


Abbildung 9-8: 200 Hz Signal

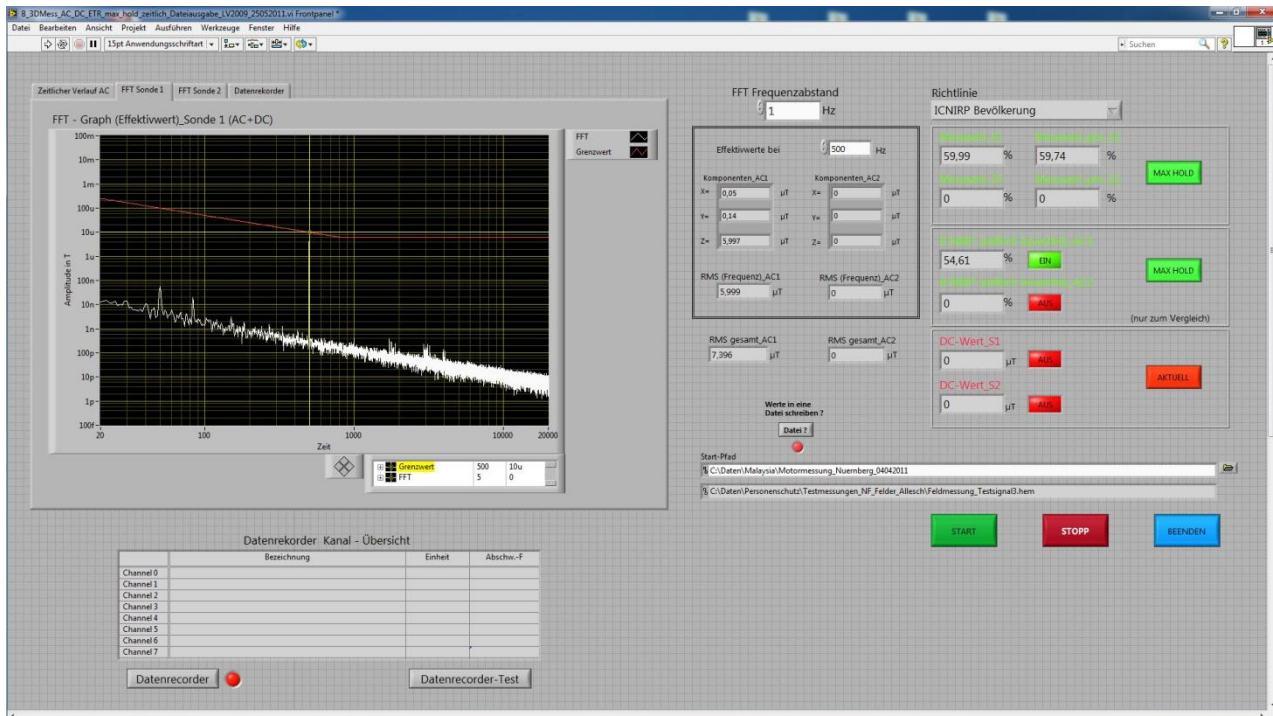


Abbildung 9-9: 500 Hz Signal

## 9.1 Vergleich der FFT-Bewertung mit der Bewertung im Zeitbereich

Die Testsignale sind, wie anfangs von Punkt 9 beschrieben, einerseits generiert worden um die ordnungsgemäße Funktion des Messsystems hinsichtlich der ICNIRP-Bewertung (FFT) nach EN 50500 zu überprüfen und andererseits, um die Bandbreite der Ergebnisse im Vergleich zur zeitlichen Bewertung zu demonstrieren.

Wie ebenfalls bereits erwähnt ist durch immer vorhandene Störfelder eine gewisse Beeinflussung der Messergebnisse nicht auszuschließen. Die Deutlichkeit, in der sich die Ergebnisse (siehe Tabelle 9-4, Messergebnisse siehe Abbildung 9-3 bis Abbildung 9-9) unterscheiden, kann nicht durch diese Störfelder erklärt werden. Messungen an Einzelfrequenzen unterstützen ebenfalls die Richtigkeit dieser vorhandenen Abweichungen.

Im folgenden Punkt 9.2 werden durch einen rechnerischen Nachweis diese Abweichungen bestätigt.

Messsignal	Amplitude in $\mu\text{T}$	ICNIRP rechn. in %	ICNIRP zeitl. in %	S1 in % (EN 50500)	S1_phr in % (EN 50500)
Testsignal 1	*	90	127,30	90,06	90,06
Testsignal 2	*	52	49,95	52,02	51,99
Testsignal 3	*	90	80,36	90,00	89,24
50 Hz-Signal	50,156	50,16	53,10	50,16	50,15
100 Hz-Signal	20,120	40,24	42,43	40,24	39,91
200 Hz-Signal	10,054	40,2	41,50	40,22	40,20
500 Hz-Signal	5,999	59,99	54,61	59,99	59,74

Tabelle 9-4: Ergebnisse der Testsignale

\*...Die Testsignale wurden mit großer Sorgfalt so eingestellt, dass bei den Amplituden der Einzelfrequenzen nur sehr geringe Abweichungen zum Vorgabewert auftraten ( $\leq 0,5\%$ ). Aufgrund der geringen Abweichung wurde der Faktor bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

## 9.2 Rechnerische Auswertung der Testsignale

Für einen Vergleich mit den Messergebnissen wurde eine rechnerische Auswertung der Testsignale, natürlich nur interessant für die zeitliche Bewertung, durchgeführt, also ein Vergleich der FFT-Bewertung (inkl. 10 % Grenze) mit der zeitlichen Bewertung.

Dabei werden die von einer Signalquelle erzeugten Signale den beiden Bewertungsverfahren unterworfen. Einmal die Bildung einer FFT vom Gesamtsignal und entsprechender Aufsummierung und einmal der Maximalwert des Gesamtsignals bei der zeitlichen Bewertung.

Die zeitliche Bewertung wurde also ohne Filter durchgeführt und damit auch ohne die Abweichungen, die durch ein Filter, zumindest an den Eckpunkten der Filterkennlinie, entstehen würden. Damit wird rechnerisch nur der Unterschied, der sich aus der impliziten Berücksichtigung der Phasenverschiebung bei der zeitlichen Bewertung ergibt, ermittelt.

Diese Abhängigkeit von der Phasenverschiebung wird durch das konstante Verhältnis der einzelnen Frequenzen im Testsignal besonders deutlich.

Folgende Ergebnisse wurden bei der Berechnung ermittelt:

Testsignal 1:

ICNIRP nach EN 50500 (FFT): 90% (unabhängig von den Phasenwinkeln)

ICNIRP zeitlich: 129,9%

Durch Ändern der einzelnen Phasenwinkel sind bei der zeitlichen Bewertung kleinere und größere Werte möglich.

Testsignal 2:

ICNIRP nach EN 50500 (FFT): 52 % (unabhängig von den Phasenwinkeln)

ICNIRP zeitlich: 50,5 %

Durch Ändern der einzelnen Phasenwinkel sind bei der zeitlichen Bewertung kleinere und größere Werte möglich.

Testsignal 3:

ICNIRP nach EN 50500 (FFT): 90% (unabhängig von den Phasenwinkeln)

ICNIRP zeitlich: 81,8%

Durch Ändern der einzelnen Phasenwinkel sind bei der zeitlichen Bewertung kleinere und größere Werte möglich.

Nicht weiter überraschend ist die stärkste Abweichung beim Testsignal 1, das durch die 10%-Regel der EN 50500 beeinflusst wird.

Aber auch die anderen Testsignale zeigen starke Abweichungen. Nachfolgend findet man die Ergebnisse, die durch Veränderungen der Phasenwinkel bei den Testsignalen 2 und 3 der Einzel-Signale zueinander entstehen.

Beim Testsignal 2, das nur aus drei Frequenzen besteht, wurde neben der Einzelvariation (Tabelle 9-5) jedes einzelnen Phasenwinkels zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  auch eine Maximalwert- und Minimalwertsuche bei voller Variation (Tabelle 9-6) aller drei Phasenwinkel durchgeführt. Bei der Einzelvariation verbleibt bei den jeweils nicht variierten Frequenzen der Phasenwinkel auf dem Standardwert.

Einzelvariation Testsignal 2 (Vorgabe 52 %):

Variierter Phasenwinkel 0 bis $180^\circ$ bei Signal:	Minimalwert ICNIRP zeitlich in %	Maximalwert ICNIRP zeitlich in %
300 Hz	46,3712	51,9747
400 Hz	45,5682	51,4666
2000 Hz	45,6413	50,4598

**Tabelle 9-5: Phasen-Einzelvariation Testsignal 2**

Multivariation Testsignal 2 (Vorgabe 52 %):

Phasenwinkel 0 bis $180^\circ$ bei Signal (5 Hz Schritte):	Minimalwert ICNIRP zeitlich in %	Maximalwert ICNIRP zeitlich in %
300 Hz & 400 Hz & 2000 Hz	45,0546	52,0000

**Tabelle 9-6: Phasen-Multivariation Testsignal 2**

Der Maximalwert von 52 %, der der Vorgabe entspricht, musste zwangsläufig auftreten.

Beim Testsignal 3 wurde lediglich eine Einzelvariation (Tabelle 9-7) der Phasenwinkel (6 Signale) durchgeführt.

Einzelvariation Testsignal 3 (Vorgabe 90 %):

Variierter Phasenwinkel 0 bis $180^\circ$ bei Signal:	Minimalwert ICNIRP zeitlich in %	Maximalwert ICNIRP zeitlich in %
300 Hz	68,9999	81,9322
400 Hz	69,2649	81,6998
1000 Hz	58,7597	81,8183
3000 Hz	63,1832	81,7378
5000 Hz	65,6869	85,4655
10000 Hz	69,9000	81,7891

**Tabelle 9-7: Phasen-Einzelvariation Testsignal 3**

Obwohl durch die Einzelvariation die absoluten Maximal- und Minimalwerte nicht erreicht werden, erkennt man die enormen Abweichungen zwischen der zeitlichen Bewertung und der FFT-Bewertung nach EN 50500.

Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass durch die FFT-Bewertung nach EN 50500 in den meisten Fällen eine Worst Case Bewertung durchgeführt wird, obwohl die 10 %-Regel Anwendung findet. Nur bei sehr speziellen Fällen, wie sie eben das Testsignal 1 darstellt, wird ein niedrigerer Wert als bei der zeitlichen Bewertung ermittelt.

## 10. Beispiele von Komponentenmessungen

### 10.1 Traktionsmotor

#### 10.1.1 Traktionsmotor DC-Fahrzeug (ATP-System)

##### 10.1.1.1 Messequipment

###### 10.1.1.1.1 Feldmessung

Es wurde ein Magnetfeldmessgerät nach EN 50500 eingesetzt.

Geräteart	Typ/Modell	Hersteller
Chassis	PXI 1033	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
AC-Feld-Erfassung	50.20.1	Eigenbau
AC-Feld-Erfassung	50.20.2	Eigenbau
DC-Feld-Erfassung	880	Wuntronic
DC-Feld-Erfassung	881	Wuntronic
Laptop	Celsius H700	Fujitsu/Siemens

DC-Feld:

Aus den drei Richtungskomponenten des DC-Feldes wird der Feldvektor gebildet.  
Das Messgerät liefert einen DC-Messwert in  $\mu\text{T}$ .

AC-Feld:

Die Auswertung basiert auf einer FFT des gemessenen zeitlichen Verlaufs.

FFT Parameter:

Fenster-Funktion: .....Hanning

Messzeit: .....500 ms

Sampling Frequenz: .....49152 Hz

Aus den drei Richtungskomponenten des AC-Feldes wird der Feldvektor ohne Berücksichtigung der Phasenverschiebung gebildet (= Worst Case).

Die mit dem Grenzwert bewerteten Spektralkomponenten der FFT werden linear summiert (entsprechend EN 50500 werden Spektrallinien unter einem Wert von 10% des Grenzwertes nicht berücksichtigt).

Das Messgerät liefert einen Messwert in % des Grenzwertes der ICNIRP Richtlinie. Ein Auslesen der Induktionswerte (in  $\mu\text{T}$ ) für jede einzelne Frequenz ist ebenfalls möglich.

Es wird der zeitliche Verlauf des Feldes getrennt für jede Raumachse mit aufgezeichnet. Damit sind unterschiedlichste Offline-Auswertungen möglich.

### 10.1.1.1.2 Motorstrom- und Motorspannungsmessung:

Geräteart	Typ/Modell	Hersteller
Datenerfassungskarte (Messung)	NI 4461	National Instruments
PCI-Box	4-Slot PCI-Expansion	Magma
Laptop	Celsius H240	Fujitsu/Siemens
Stromzange NF	CWT3LFXB	PEM
Differenz-Tastkopf	SI-9010	Yokogawa

Die Messung des Motorstromes und der Motorspannung (Außenleiterspannung) wird mit der Datenerfassungskarte (NI 4461) von National Instruments durchgeführt. Die 24 Bit Datenerfassungskarte wird mit einer Abtastfrequenz von 51200 Hz betrieben. Sie ist mit Antialiasing-Filtern ausgestattet, um Fehlmessungen durch Signale mit höheren Frequenzen zu verhindern.

Mit den gemessenen Daten wird eine Echtzeit-FFT mit folgenden Parametern durchgeführt:

- Hanning Fenster
- Frequenzabstand 2 Hz
- Max-Hold-Messung

Der zeitliche Verlauf des Stromes und der Spannung wird aufgezeichnet.

### 10.1.1.2 Grenzwerte

Folgende Grenzwerte wurden für das Motorfeld spezifiziert.

#### 10.1.1.2.1 Grenzwerte nach Motorspezifikation

##### DC-Feld

Gemessen in 25 cm Abstand: 1 mT

Gemessen in 40 cm Abstand: 0,5 mT

##### AC-Feld

Gemessen in 40 cm Abstand: ICNIRP-Grenzwerte (Public)

Gemessen in 40 cm Abstand: bei der Grundswingungsfrequenz (zw. 95 Hz und 105 Hz) max. 10  $\mu$ T (Ersatzgrenzwert für die Anforderungen an das ATP-System)

#### 10.1.1.2.2 Grenzwerte für die ATP-Bänder

##### AC-Feld

Für jedes ATP-Frequenzband gilt folgender Grenzwert (siehe Beschreibung bei Formel 10):

$$100 \text{ nT} \geq \sqrt{\sum_{f_{u \text{ ATP}}}^{f_{o \text{ ATP}}} \left( \frac{i_{\text{Motor Nennfluss}}(f)}{i_{\text{Motor gemessen}}(f)} \cdot B_{\text{gemessen}}(f) \right)^2} \quad \text{Formel 11}$$

Die Auswertung erfolgt offline. In diesem Fall entfällt die Hochrechnung, weil bereits bei 100% Motorfluss bzw. 110% Motorfluss gemessen wurde. In der Formel 11 ist daher das Stromverhältnis durch den Faktor 1 zu ersetzen.

Die Frequenzbänder des ATP-Systems (Tabelle 10-1) sind:

<b>Mittenfrequenz in Hz</b>	<b>Resultierende Frequenzbänder in Hz</b>
4750	4600 to 4900
5250	5100 to 5400
5750	5600 to 5900
6250	6100 to 6400
9500	9350 to 9650
10500	10350 to 10650
11500	11350 to 11650
12500	12350 to 12650
13500	13350 to 13650
14500	14350 to 14650
15500	15350 to 15650
16500	16350 to 16650

**Tabelle 10-1: Frequenzbänder des ATP-Systems**

### 10.1.1.3 Betriebspunkte

Für die Feldmessungen ist der Betrieb des Motors im Leerlauf vorgesehen. Der Motor wird dabei in folgenden Betriebspunkten (Tabelle 10-2) betrieben:

Die Taktfrequenz des Stromrichters beträgt: 800Hz

<b>Statorfrequenz in Hz</b>	<b>Grund für den Messpunkt</b>	<b>Motorfluss in %</b>	<b>Relevante Messpunkte</b>
1	DC-Feldmessung	100	MP 1 - 16
10	ATP-Frequenzen (Oberschwingungen); ICNIRP	100	MP 1, 6, 10, 12, 14, 16, 17 u. 18
56	ATP-Frequenzen (Oberschwingungen); ICNIRP	100	MP 1, 6, 10, 12, 14, 16, 17 u. 18
96	ATP-Frequenzen (Oberschwingungen); „ATP-Ersatzgrenzwert“ (Grundschiwingung; 10 $\mu$ T); ICNIRP	100	MP 1, 6, 10, 12, 14, 16, 17 u. 18
110	ATP-Frequenzen (Oberschwingungen); ICNIRP	100	MP 1, 6, 10, 12, 14, 16, 17 u. 18
128	ATP-Frequenzen (Oberschwingungen); ICNIRP	100	MP 1, 6, 10, 12, 14, 16, 17 u. 18

Statorfrequenz in Hz	Grund für den Messpunkt	Motorfluss in %	Relevante Messpunkte
1	DC-Feldmessung	110	MP 1 - 16
10	ATP-Frequenzen (Oberschwingungen);	110	MP 1, 6, 10, 12, 14, 16, 17 u. 18
56	ATP-Frequenzen (Oberschwingungen);	110	MP 1, 6, 10, 12, 14, 16, 17 u. 18
96	ATP-Frequenzen (Oberschwingungen);	110	MP 1, 6, 10, 12, 14, 16, 17 u. 18
110	ATP-Frequenzen (Oberschwingungen);	110	MP 1, 6, 10, 12, 14, 16, 17 u. 18
128	ATP-Frequenzen (Oberschwingungen);	110	MP 1, 6, 10, 12, 14, 16, 17 u. 18

**Tabelle 10-2: Betriebspunkte Traktionsmotor DC**

Die Wahl der Betriebspunkte erfolgte hinsichtlich der auftretenden Oberschwingungen in den Frequenzbändern des ATP-Systems. Diese sind laut Rechenergebnis der Motorstromberechnung in diesen Betriebspunkten im Bereich ihrer Maxima.

Die gleichen Betriebspunkte werden auch für die Bewertung nach ICNIRP herangezogen.

#### **10.1.1.4 Messanordnung**

Der Motor wurde auf einer Holzunterkonstruktion montiert (Abbildung 10-1), sodass seine Unterkante in etwa 60 cm über dem Fußboden zu liegen kam. Der Motor wurde dabei in der gleichen Lage wie im Fahrzeug montiert (Klemmenkasten nach oben).

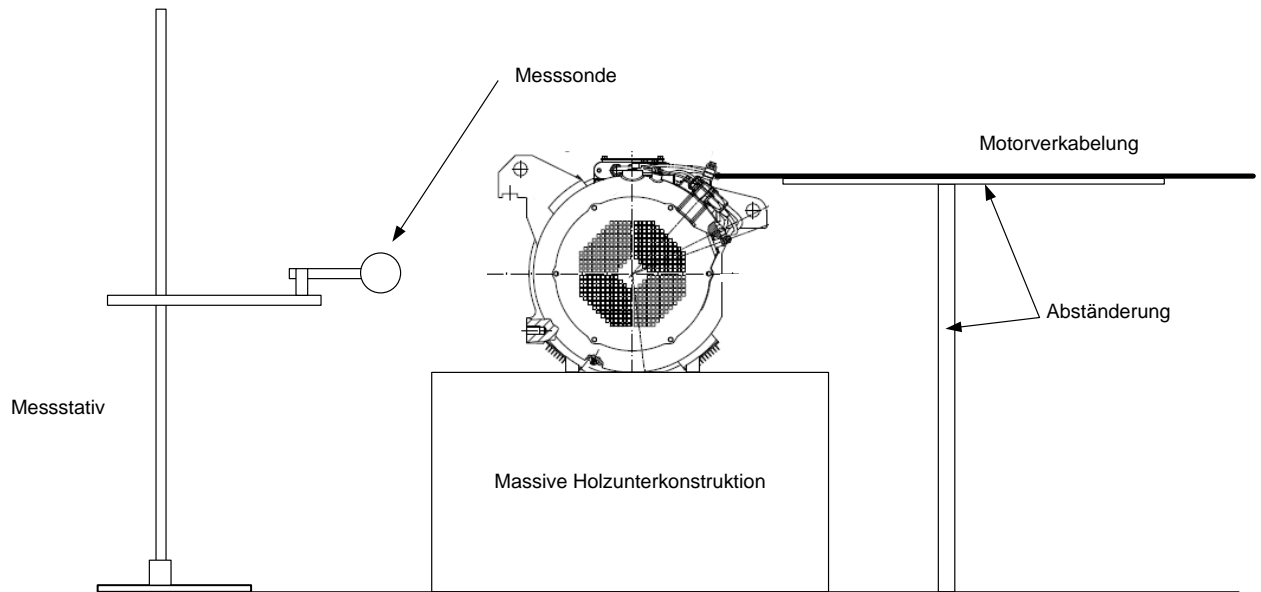
Die Aufstellung des Aufbaues erfolgte im Hof des ETR Prüffeldes (Abbildung 10-2 und Abbildung 10-3), in diesem Bereich ist die geringste Feldbeeinflussung im Prüffeldbereich gegeben (keine massiven bzw. großflächigen magnetisch leitfähigen Materialien in unmittelbarer Aufstellungsumgebung). Den schematischen Aufbau der Messanordnung zeigt Abbildung 10-4.

Der den Motor steuernde Stromrichter befand sich im Innenbereich des Prüffeldes.

Die Motorverkabelung wurde durch einen vorhandenen Wanddurchbruch in den Hof geführt. Dabei erfolgte die Verlegung der Motorkabel im Dreierbündel, um das Motorkabelfeld möglichst klein zu halten. Um den weiteren Einfluss des Motorkabelfeldes zu minimieren, wurde die Verkabelung möglichst orthogonal zur Motorlängsachse, auf Höhe des Motorklemmenkastens abgeständert, an den Motor herangeführt.

Auf der Seite der Motorverkabelung wurde das Feld aufgrund des Einflusses des Motorkabelfeldes nicht gemessen. Es wird angenommen, dass die Feldverteilung um den Motor in grober Näherung symmetrisch verläuft.





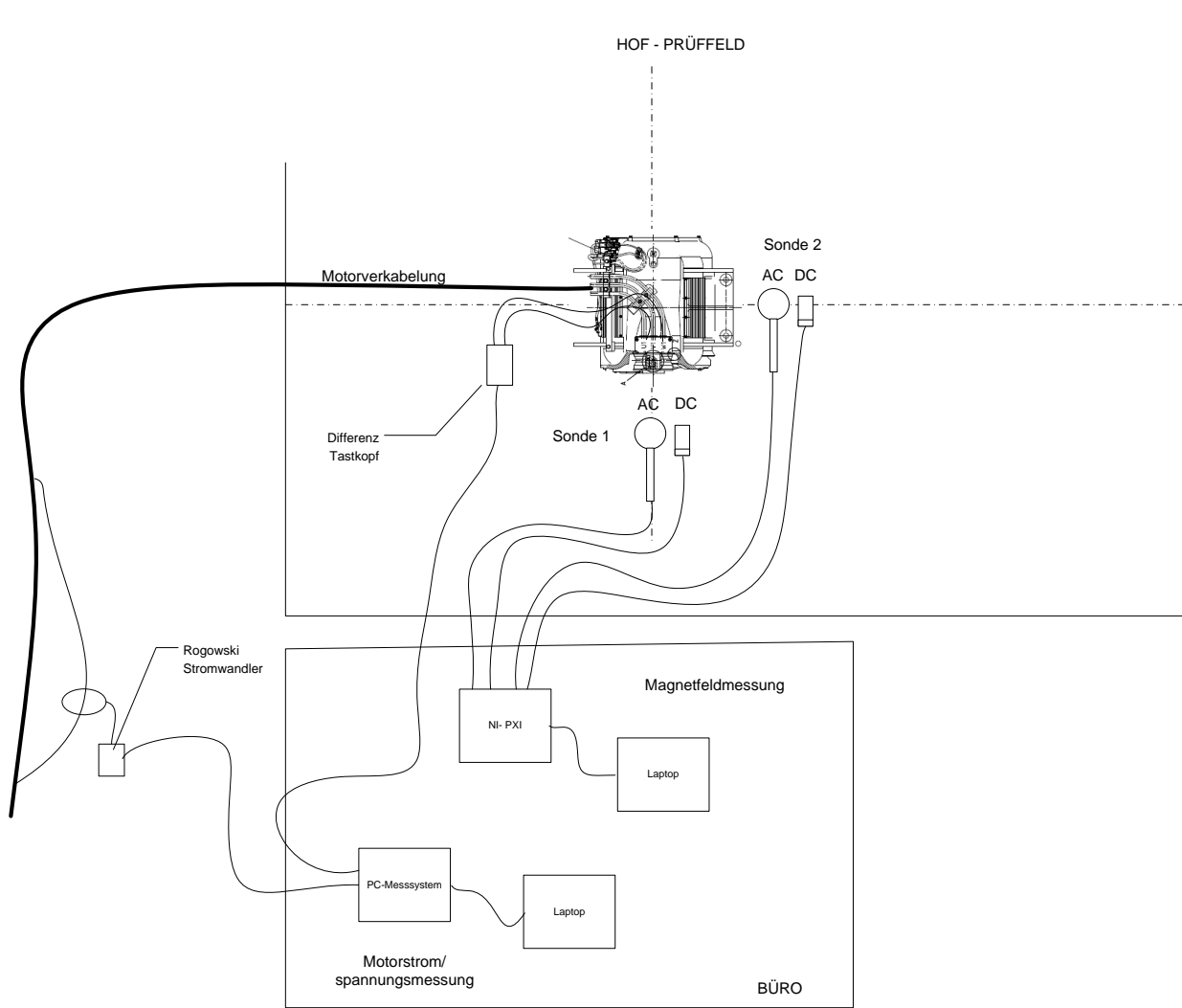
**Abbildung 10-1: Messanordnung Traktionsmotor DC im Freigelände des Prüffeldes**



**Abbildung 10-2: Magnetfeldmessung Traktionsmotor DC**



Abbildung 10-3: Magnetfeldmessung Traktionsmotor DC an möglichen Positionen der ATP-Antenne



**Abbildung 10-4: Messanordnung Traktionsmotor DC, gesamt**

### 10.1.1.5 Messpunkte

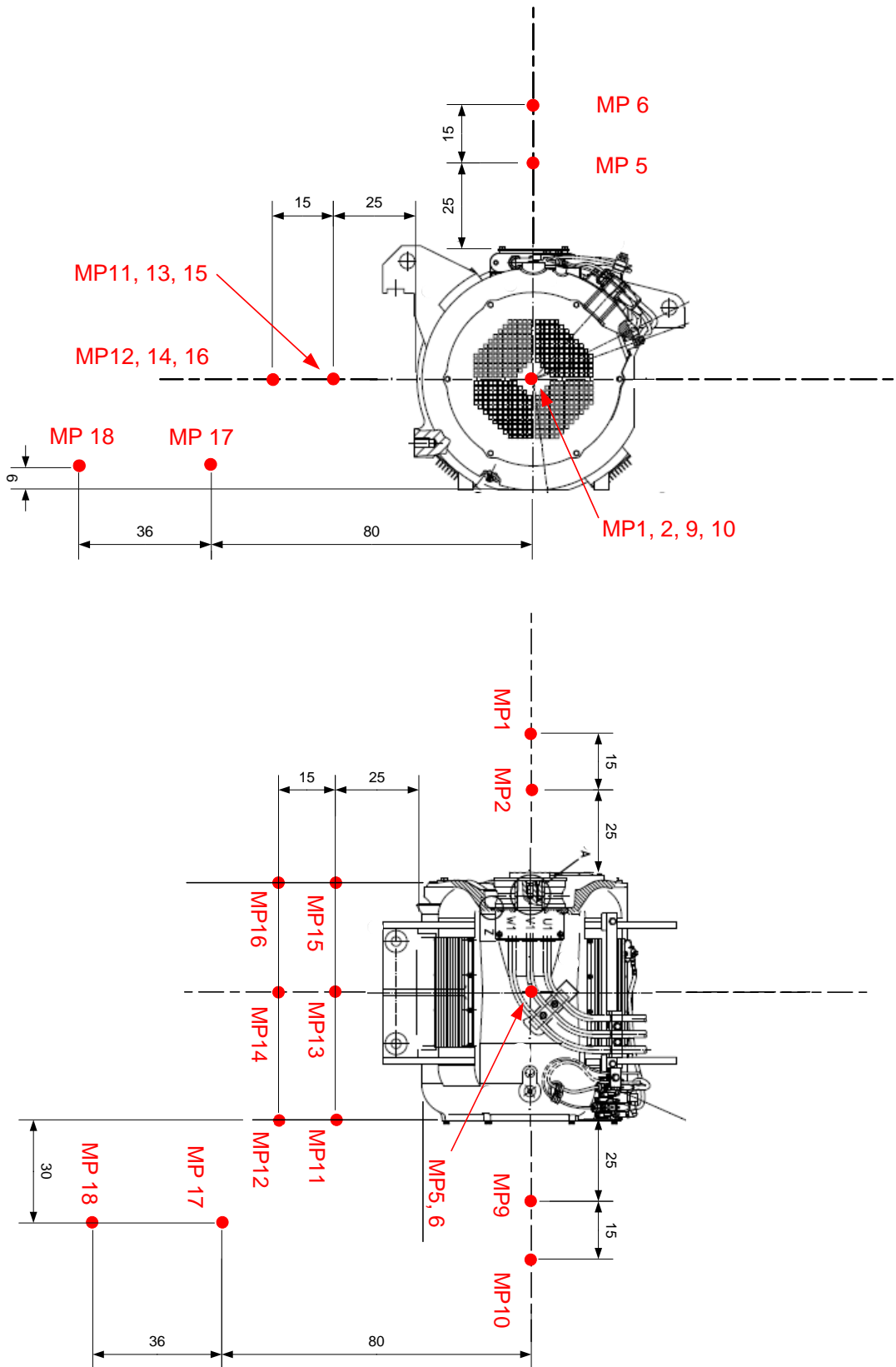


Abbildung 10-5: Messpunkte Traktionsmotor DC

Die Messung ist an den Punkten entsprechend Abbildung 10-5 vorgesehen. Für die Verifikation der Motorspezifikation werden die MP 1,2,9 und MP 10 sowie die MP 11 bis 16 verwendet. Zusätzliche Messpunkte können während der Messung definiert werden.

### 10.1.1.6 Messergebnisse

Die Betriebspunkte mit 110 % Motorfluss wurden nur bei den Messpunkten 14 und 15 vollständig gemessen. Bei allen restlichen Messpunkten wurde nur noch bei den Betriebspunkten 1 Hz, 10 Hz und 56 Hz gemessen. Der Grund dafür ist, dass bei den Betriebspunkten mit höherer Frequenz die Spannung durch die U-f-Kennlinie des Stromrichters nicht mehr höher ist als bei der 100 % Motorfluss Einstellung. Die Messpunkte 14 und 15 wurden willkürlich zur Überprüfung dieses Sachverhaltes herangezogen.

#### 10.1.1.6.1 AC Magnetfeld

Der Wert des AC-Magnetfeldes ist der Wert der Grundschiwingung, also bei jener Statorfrequenz des Betriebspunktes. Der ICNIRP-Wert bezieht sich auf das gesamte Spektrum von 0 Hz bis 20 kHz. Die Messergebnisse zeigt Tabelle 10-3 und Tabelle 10-4.

Bei 100% Motorfluss

AC-Magnetfeld der Grundschiwingung (Effektivwert) bei Motorfluss: <b>100 %</b>												
Betriebspunkte – Statorfrequenz												
MP	1 Hz		10 Hz		56 Hz		96 Hz		110 Hz		128 Hz	
	ICNIRP in %	AC- Feld in $\mu$ T	ICNIRP in %	AC- Feld in $\mu$ T	ICNIRP in %	AC- Feld in $\mu$ T	ICNIRP in %	AC- Feld in $\mu$ T	ICNIRP in %	AC- Feld in $\mu$ T	ICNIRP in %	AC- Feld in $\mu$ T
1	0			0,86	0	0,93	0	0,77	0	0,66	0	0,59
2	0			1,49	0	1,49	0	1,24	0	1,07	0	0,94
5	0		81,57	14,10	435,60	15,46	162,10	11,77	148,00	10,14	199,70	9,28
6	0			3,79	69,93	4,38	0	3,43	0	2,97	37,66	2,70
9	0			1,29	0	1,46	0	1,14	0	0,99	0	0,92
10	0			0,90	0	0,99	0	0,78	0	0,67	0	0,62
11	0			1,08	0	0,96	0	0,73	0	0,62	0	0,57
12	0			0,63	0	0,57	0	0,45	0	0,39	0	0,36
13	0			1,60	0	1,02	0	0,76	0	0,65	0	0,59
14	0			0,74	0	0,58	0	0,45	0	0,39	0	0,35
15	0			1,18	0	1,00	0	0,65	0	0,55	0	0,52
16	0			0,66	0	0,54	0	0,40	0	0,34	0	0,31
17	0			0,28	0	0,28	0	0,21	0	0,18	0	0,17
18	0			0,19	0	0,15	0	0,11	0	0,10	0	0,09

**Tabelle 10-3: Messergebnisse AC-Magnetfeld, Traktionsmotor DC, 100% Motorfluss**

Bei MP5 und MP6 ist deutlich der Einfluss des Motorkabelfeldes zu sehen (im Vergleich zu MP13 und MP14).

Bei 110% Motorfluss

AC-Magnetfeld der Grundschiwingung (Effektivwert) bei Motorfluss: <b>110 %</b>												
Betriebspunkte – Statorfrequenz												
MP	1 Hz		10 Hz		56 Hz		96 Hz		110 Hz		128 Hz	
	ICNIRP in %	AC-Feld in $\mu\text{T}$	ICNIRP in %	AC-Feld in $\mu\text{T}$	ICNIRP in %	AC-Feld in $\mu\text{T}$	ICNIRP in %	AC-Feld in $\mu\text{T}$	ICNIRP in %	AC-Feld in $\mu\text{T}$	ICNIRP in %	AC-Feld in $\mu\text{T}$
1	0		0	0,96	0	1,17						
2	0		0	1,62	0	1,88						
5	0		91,21	16,80	406,90	19,06						
6	0		0	4,53	59,11	5,39						
9	0		0	1,61	0	1,83						
10	0		0	1,09	0	1,24						
11	0		0	1,29	0	1,19						
12	0		0	0,74	0	0,73						
13	0		0	2,03	0	1,34						
14	0		0	0,92	0	0,74	0	0,45	0	0,39	0	0,36
15	0		0	1,54	0	1,47	0	0,68	0	0,58	0	0,52
16	0		0	0,80	0	0,72						
17	0		0	0,34	0	0,35						
18	0		0	0,20	0	0,18						

Tabelle 10-4: Messergebnisse AC-Magnetfeld, Traktionsmotor DC, 110% Motorfluss

Bei MP5 und MP6 ist deutlich der Einfluss des Motorkabelfeldes zu sehen (im Vergleich zu MP13 und MP14).

**10.1.1.6.2 DC-Feld**

Die Messergebnisse zeigt Tabelle 10-5 und Tabelle 10-6.

Bei 100% Motorfluss:

DC-Magnetfeld bei Motorfluss: <b>100 %</b>						
Betriebspunkte – Statorfrequenz						
MP	1 Hz	10 Hz	56 Hz	96 Hz	110 Hz	128 Hz
	DC-Feld in $\mu\text{T}$	DC-Feld in $\mu\text{T}$	DC-Feld in $\mu\text{T}$	DC-Feld in $\mu\text{T}$	DC-Feld in $\mu\text{T}$	DC-Feld in $\mu\text{T}$
1	32,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7
2	34,5	22,5	21,8	21,5	21,7	21,7
5	55,1	46,2	46,0	46,2	46,0	46,0
6	38,0	37,0	36,8	36,9	36,9	36,8
9	17,9	16,8	17,0	16,8	17,0	16,7
10	29,5	28,9	29,0	29,0	29,0	29,1
11	27,4	26,1	26,1	26,2	26,0	25,9
12	34,8	32,1	32,2	32,2	32,1	32,2
13	33,8	30,3	30,4	30,4	30,2	30,2
14	36,0	34,0	34,0	33,9	33,9	33,6
15	29,9	24,5	23,8	24,0	24,0	24,3
16	36,4	34,2	34,4	34,4	34,3	34,2
17	32,7	32,3	32,4	32,3	32,2	32,1
18	35,5	35,2	35,2	35,3	35,2	35,2

Tabelle 10-5: Messergebnisse DC-Magnetfeld, Traktionsmotor DC, 100% Motorfluss

Bei 110% Motorfluss:

DC-Magnetfeld bei Motorfluss: <b>110 %</b>						
Betriebspunkte – Statorfrequenz						
	1 Hz	10 Hz	56 Hz	96 Hz	110 Hz	128 Hz
MP	DC-Feld in $\mu\text{T}$	DC-Feld in $\mu\text{T}$	DC-Feld in $\mu\text{T}$	DC-Feld in $\mu\text{T}$	DC-Feld in $\mu\text{T}$	DC-Feld in $\mu\text{T}$
1	32,6	31,7	31,7			
2	38,7	22,2	21,6			
5	50,0	46,5	46,5			
6	37,4	37,1	37,2			
9	17,4	16,7	16,8			
10	29,2	29,2	29,3			
11	28,4	25,8	25,9			
12	35,6	31,9	32,0			
13	37,8	29,7	29,9			
14	36,5	33,7	33,7	33,8	33,8	33,7
15	31,1	24,4	24,4	24,3	24,2	24,3
16	36,4	33,9	34,1			
17	32,1	32,1	32,1			
18	35,2	35,1	35,1			

**Tabelle 10-6: Messergebnisse DC-Magnetfeld, Traktionsmotor DC, 110% Motorfluss**

### **10.1.1.6.3 AC-Magnetfeld in den ATP-Bändern**

Der Wert für das Magnetfeld pro ATP-Band wurde wie folgt errechnet:

$$100 \text{ nT} \geq B_{\text{ATPBand}} = \sqrt{\sum_{f_{\text{ATP}}}^{f_{\text{ATP}}} (B(f))^2} \quad \text{Formel 12}$$

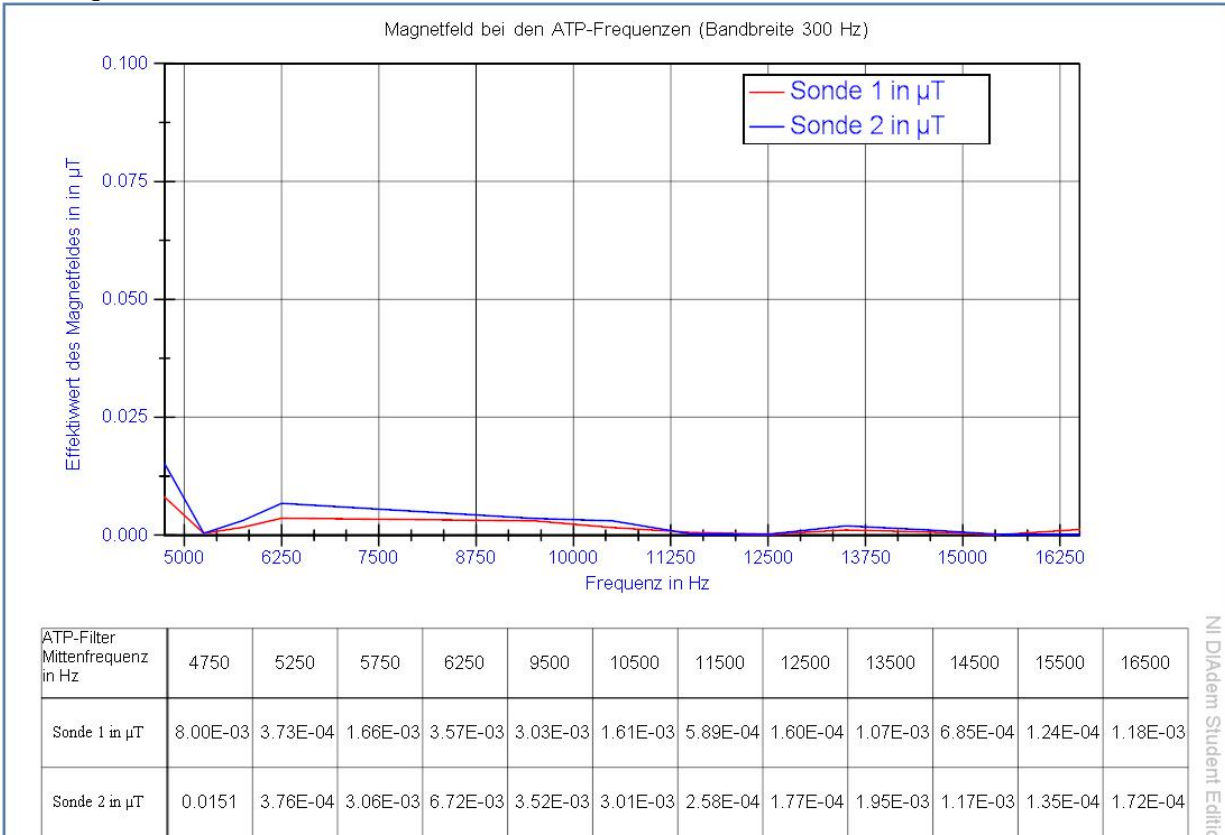
Achtung: Die gemessenen Feldstärken in den Messpunkten 5 und 6 sind stark durch das Kabelfeld des Motorkabels beeinflusst und nicht repräsentativ für das Motorfeld.

Für das ATP-System sind vor allem die Messpunkte 17 und 18, welche den wahrscheinlichen Montagepositionen der ATP-Antennen am Fahrzeug entsprechen, interessant. Der höchste gemessene Wert (nach Formel 12) an diesen Positionen beträgt 16,2 nT und besitzt damit ausreichend Abstand zum Grenzwert von 100 nT.

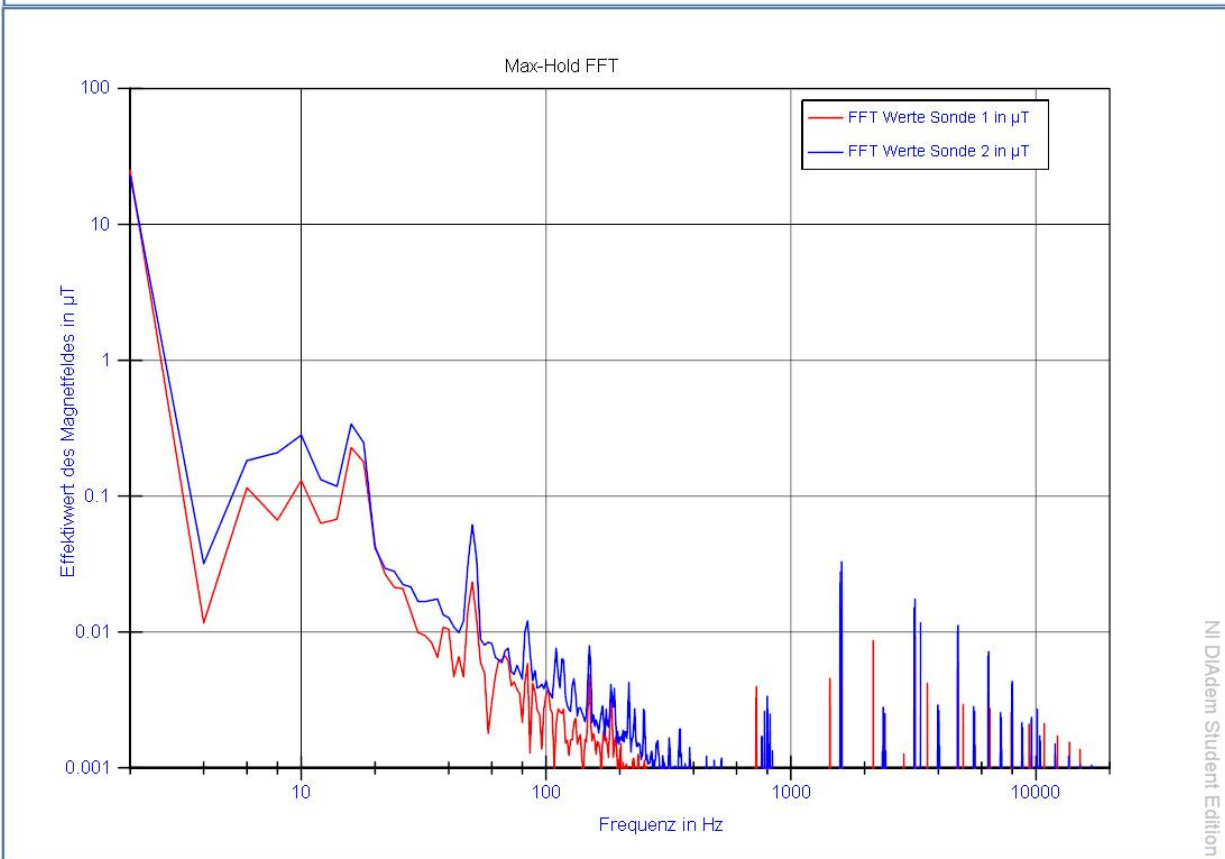
Die Zusammenfassung der Messergebnisse zeigt Tabelle 10-7, Tabelle 10-8, Tabelle 10-9, Tabelle 10-10, Tabelle 10-11, Tabelle 10-12 und Tabelle 10-13.

**Bei 100 % Motorfluss:**

Statorfrequenz 10 Hz; Sonde 1 = MP 18; Sonde 2 = MP 17



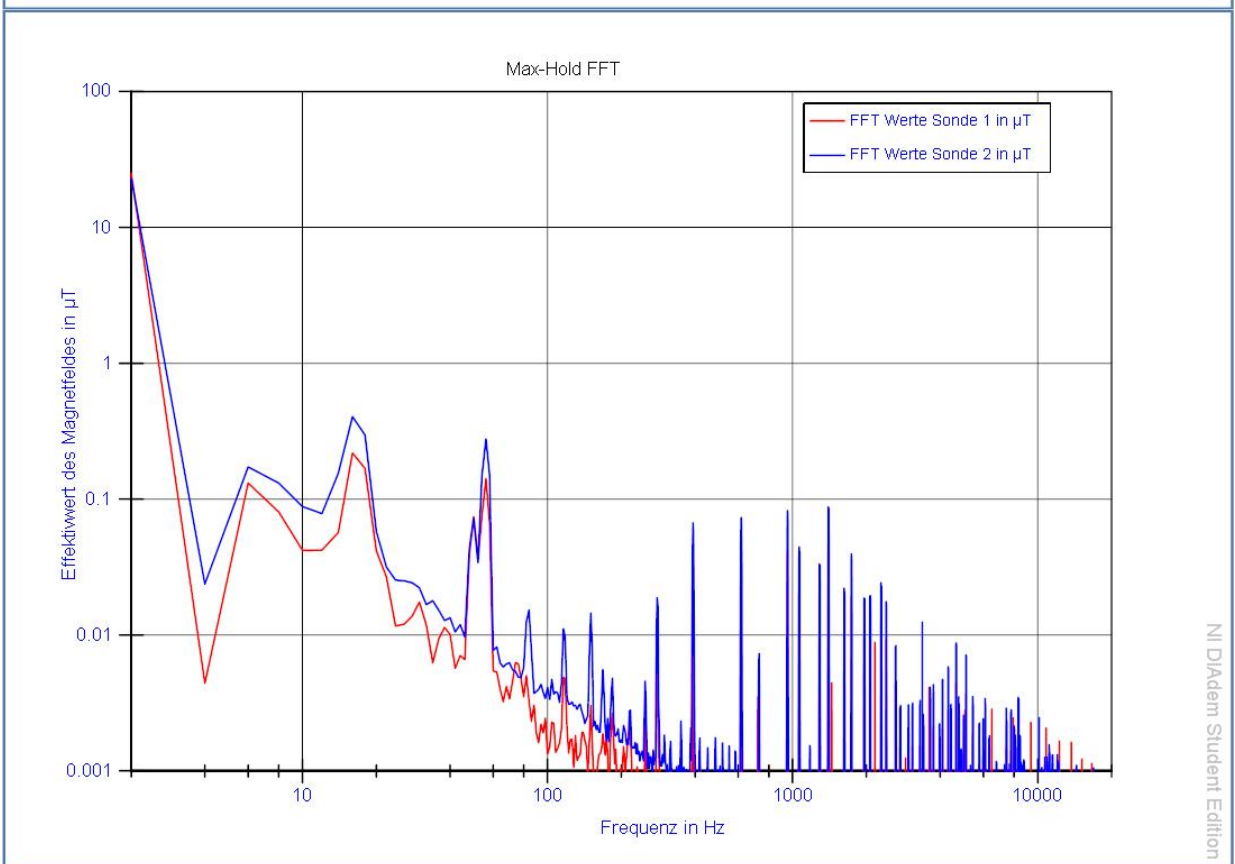
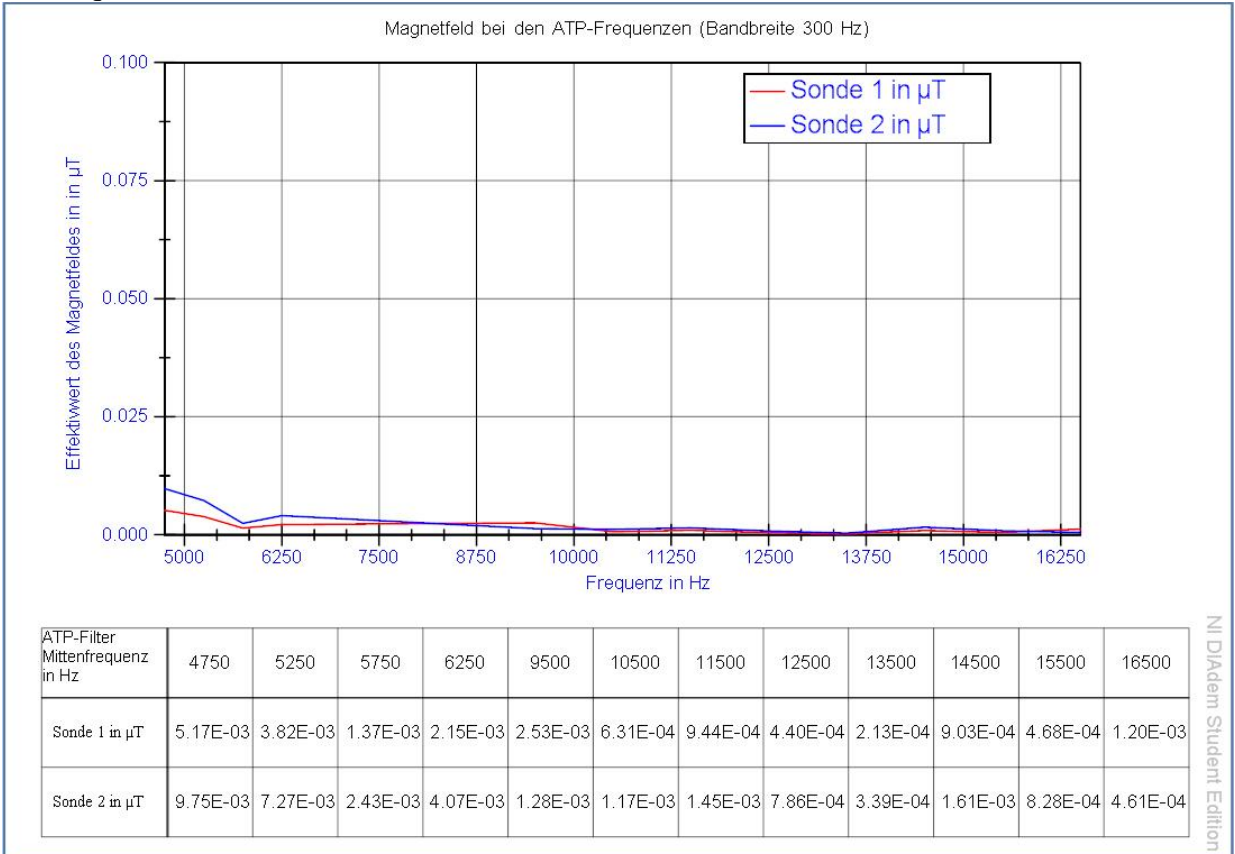
NI D/A-DEM Student Edition



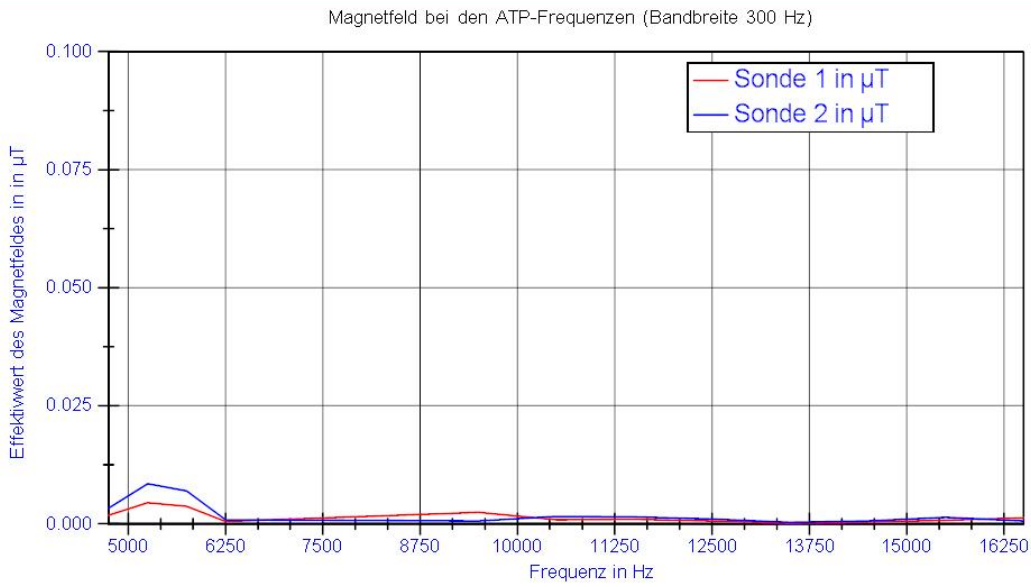
NI D/A-DEM Student Edition



Statorfrequenz 56 Hz; Sonde 1 = MP 18; Sonde 2 = MP 17

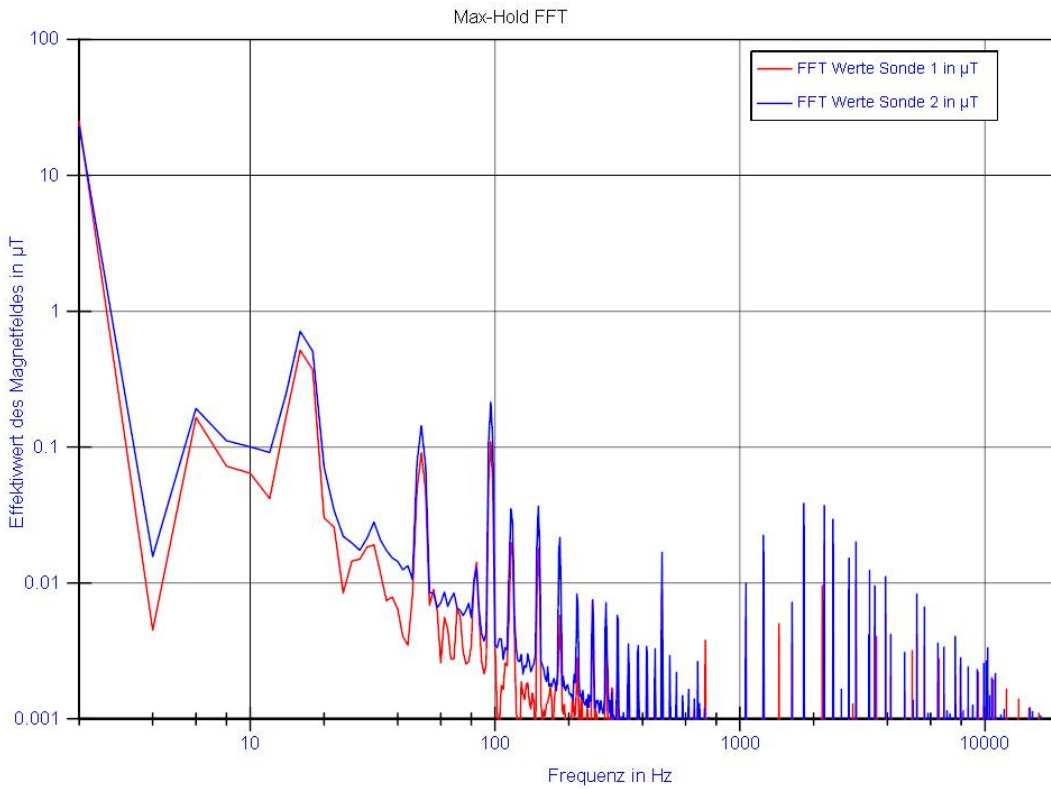


Statorfrequenz 96 Hz; Sonde 1 = MP 18; Sonde 2 = MP 17



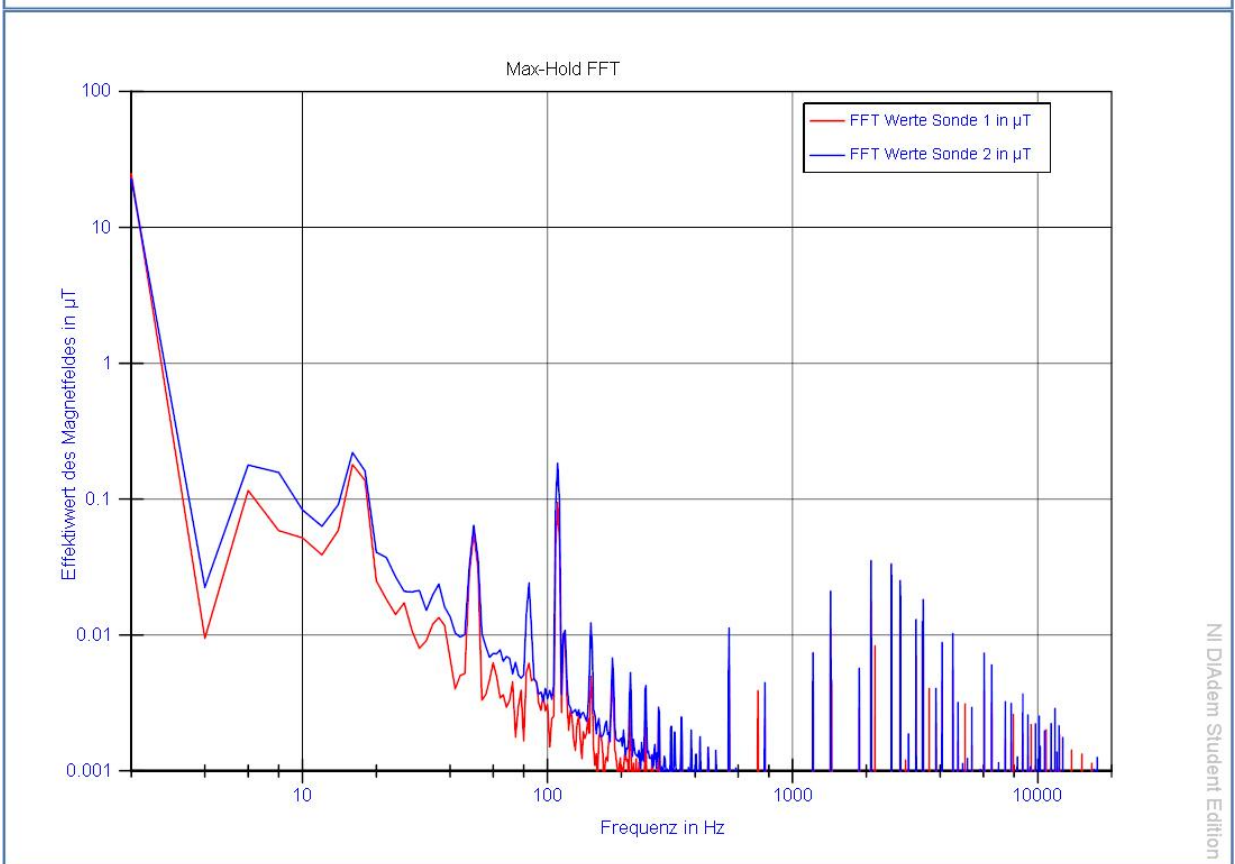
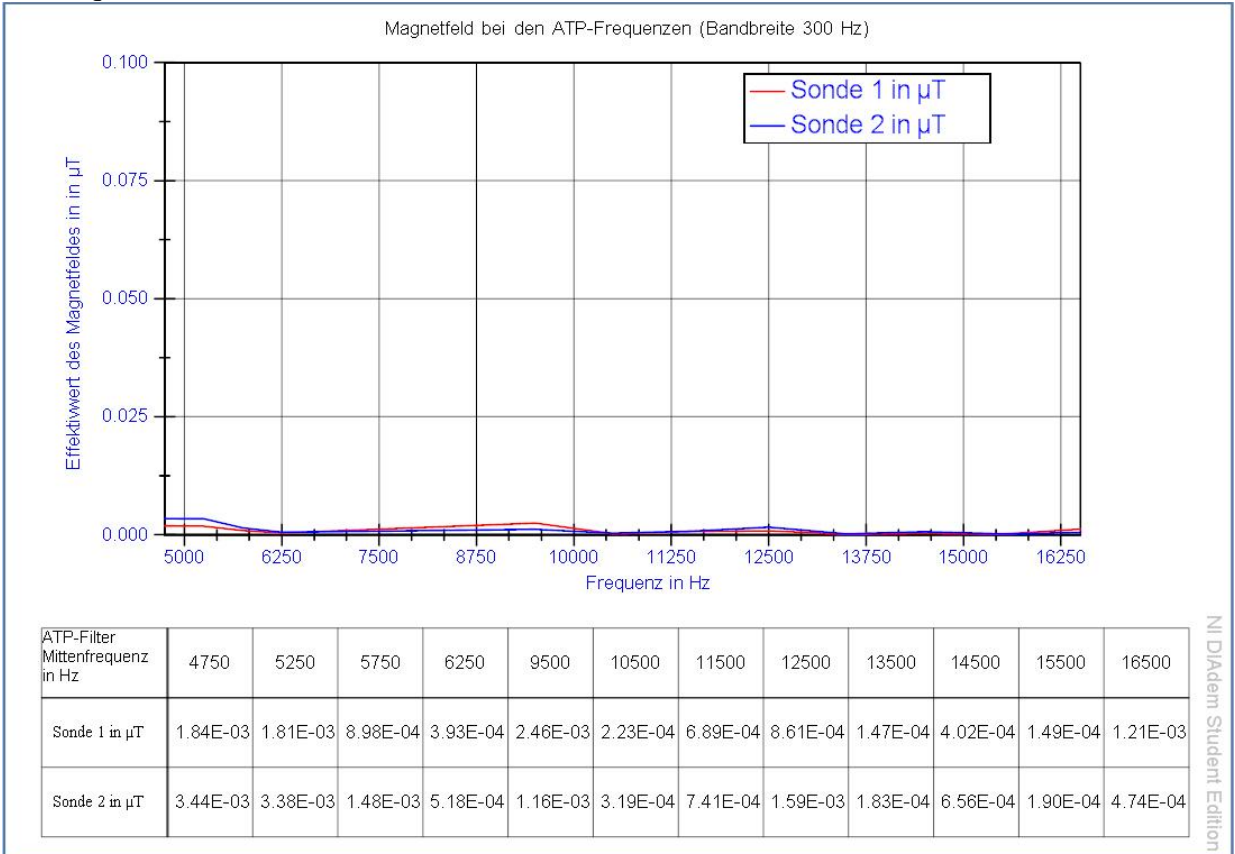
ATP-Filter Mittenfrequenz in Hz	4750	5250	5750	6250	9500	10500	11500	12500	13500	14500	15500	16500
Sonde 1 in µT	1.79E-03	4.46E-03	3.71E-03	5.06E-04	2.42E-03	8.35E-04	9.57E-04	5.61E-04	1.94E-04	3.80E-04	7.38E-04	1.24E-03
Sonde 2 in µT	3.33E-03	8.49E-03	6.96E-03	8.25E-04	5.63E-04	1.53E-03	1.47E-03	1.00E-03	2.80E-04	5.92E-04	1.37E-03	6.05E-04

NI D/Adem Student Edition

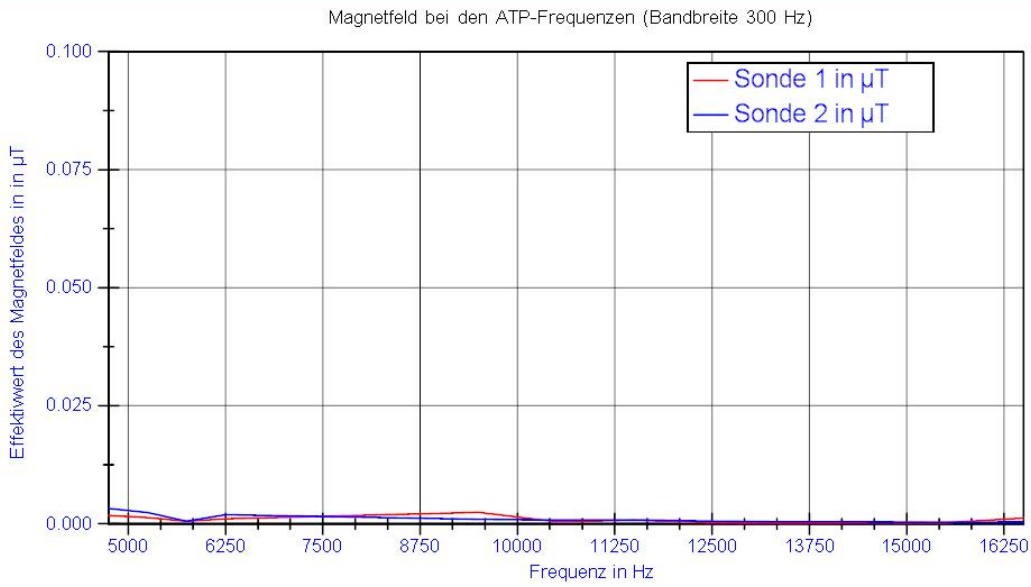


NI D/Adem Student Edition

Statorfrequenz 110 Hz; Sonde 1 = MP 18; Sonde 2 = MP 17

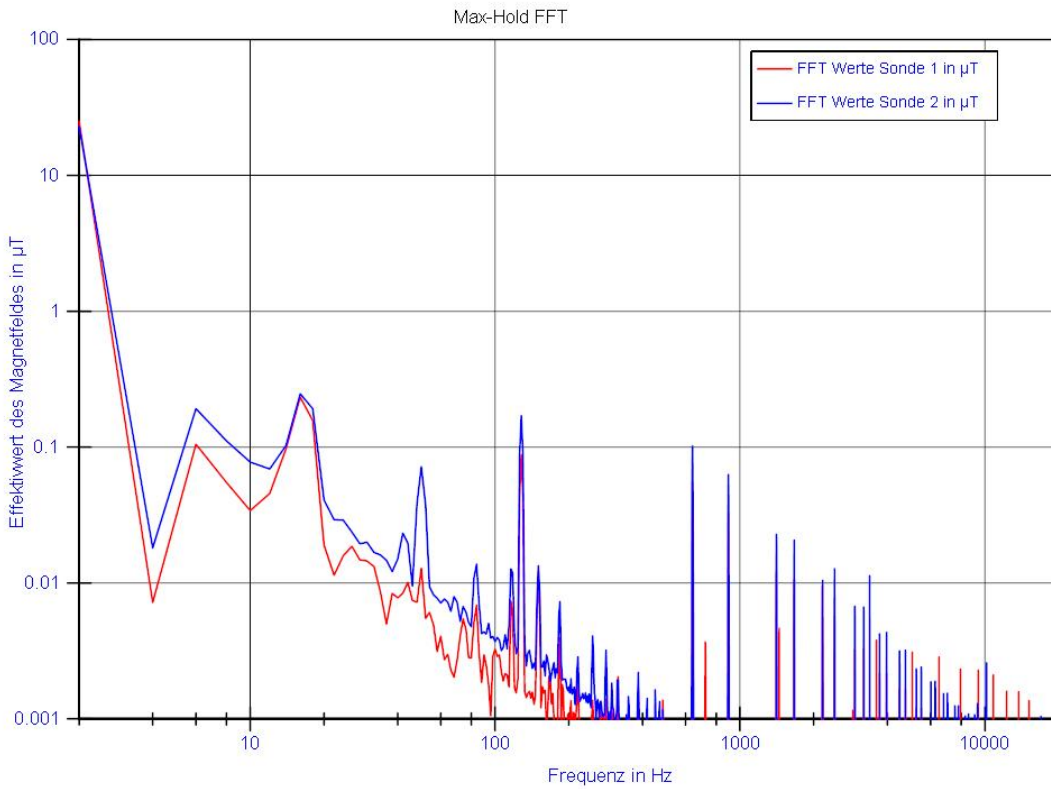


Statorfrequenz 128 Hz; Sonde 1 = MP 18; Sonde 2 = MP 17



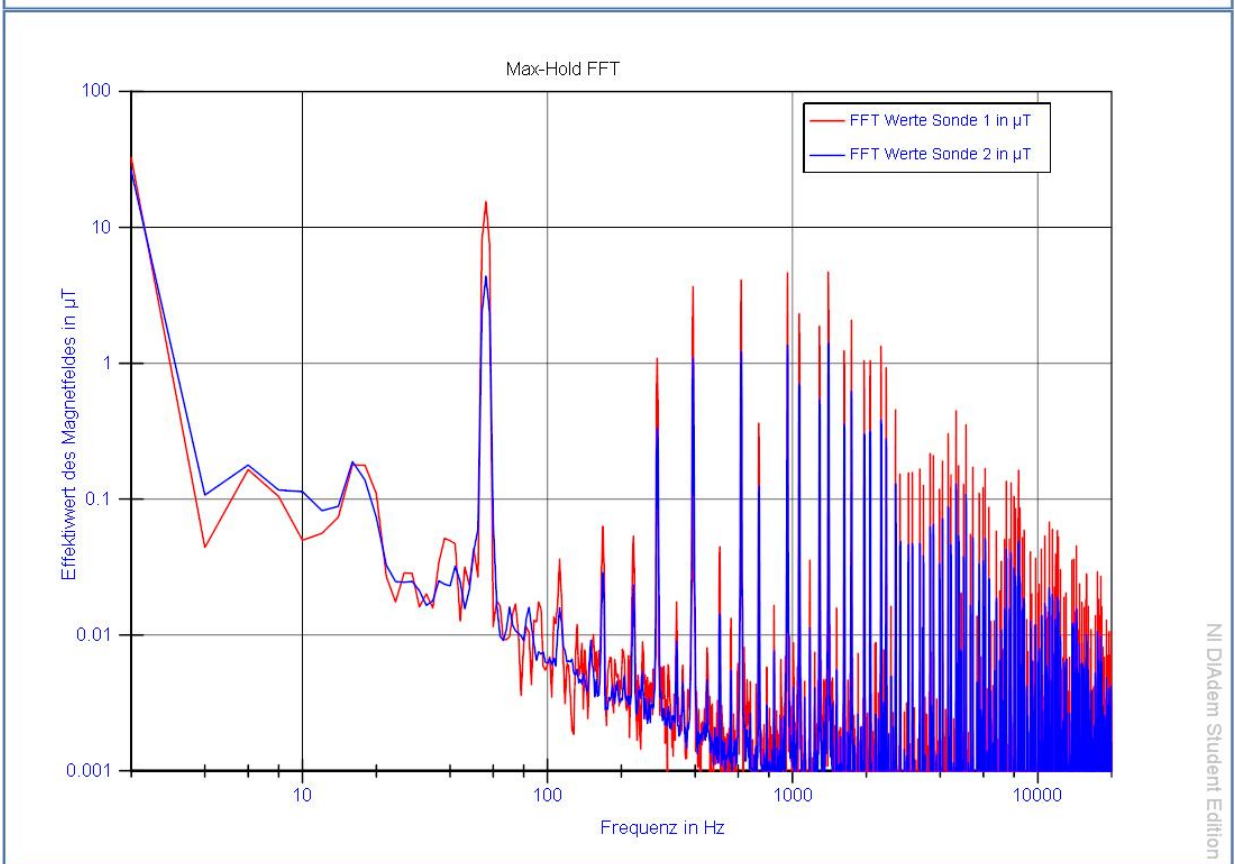
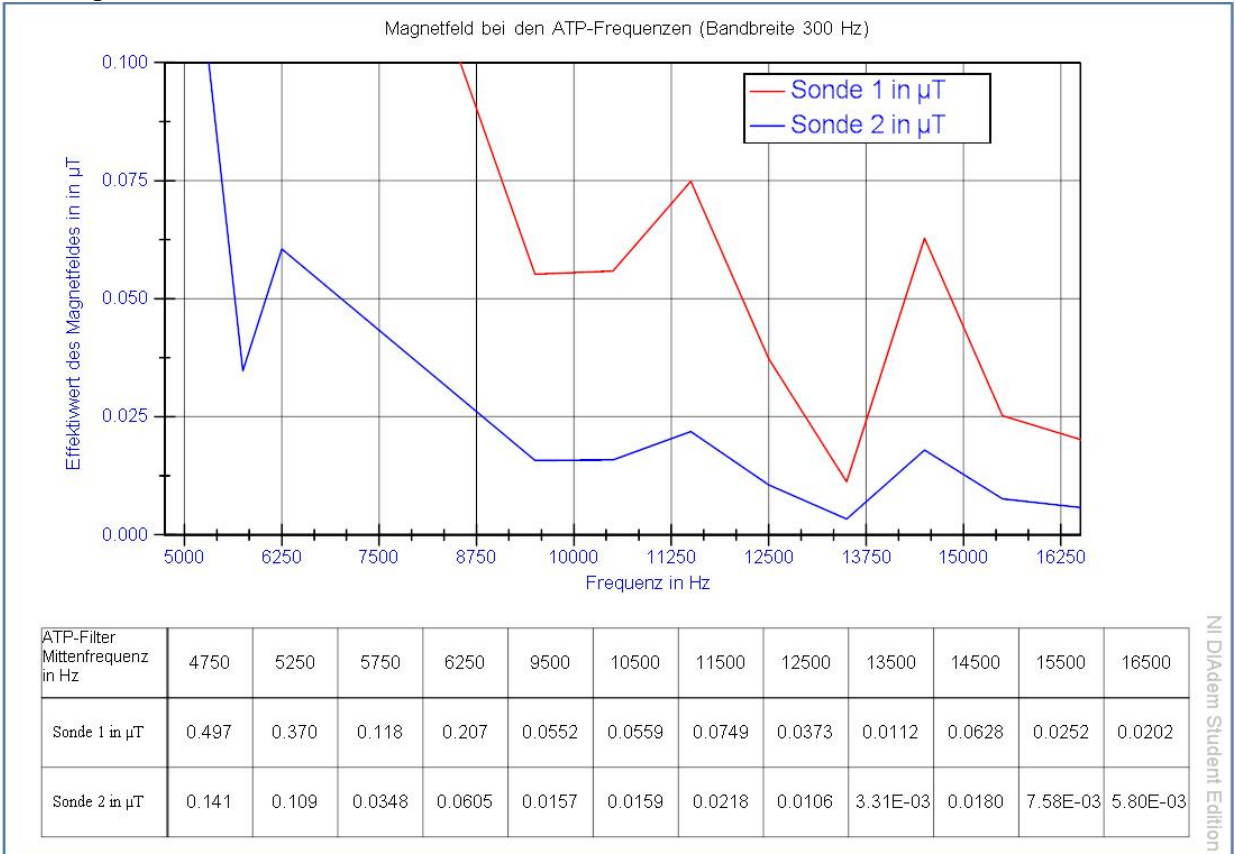
ATP-Filter Mittenfrequenz in Hz	4750	5250	5750	6250	9500	10500	11500	12500	13500	14500	15500	16500
Sonde 1 in µT	1.75E-03	1.31E-03	5.17E-04	1.05E-03	2.42E-03	4.51E-04	7.13E-04	3.04E-04	2.34E-04	2.89E-04	2.13E-04	1.19E-03
Sonde 2 in µT	3.25E-03	2.37E-03	5.14E-04	1.92E-03	9.23E-04	8.05E-04	8.53E-04	5.30E-04	3.68E-04	3.90E-04	3.51E-04	3.70E-04

NI D/Adem Student Edition



NI D/Adem Student Edition

Statorfrequenz 56 Hz; Sonde 1 = MP 5; Sonde 2 = MP 6



AC-Magnetfeld (Effektivwert) ATP-Band bei Motorfluss: <b>100 %</b>				
	Effektivwert des Magnetfeldes innerhalb der ATP-Filterbandbreite in nT			
Betriebspunkt	10 Hz			
Messpunkt	5	6	17	18
ATP-Frequenz				
4750 Hz			15,1	8,0
5250 Hz			0,4	0,4
5750 Hz			3,1	1,6
6250 Hz			6,7	3,6
9500 Hz			3,5	3,0
10500 Hz			3,0	1,6
11500 Hz			0,3	0,6
12500 Hz			0,2	0,2
13500 Hz			2,0	1,1
14500 Hz			1,2	0,7
15500 Hz			0,1	0,1
16500 Hz			0,2	1,2

**Tabelle 10-7: Messergebnisse ATP-Bänder, f=10Hz, Traktionsmotor DC, 100% Motorfluss**

AC-Magnetfeld (Effektivwert) ATP-Band bei Motorfluss: <b>100 %</b>				
	Effektivwert des Magnetfeldes innerhalb der ATP-Filterbandbreite in nT			
Betriebspunkt	56 Hz			
Messpunkt	5	6	17	18
ATP-Frequenz				
4750 Hz	497	141	9,8	5,2
5250 Hz	370	109	7,3	3,8
5750 Hz	118	34,8	2,4	1,4
6250 Hz	207	60,5	4,1	2,2
9500 Hz	55,2	15,7	1,3	2,5
10500 Hz	55,9	15,9	1,2	0,6
11500 Hz	74,9	21,8	1,5	0,9
12500 Hz	37,3	10,6	0,8	0,4
13500 Hz	11,2	3,3	0,3	0,2
14500 Hz	62,8	18,0	1,6	0,9
15500 Hz	25,2	7,6	0,8	0,5
16500 Hz	20,2	5,8	0,5	1,2

**Tabelle 10-8: Messergebnisse ATP-Bänder, f=56Hz, Traktionsmotor DC, 100% Motorfluss**

AC-Magnetfeld (Effektivwert) ATP-Band bei Motorfluss: <b>100 %</b>				
	Effektivwert des Magnetfeldes innerhalb der ATP-Filterbandbreite in nT			
Betriebspunkt	96 Hz			
Messpunkt	5	6	17	18
ATP-Frequenz				
4750 Hz			3,3	1,8
5250 Hz			8,5	4,5
5750 Hz			7,0	3,7
6250 Hz			0,8	0,5
9500 Hz			0,6	2,4
10500 Hz			1,5	0,8
11500 Hz			1,5	1,0
12500 Hz			1,0	0,6
13500 Hz			0,3	0,2
14500 Hz			0,6	0,4
15500 Hz			1,4	0,7
16500 Hz			0,6	1,2

**Tabelle 10-9: Messergebnisse ATP-Bänder, f=96Hz, Traktionsmotor DC, 100% Motorfluss**

AC-Magnetfeld (Effektivwert) ATP-Band bei Motorfluss: <b>100 %</b>				
	Effektivwert des Magnetfeldes innerhalb der ATP-Filterbandbreite in nT			
Betriebspunkt	110 Hz			
Messpunkt	5	6	17	18
ATP-Frequenz				
4750 Hz			3,4	1,8
5250 Hz			3,4	1,8
5750 Hz			1,5	0,9
6250 Hz			0,5	0,4
9500 Hz			1,2	2,5
10500 Hz			0,3	0,2
11500 Hz			0,7	0,7
12500 Hz			1,6	0,9
13500 Hz			0,2	0,1
14500 Hz			0,7	0,4
15500 Hz			0,2	0,1
16500 Hz			0,5	1,2

**Tabelle 10-10: Messergebnisse ATP-Bänder, f=110Hz, Traktionsmotor DC, 100% Motorfluss**

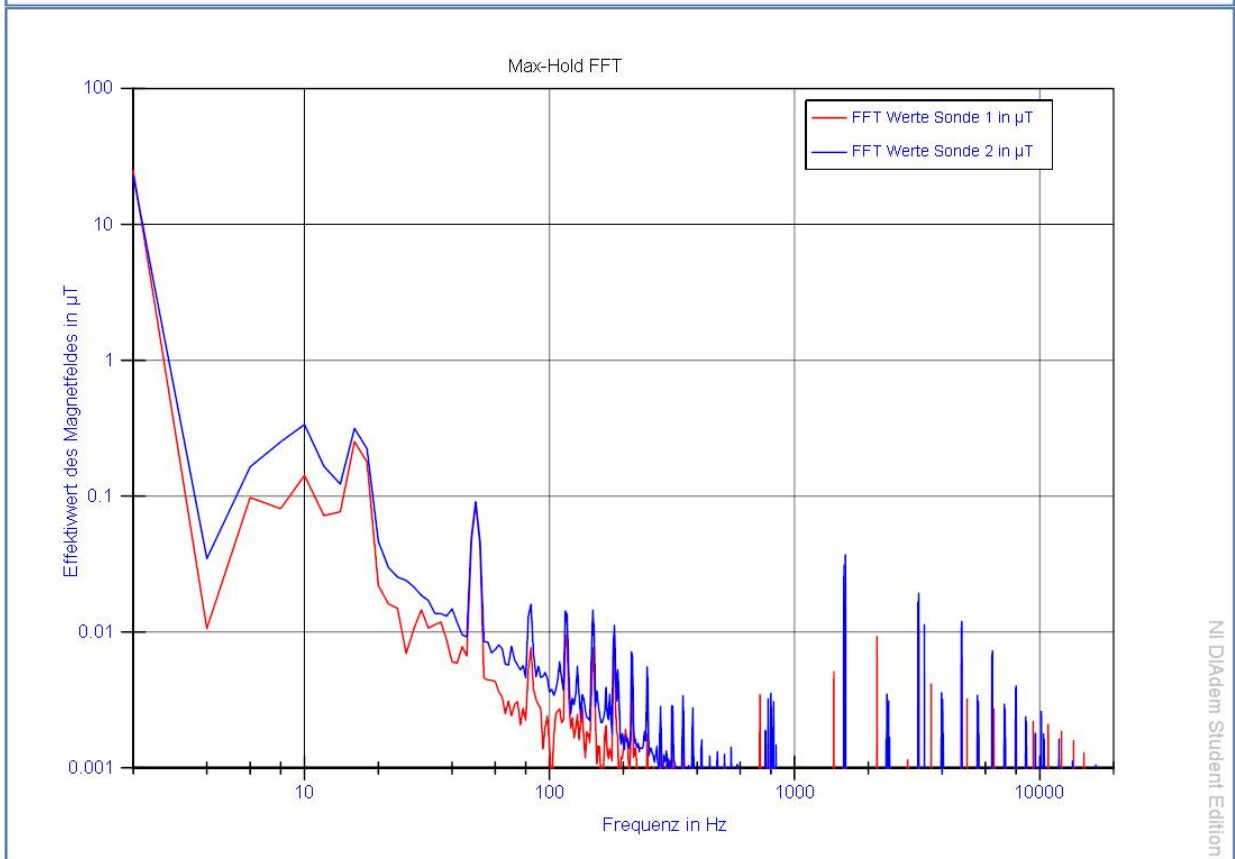
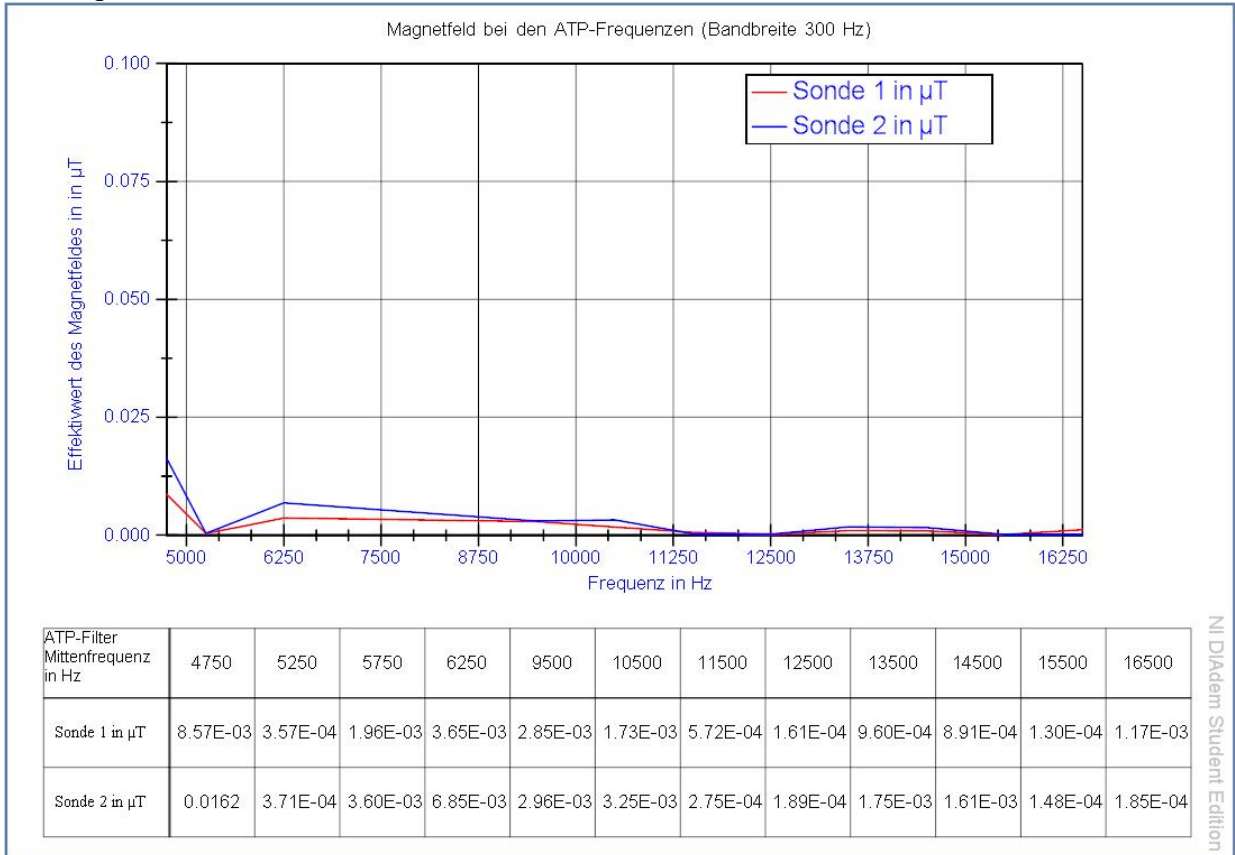
AC-Magnetfeld (Effektivwert) ATP-Band bei Motorfluss: <b>100 %</b>				
	Effektivwert des Magnetfeldes innerhalb der ATP-Filterbandbreite in nT			
Betriebspunkt	128 Hz			
Messpunkt	5	6	17	18
ATP-Frequenz				
4750 Hz			3,3	1,8
5250 Hz			2,4	1,3
5750 Hz			0,5	0,5
6250 Hz			1,9	1,1
9500 Hz			0,9	2,4
10500 Hz			0,8	0,5
11500 Hz			0,9	0,7
12500 Hz			0,5	0,3
13500 Hz			0,4	0,2
14500 Hz			0,4	0,3
15500 Hz			0,4	0,2
16500 Hz			0,4	1,2

**Tabelle 10-11: Messergebnisse ATP-Bänder, f=128Hz, Traktionsmotor DC, 100% Motorfluss**

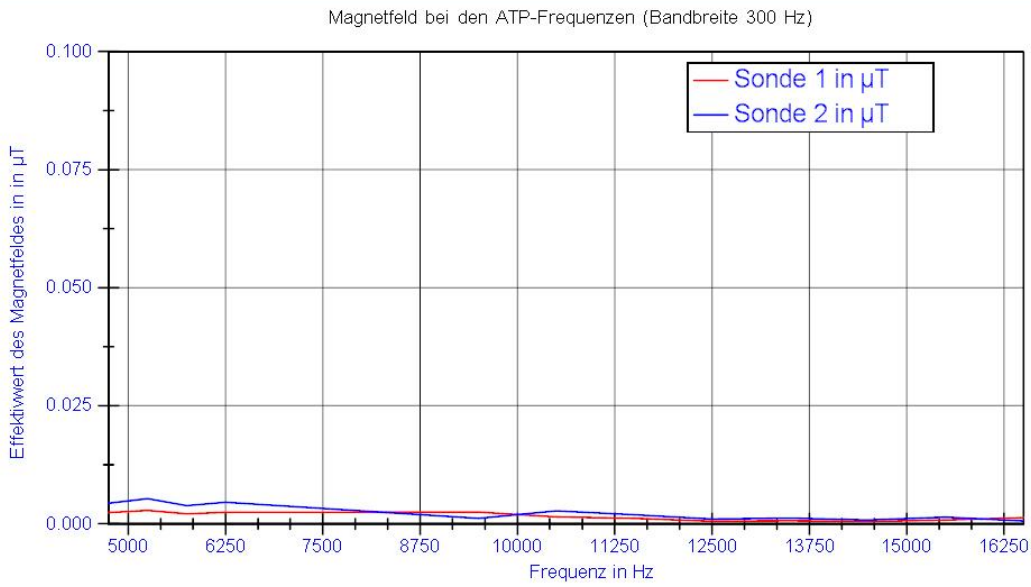


**Bei 110 % Motorfluss:**

Statorfrequenz 10 Hz; Sonde 1 = MP 18; Sonde 2 = MP 17

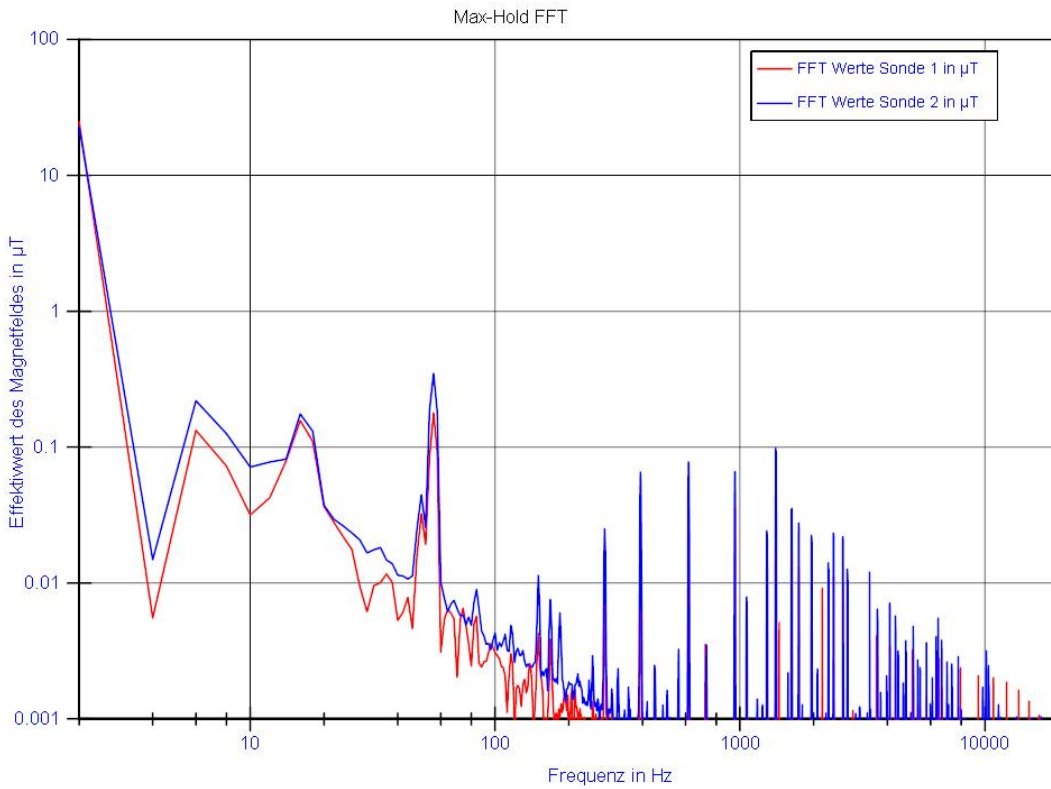


Statorfrequenz 56 Hz; Sonde 1 = MP 18; Sonde 2 = MP 17



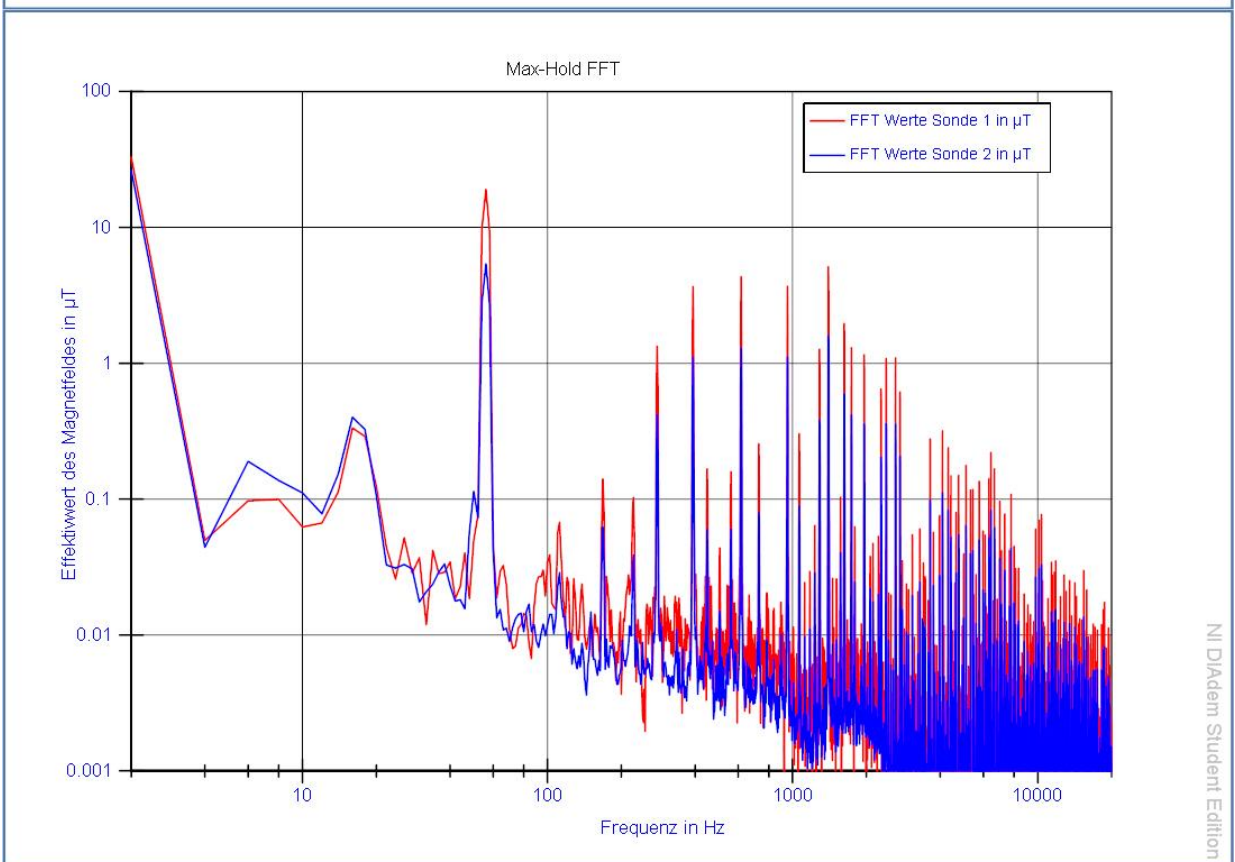
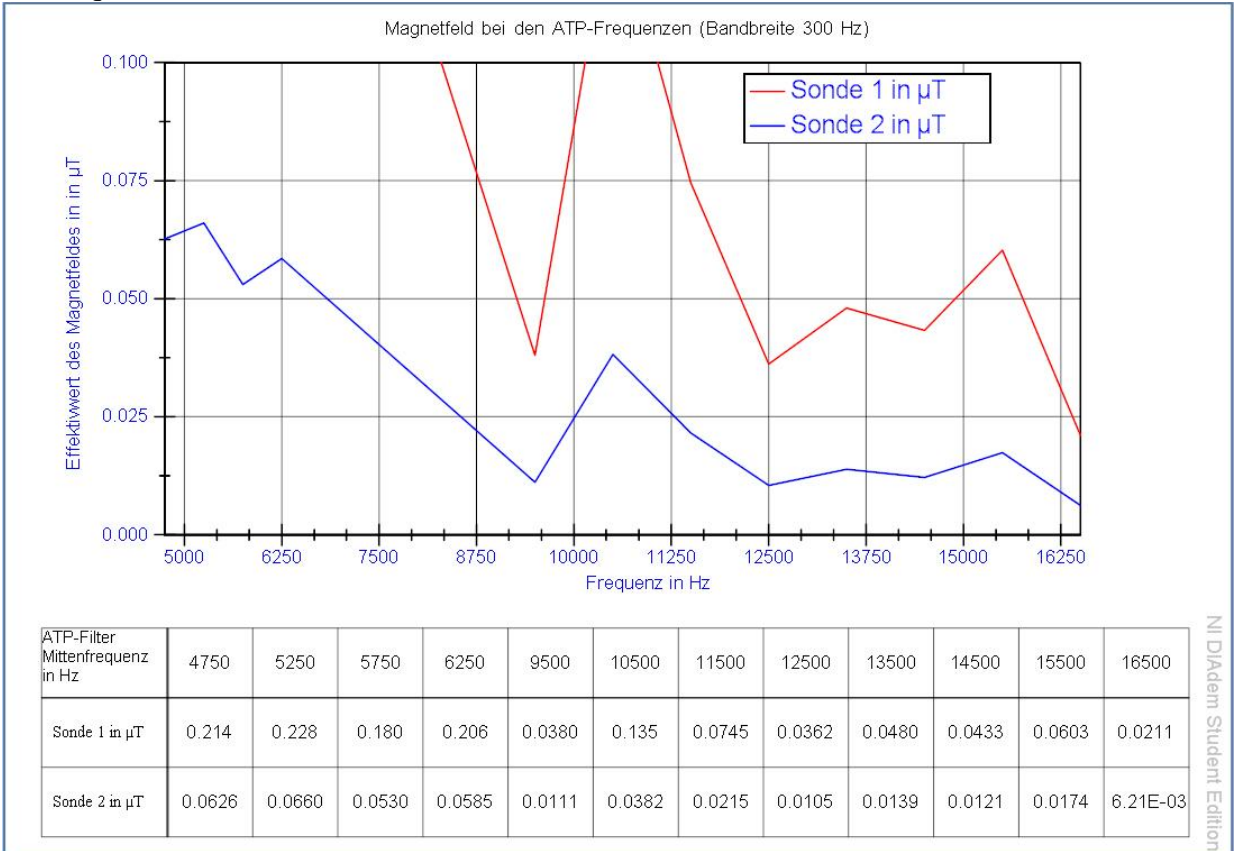
ATP-Filter Mittenfrequenz in Hz	4750	5250	5750	6250	9500	10500	11500	12500	13500	14500	15500	16500
Sonde 1 in µT	2.35E-03	2.82E-03	2.09E-03	2.43E-03	2.46E-03	1.43E-03	1.17E-03	5.43E-04	6.41E-04	4.62E-04	7.76E-04	1.29E-03
Sonde 2 in µT	4.35E-03	5.30E-03	3.84E-03	4.57E-03	1.13E-03	2.70E-03	1.93E-03	1.00E-03	1.18E-03	8.02E-04	1.42E-03	5.60E-04

NI D/Adem Student Edition



NI D/Adem Student Edition

Statorfrequenz 56 Hz; Sonde 1 = MP 5; Sonde 2 = MP 6



AC-Magnetfeld (Effektivwert) ATP-Band bei Motorfluss: <b>110 %</b>				
	Effektivwert des Magnetfeldes innerhalb der ATP-Filterbandbreite in nT			
Betriebspunkt	10 Hz			
Messpunkt	5	6	17	18
ATP-Frequenz				
4750 Hz			16,2	8,6
5250 Hz			0,4	0,4
5750 Hz			3,6	2,0
6250 Hz			6,9	3,7
9500 Hz			3,0	2,9
10500 Hz			3,3	1,7
11500 Hz			0,3	0,6
12500 Hz			0,2	0,2
13500 Hz			1,8	1,0
14500 Hz			1,6	0,9
15500 Hz			0,1	0,1
16500 Hz			0,2	1,2

Tabelle 10-12: Messergebnisse ATP-Bänder, f=10Hz, Traktionsmotor DC, 110% Motorfluss

AC-Magnetfeld (Effektivwert) ATP-Band bei Motorfluss: <b>110 %</b>				
	Effektivwert des Magnetfeldes innerhalb der ATP-Filterbandbreite in nT			
Betriebspunkt	56 Hz			
Messpunkt	5	6	17	18
ATP-Frequenz				
4750 Hz	214	62,6	4,4	2,4
5250 Hz	228	66,0	5,3	2,8
5750 Hz	180	53,0	3,8	2,1
6250 Hz	206	58,5	4,6	2,4
9500 Hz	38,0	11,1	1,1	2,5
10500 Hz	135	38,2	2,7	1,4
11500 Hz	74,5	21,5	1,9	1,2
12500 Hz	36,2	10,5	1,0	0,5
13500 Hz	48,0	13,9	1,2	0,6
14500 Hz	43,3	12,1	0,8	0,5
15500 Hz	60,3	17,4	1,4	0,8
16500 Hz	21,1	6,2	0,6	1,3

Tabelle 10-13: Messergebnisse ATP-Bänder, f=56Hz, Traktionsmotor DC, 110% Motorfluss

#### 10.1.1.6.4 Grundschiebungswerte von Motor-Phasenstrom und verketteter Motorspannung

Da ursprünglich eine Hochrechnung der Felder proportional den entsprechenden Strömen angedacht war, wurden die Phasenströme und die Außenleiterspannung gemessen. Die Tabelle 10-14 zeigt die gemessenen Grundschiebungswerte und Spannungen.

Effektivwerte der Grundschiebungen			
Motorfrequenz	Motorfluss	$I_{\text{Motor}}$ in A	$U_{\text{Motor}}$ in V
1 Hz	100%	12,5	9,4
	110%	18,2	10,5
10 Hz	100%	148,0	85,4
	110%	179,4	93,5
56 Hz	100%	147,9	478,7
	110%	181,7	526
96 Hz	100%	107,0	656
	110%		
110 Hz	100%	91,1	653
	110%		
128 Hz	100%	83,1	705
	110%		

Tabelle 10-14: Motorströme und –Spannungen, Traktionsmotor DC

#### 10.1.1.7 Zusammenfassung

Die für den Motor spezifizierten Magnetfeldgrenzwerte werden eingehalten.

## 10.1.2 Traktionsmotor AC-Fahrzeug

Messung nach Spezifikation in Kapitel 7.2.1

### 10.1.2.1 Grund der Messung

Die Messung dient zur Erfassung des Motormagnetfeldes im Leerlauf und gleichzeitig zur Feststellung der Einhaltung der in der Motorspezifikation enthaltenen Grenzwerte.

### 10.1.2.2 Messequipment

#### 10.1.2.2.1 Feldmessung

Es wird ein Magnetfeldmessgerät nach EN 50500 eingesetzt.

Geräteart	Typ/Modell	Hersteller
Chassis	PXI 1033	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
AC-Feld-Erfassung	50.20.1	ETR
AC-Feld-Erfassung	50.20.2	ETR
DC-Feld-Erfassung	880	Wuntronic
DC-Feld-Erfassung	881	Wuntronic
Laptop	Celsius H700	Fujitsu/Siemens

DC-Feld:

Aus den drei Richtungskomponenten des DC-Feldes wird der Feldvektor gebildet.  
Das Messgerät liefert einen DC-Messwert in  $\mu\text{T}$ .

AC-Feld:

Die Auswertung basiert auf einer FFT des gemessenen zeitlichen Verlaufs.

FFT Parameter:

Fenster-Funktion: ..... Hanning

Messzeit: ..... 500 ms

Sampling Frequenz: ..... 49152 Hz

Aus den drei Richtungskomponenten des AC-Feldes wird der Feldvektor ohne Berücksichtigung der Phasenverschiebung gebildet (= Worst Case).

Die mit dem Grenzwert bewerteten Spektralkomponenten der FFT werden linear summiert (entsprechend EN 50500 werden Spektrallinien unter einem Wert von 10% des Grenzwertes nicht berücksichtigt).

Das Messgerät liefert einen Messwert in % des Grenzwertes der ICNIRP Richtlinie. Ein Auslesen der Induktionswerte (in  $\mu\text{T}$ ) für jede einzelne Frequenz ist ebenfalls möglich.

Es wird der zeitliche Verlauf des Feldes getrennt für jede Raumachse mit aufgezeichnet. Damit sind unterschiedlichste Offline-Auswertungen möglich.

**10.1.2.2.2 Motorstrom- und Motorspannungsmessung:**

Geräteart	Typ/Modell	Hersteller
Chassis	PXI 1033	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
Stromzange NF	CWT3LFXB	PEM
Differenz-Tastkopf	SI-9010	Yokogawa
Laptop	Celsius H700	Fujitsu/Siemens

Die Messung des Motorstromes und der Motorspannung (Außenleiterspannung) wird mit der Datenerfassungskarte (NI 4472 B) von National Instruments durchgeführt. Die 24 Bit Datenerfassungskarte wird mit einer Abtastfrequenz von 51200 Hz betrieben. Sie ist mit Antialiasing-Filtern ausgestattet, um Fehlmessungen durch Signale mit höheren Frequenzen zu verhindern.

Mit den gemessenen Daten wird eine Echtzeit-FFT mit folgenden Parametern durchgeführt:

- Hanning Fenster
- Frequenzabstand 2 Hz
- Max-Hold-Messung

Der zeitliche Verlauf des Stromes und der Spannung wird aufgezeichnet.

### 10.1.2.3 Grenzwerte

Folgende Grenzwerte wurden für das Motorfeld spezifiziert.

#### 10.1.2.3.1 Grenzwerte nach Motorspezifikation

Die angegebenen Messabstände beziehen sich auf den Abstand von der Motorgehäuseaußenwand.

##### DC-Feld

Gemessen in 30 cm Abstand: 1 mT

Gemessen in 40 cm Abstand: 0,5 mT

##### AC-Feld

Gemessen in 40 cm Abstand: ICNIRP-Grenzwerte (Public)

Gemessen in 40 cm Abstand: mit 5mm dicker Aluminiumplatte (1,25 m x 2,5 m) im Abstand von 20 cm zur Motorgehäuseaußenwand, Herzschrittmarker Grenzkurve entsprechend DIN VDE 848-4/A3 (=HSM-Grenzwert)

Gemessen in 40 cm Abstand: Grenzkurve entsprechend DIN VDE 848-4/A3 unter Berücksichtigung der Dämpfungsfaktoren (=HSM\_mod-Grenzwert).

#### Grenzwerte zur Verhinderung der Beeinflussung von fahrzeug- und wegseitigen Signalantennen

Gemessen in 50 cm Abstand:

Für jedes Frequenzband gilt folgender Grenzwert (siehe Beschreibung bei Formel 10):

$$100 \text{ nT} \geq \sqrt{\sum_{f_u}^{f_o} \left( \frac{i_{\text{Motor Nennfluss}}(f)}{i_{\text{Motor gemessen}}(f)} \cdot B_{\text{gemessen}}(f) \right)^2} \quad \text{Formel 13}$$

$f_o$ ..... obere Grenzfrequenz des Filterbandes

$f_u$ ..... untere Grenzfrequenz des Filterbandes

$i_{\text{Motor Nennfluss}}$ ..... Motorstrom-Frequenzkomponente bei Motor-Nennfluss

$i_{\text{Motor gemessen}}$ ..... gemessene Motorstrom-Frequenzkomponente bei reduziertem Motorfluss

$B_{\text{gemessen}}$ ..... gemessene magnetische Flussdichte bei reduziertem Motorfluss

Die Formel 13 dient dazu, die bei reduziertem Motorfluss gemessenen magnetischen Flussdichten auf die bei Motor-Nennfluss zu erwartenden Werte umzurechnen. Die quadratische Aufsummierung erfolgt zur Ermittlung des Gesamt-Effektivwertes der magnetischen Flussdichte über das Filterband.

Die Auswertung erfolgt offline.



Die zu messenden Frequenzbänder für die Signalantennen (Tabelle 10-15) sind:

Mittenfrequenz in Hz	Bandbreite in Hz
1700	300
2000	300
2300	300
2600	300

Tabelle 10-15: Frequenzbänder der Signalantennen

#### 10.1.2.4 Messanordnung

Der Motor war auf einer Holzunterkonstruktion montiert (Abbildung 10-8 und Abbildung 10-9), sodass seine Längsachse ca. 62,5 cm über dem Fußboden war. Der Motor war gegenüber der Einbaulage im Fahrzeug 90° um die Längsachse geneigt. Den schematischen Aufbau der Messanordnung zeigt Abbildung 10-6.

Es wird davon ausgegangen, dass keine die Messergebnisse nennenswerte Beeinflussung durch naheliegende, elektrisch und/oder magnetisch leitfähige, Materialien vorlag. Eine Umgebungsmessung des magnetischen Feldes zeigte sehr niedrige Feldstärken.

Die geschirmten Motorkabel wurden im rechten Winkel zur Motorlängsachse im Dreierbündel verlegt, um das Motorkabelfeld möglichst klein zu halten.

Auf der Seite der Motorverkabelung wurde das Feld aufgrund des Einflusses des Motorkabelfeldes nicht gemessen. Es wird angenommen, dass die Feldverteilung um den Motor in grober Näherung symmetrisch verläuft.

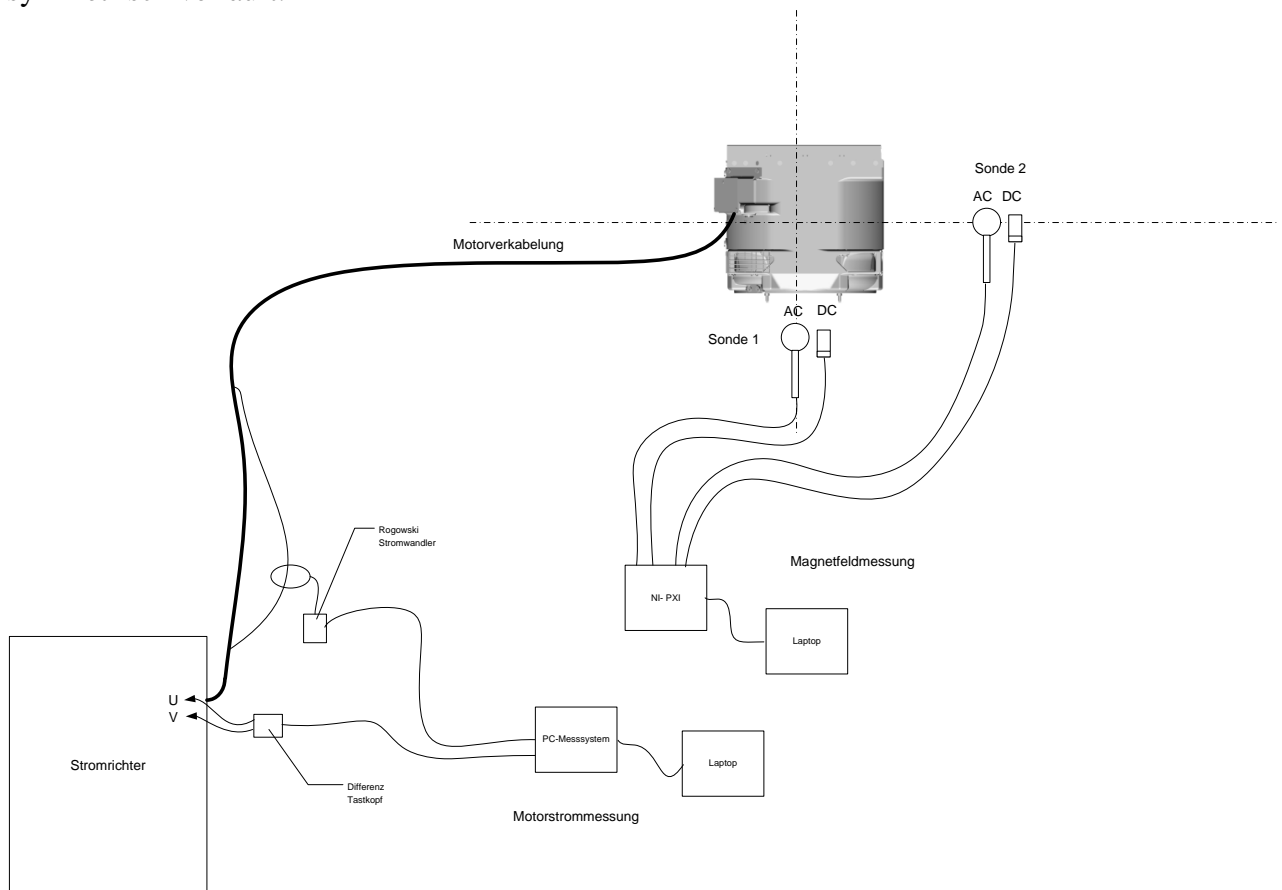


Abbildung 10-6: Messanordnung Traktionsmotor AC, gesamt



Abbildung 10-7: Messequipment, Traktionsmotor AC

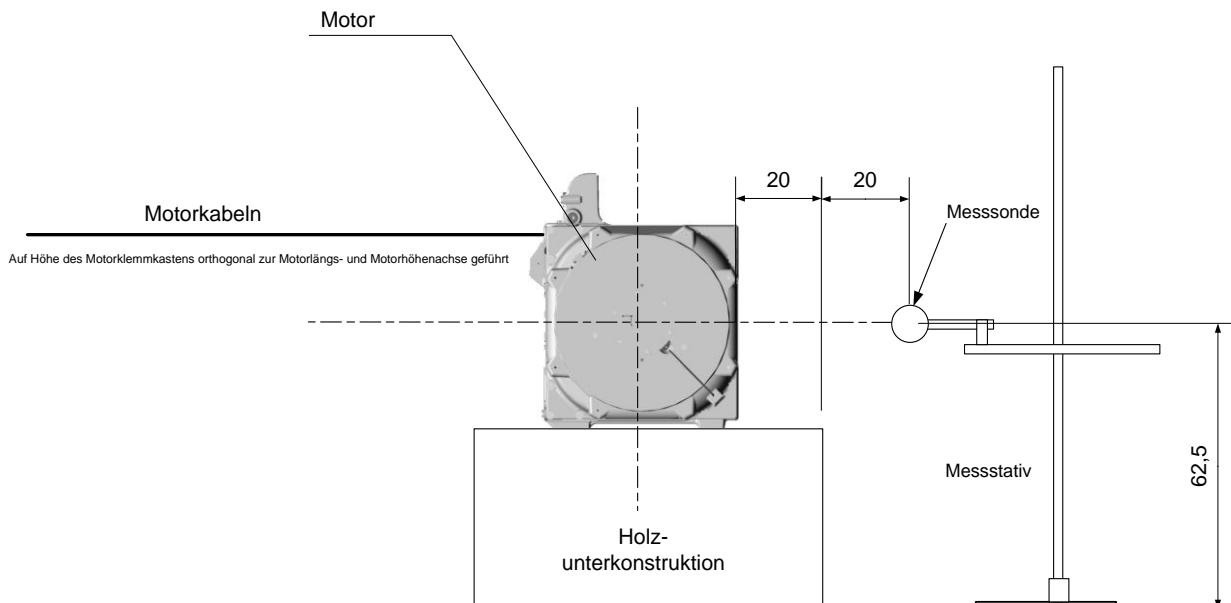


Abbildung 10-8: Messanordnung Traktionsmotor AC, generell

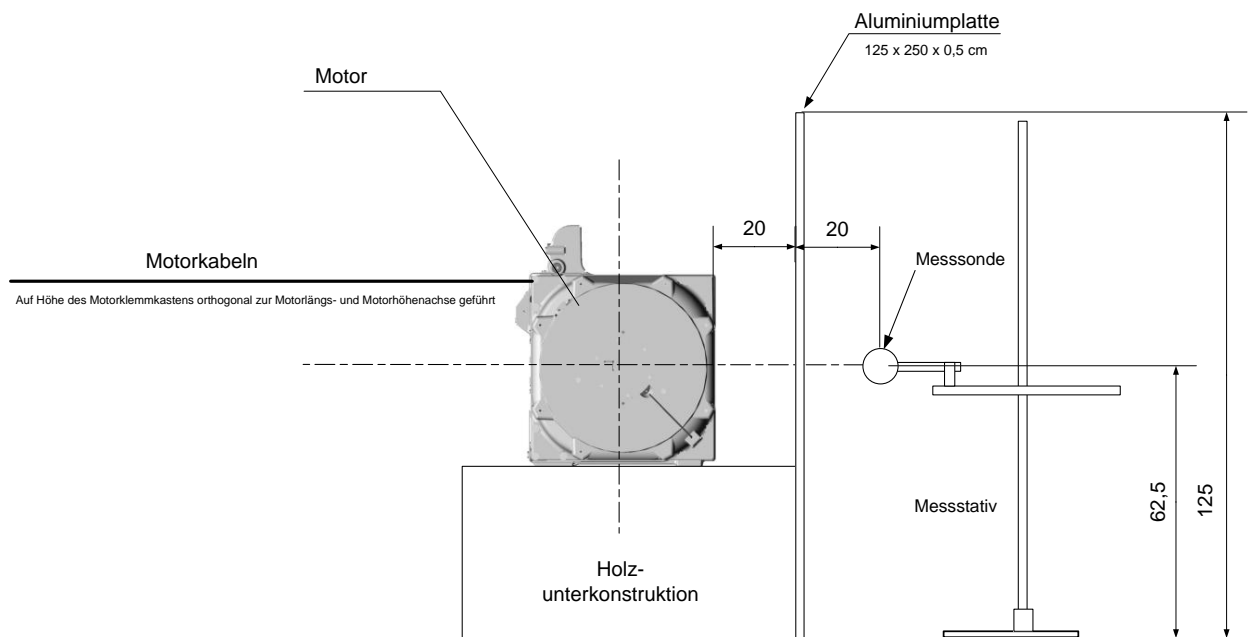


Abbildung 10-9: Messanordnung – Traktionsmotor AC (Herzschrittmachergrenzwert mit Alu – Schirmplatte)

### 10.1.2.5 Messpunkte

Die Messung ist an den Punkten entsprechend Abbildung 10-10 vorgesehen. Für die Verifikation der Motorspezifikation werden die MP 1,2,3,4,5 und MP 6 verwendet.

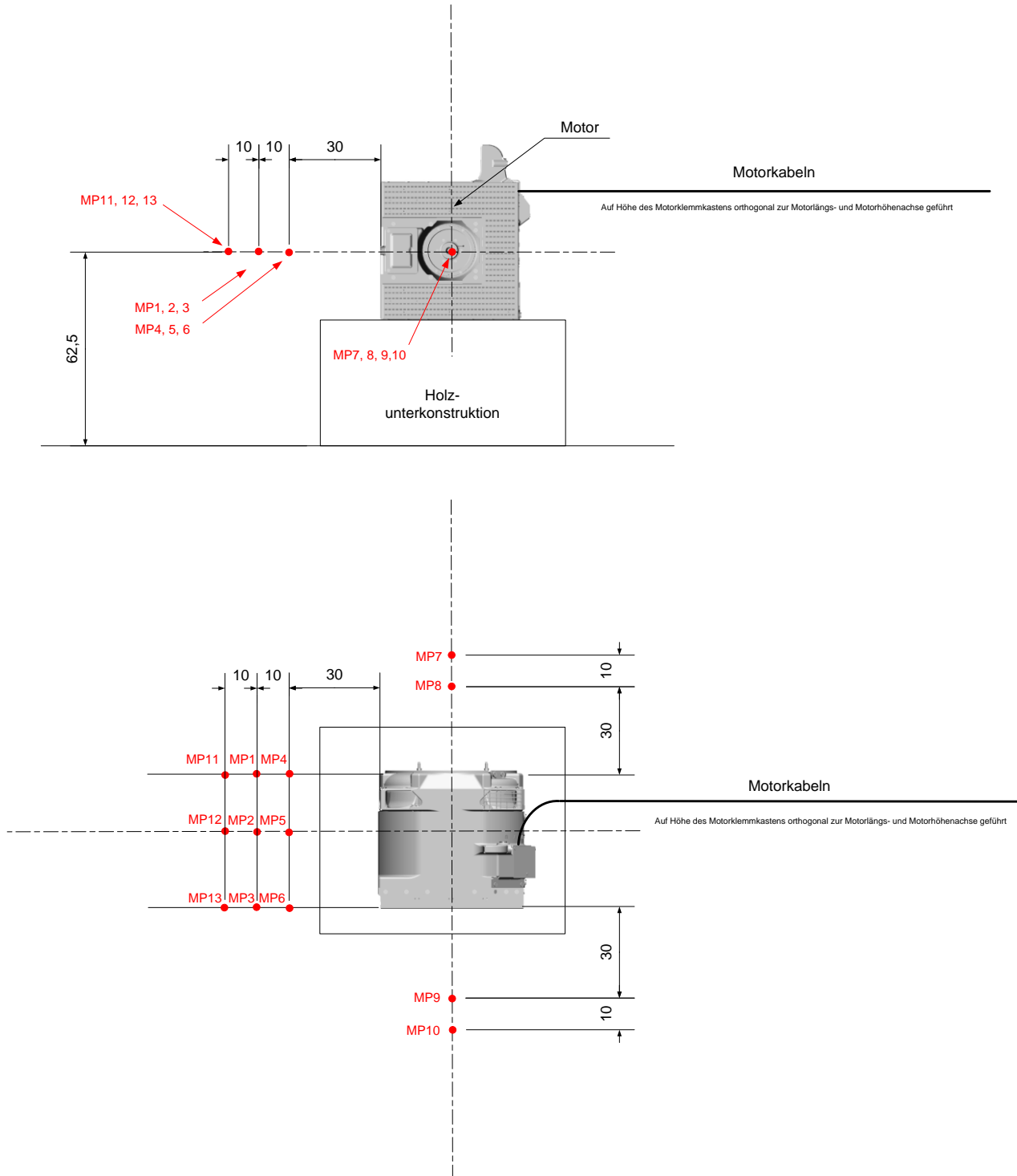


Abbildung 10-10: Messpunkte Traktionsmotor AC

## **10.1.2.6 Messung**

### ***10.1.2.6.1 Probleme***

Das Anwenderprogramm der Antriebssystemsoftware für dieses Projekt berücksichtigt bei Betrieb mit reduziertem Moment eine Motorfluss-Absenkung, die bis 70 Hz Statorfrequenz aktiv ist. Bei Betrieb im Leerlauf wurde deshalb mit stark reduziertem Motorfluss gearbeitet. Nach Deaktivierung der Motorfluss-Absenkung konnten nur mehr die MPe 1 bis 3 (relevant für die Bewertung der Motorspezifikation) gemessen werden.

Durch einen Vergleich der Messergebnisse an den MPen 1 bis 3 ohne und mit Motorfluss-Absenkung konnten die Werte der Grundschwingung entsprechend hochgerechnet werden. Für die Oberschwingungen konnte zwar eine Tendenz aber keine direkte Hochrechnung durchgeführt werden. Die Ergebnisse der ATP-Bewertung sind deshalb mit einer entsprechenden Unsicherheit verbunden. Da aber schon bei reduziertem Motorfluss erhebliche Überschreitungen festzustellen sind, sind Probleme in den angegebenen Frequenzbereichen zu erwarten.

Alle eingestellten Betriebspunkte waren nicht stabil. Zur Auswertung einiger Messergebnisse konnte deshalb nicht die aufgenommene Max-Hold-FFT verwendet werden. Die Ergebnisse der ATP-Filterwerte wurden über eine Messzeit von 0,5s ausgewertet.

### ***10.1.2.6.2 Messergebnisse***

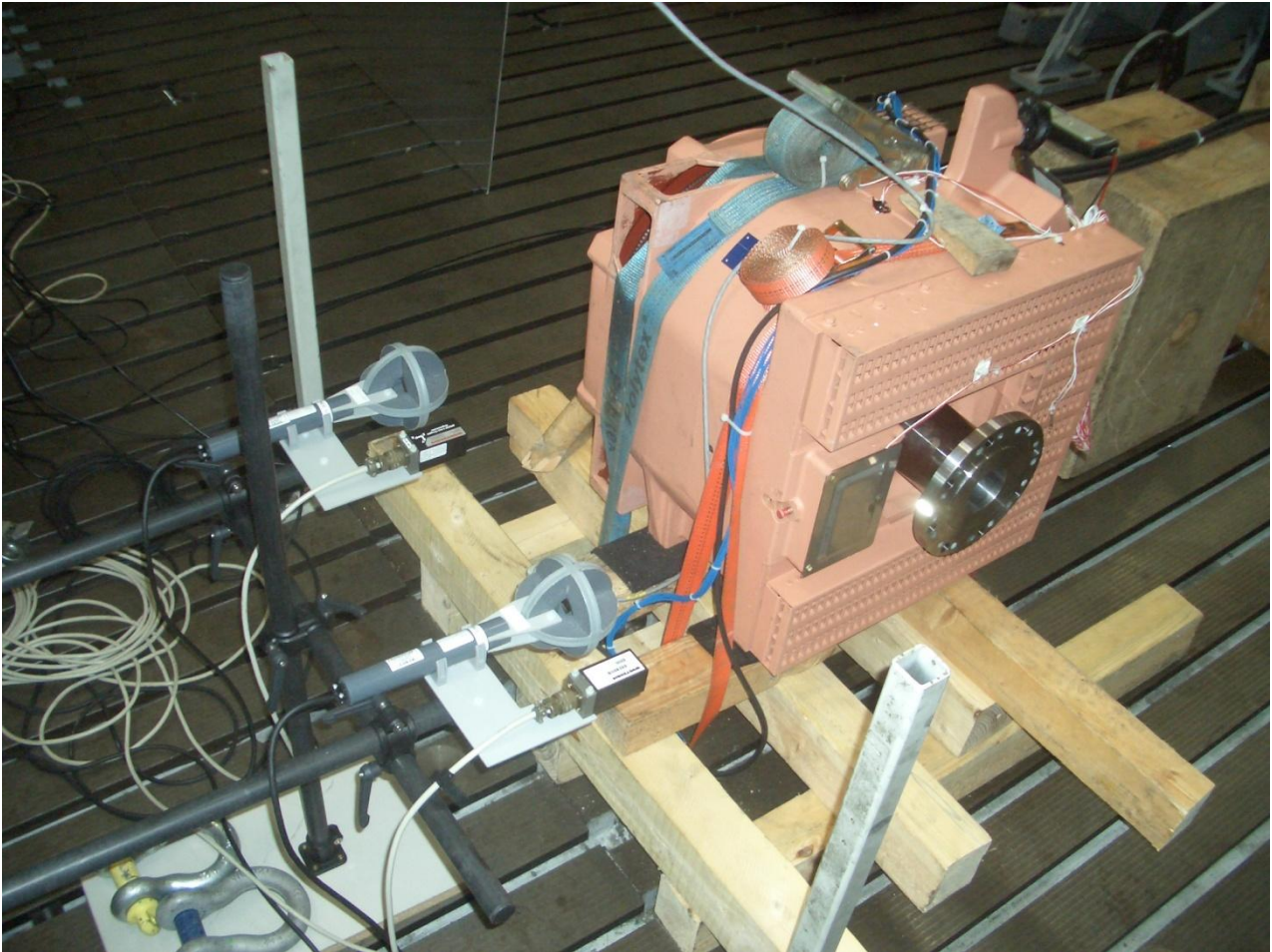
Die Taktfrequenz des Stromrichters beträgt 800 Hz. Der angedachte Betriebspunkt (0,5 Hz Statorfrequenz) für die Messung des DC-Magnetfeldes war sehr instabil, die Messwerte des DC-Magnetfeldes nur geringfügig über dem Wert des Erdmagnetfeldes, womit auf eine detaillierte Darstellung in Tabellenform verzichtet wird.

## Verifikation der Motorspezifikation

Abbildung 10-11 und Abbildung 10-12 zeigen die DC-Messung am Traktionsmotor des AC-Fahrzeuges.

Die Abbildung 10-13 und Abbildung 10-14 zeigen die AC-Messung am Traktionsmotor des AC-Fahrzeuges.

### *DC-Magnetfeld des Motors*



**Abbildung 10-11: Magnetfeldmessung DC, Traktionsmotor AC(1)**

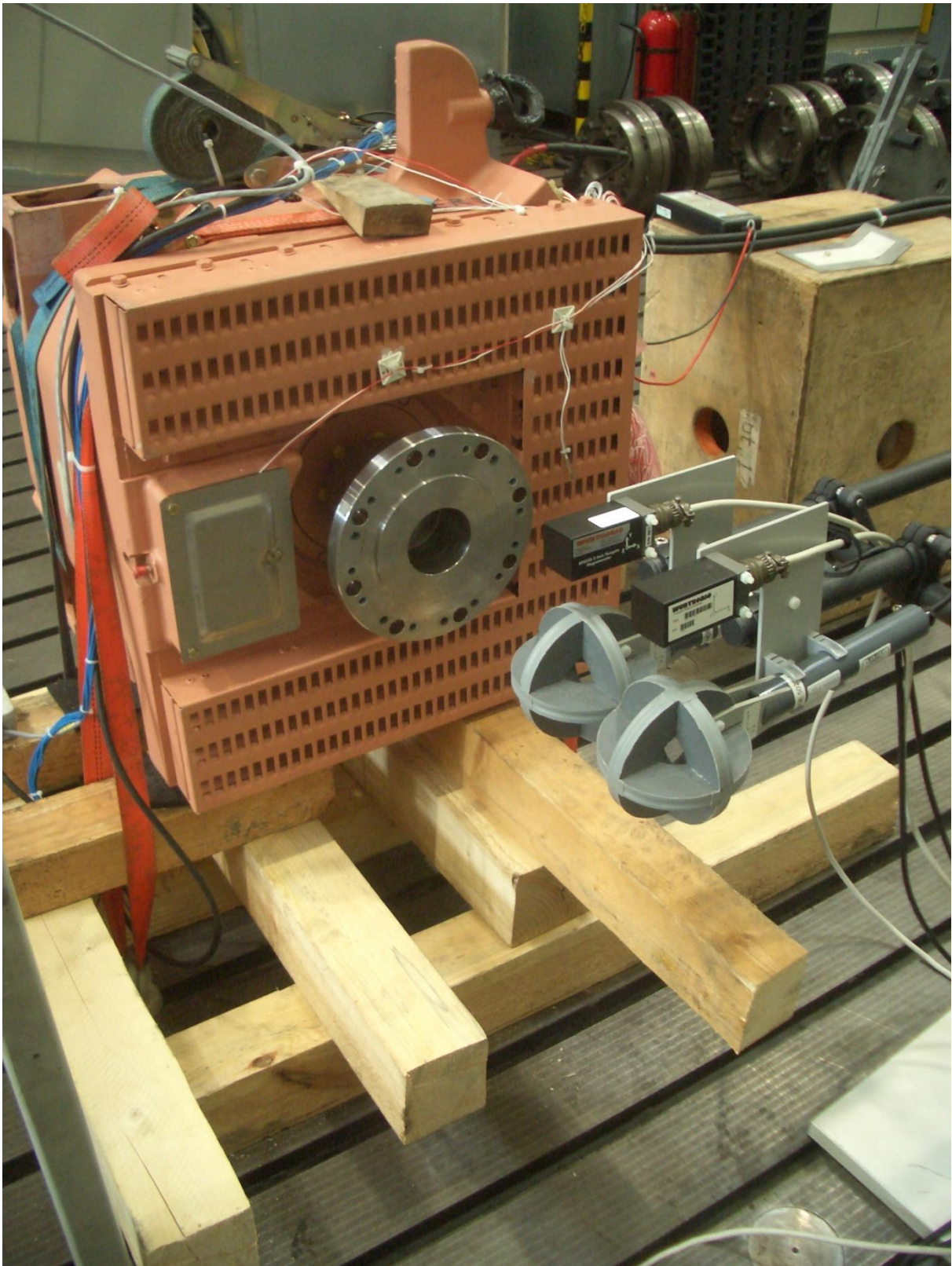
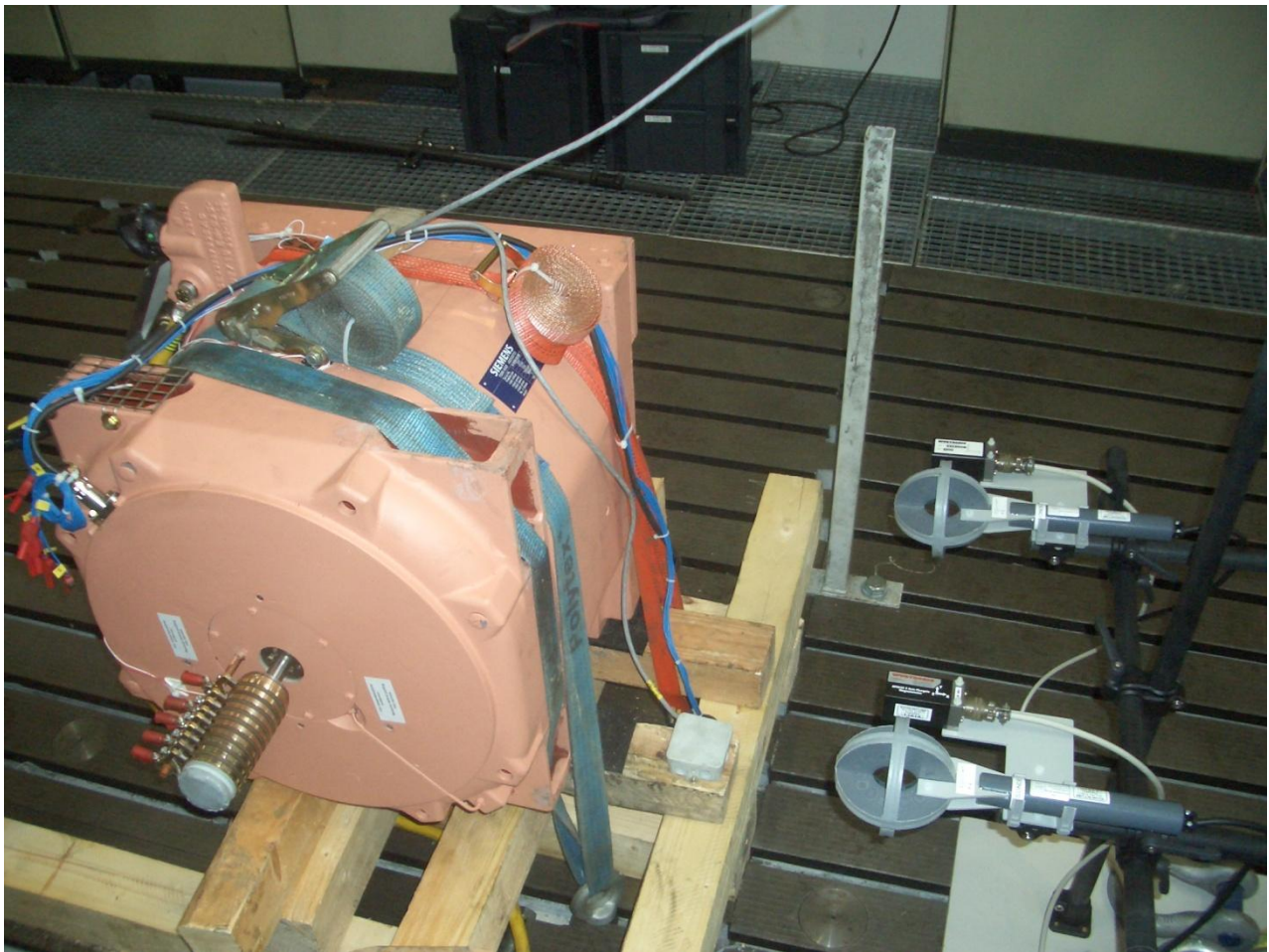


Abbildung 10-12: Magnetfeldmessung DC, Traktionsmotor AC(2)

Statorfrequenz in Hz	Grund für den Messpunkt	Motorfluss in %	Messpunkte	Messergebnis
< 1 Hz	DC-Feld		MP1 bis MP6	< 0,5 mT

*AC-Magnetfeld des Motors:*



**Abbildung 10-13: Magnetfeldmessung AC, Traktionsmotor AC**



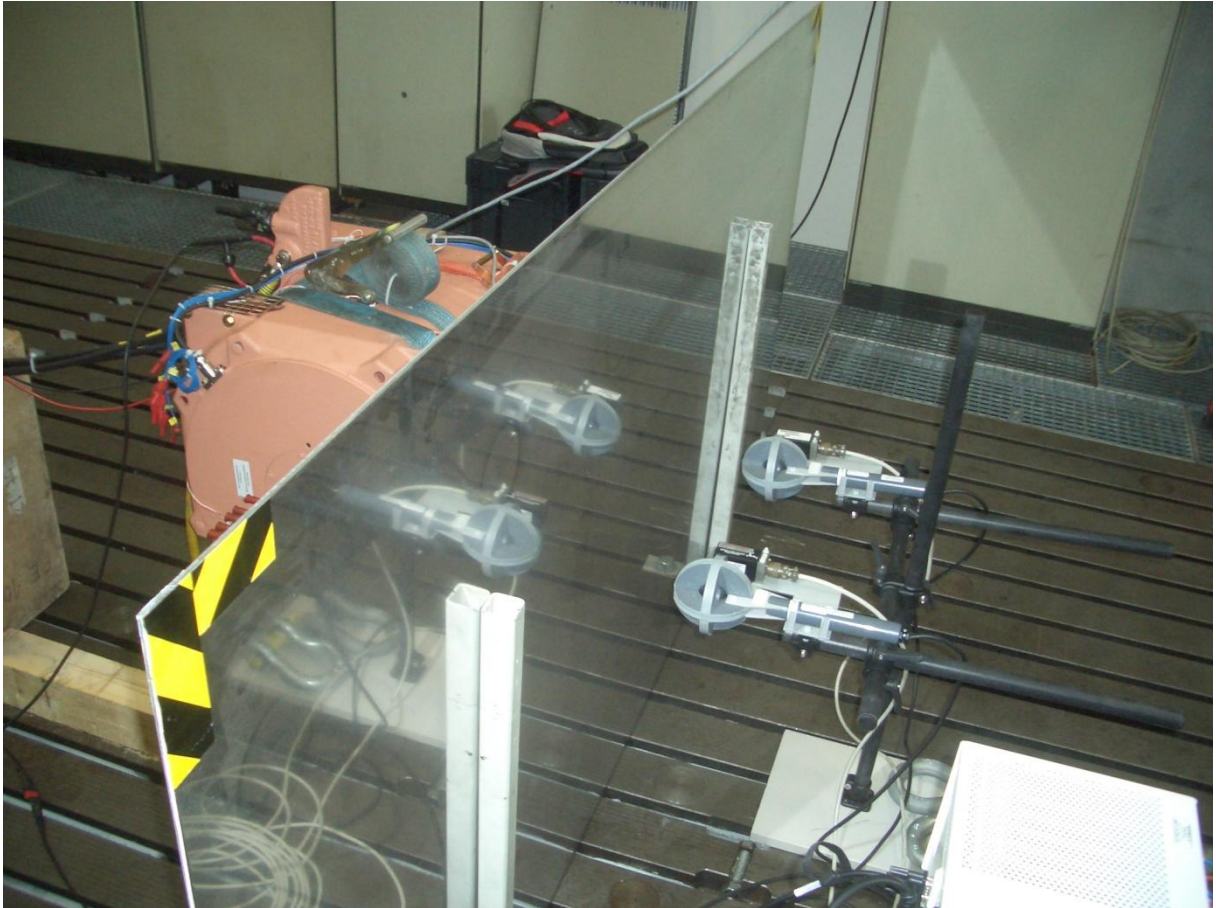


Abbildung 10-14: Magnetfeldmessung AC, Traktionsmotor AC mit Alu-Schirmblech

Statorfrequenz in Hz	Grund für den Messpunkt	Motorfluss in %	mit Alu Schirmplatte	Messpunkte
12	AC-Feldmessung HSM_mod**, ICNIRP	100	NEIN	MP1 bis MP3*
26	AC-Feldmessung HSM_mod**, ICNIRP	100	NEIN	MP1 bis MP3*
62	AC-Feldmessung HSM_mod**, ICNIRP	100	NEIN	MP1 bis MP3*
80	AC-Feldmessung HSM_mod**, ICNIRP	100	NEIN	MP1 bis MP3*
122	AC-Feldmessung HSM_mod**, ICNIRP	100	NEIN	MP1 bis MP3*
12	AC-Feldmessung HSM	100	JA	MP1 bis MP3*
26	AC-Feldmessung HSM	100	JA	MP1 bis MP3*
62	AC-Feldmessung HSM	100	JA	MP1 bis MP3*
80	AC-Feldmessung HSM	100	JA	MP1 bis MP3*
122	AC-Feldmessung HSM	100	JA	MP1 bis MP3*

Tabelle 10-16: Messpunkte AC-Magnetfeld, Traktionsmotor AC, 100% Motorfluss

Die Tabelle 10-16 zeigt einen Überblick über die durchgeführten Messungen.

\*Werte von MP2 wurden durch Vergleich mit den Messungen mit Motorfluss-Absenkung angepasst.

\*\*Bei der Messung ohne Alu-Platte wurde eine modifizierte Grenzkurve unter Anwendung von Dämpfungsfaktoren verwendet. Damit soll die Dämpfung des Fahrzeugbodens im Grenzwert berücksichtigt werden.

Zusätzliche Daten bei MP1 und MP3 (100 % Motorfluss) zeigt Tabelle 10-17 und Tabelle 10-18.

MP1:

Motorspannung (Grundschiwingung) Eff in V	Motorstrom (Grundschiwingung) Eff in A	Stator- frequenz fstat in Hz	Feld bei fstat in $\mu$ T	ICNIRP- Wert in %	DC- wert in $\mu$ T	Uzk in V	Alu- Platte	Motor- fluss in Vs
250	40,1	12	5,03	0	18,8	1811	nein	2,71
544	40,3	26	5,70	0	18,8	1811	nein	2,71
1280	40,3	62	6,45	0	18,8	1811	nein	2,71
1340	24,8	80	3,25	0	18,7	1811	nein	2,17
1412	15,7	122	2,08	0	18,6	1811	nein	
250	40,1	12	2,67	0	18,8	1811	ja	2,71
544	40,3	26	1,70	0	18,8	1811	ja	2,71
1280	40,3	62	1,03	0	18,8	1811	ja	2,71
1340	24,8	80	0,40	0	18,6	1811	ja	2,17
1412	15,7	122	0,199	0	18,7	1811	ja	

**Tabelle 10-17: Messergebnisse MP1, AC- und DC-Magnetfeld, Traktionsmotor AC, 100% Motorfluss**

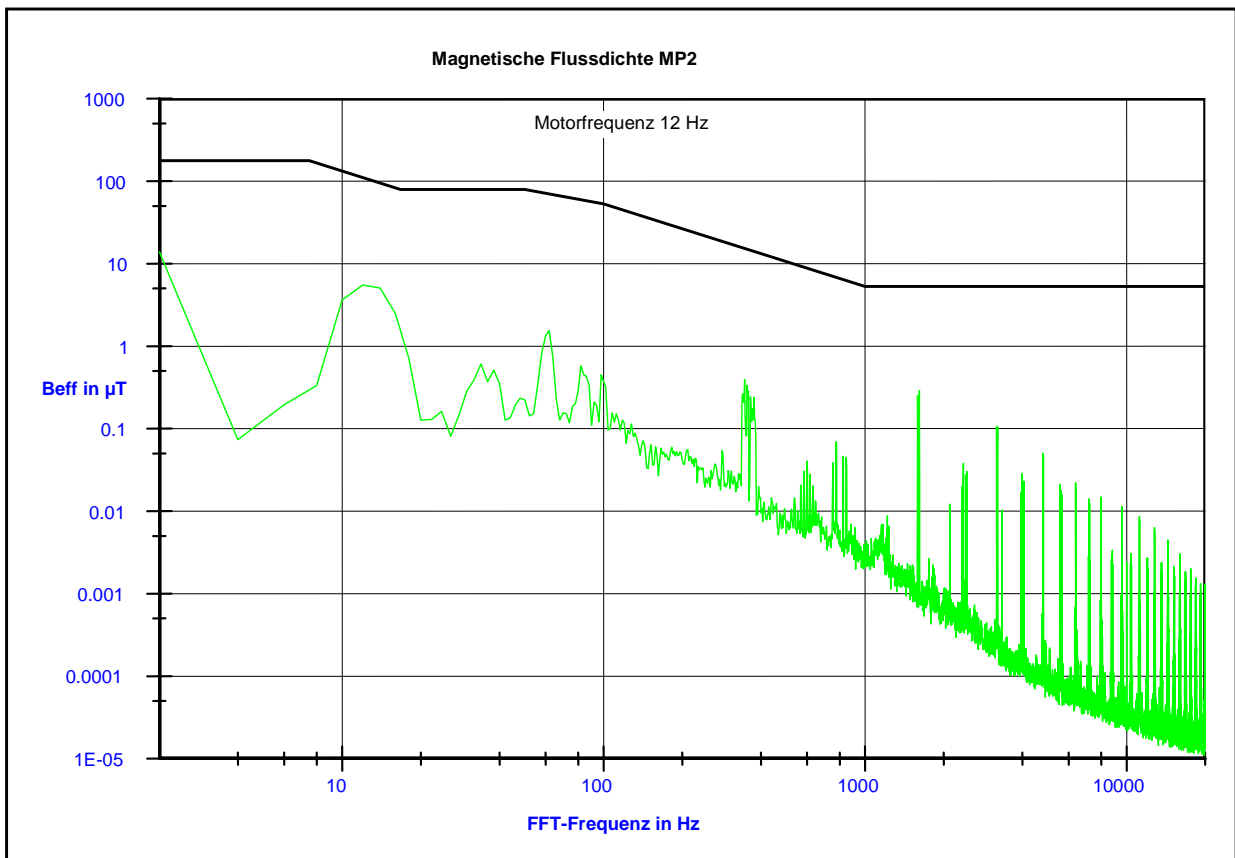
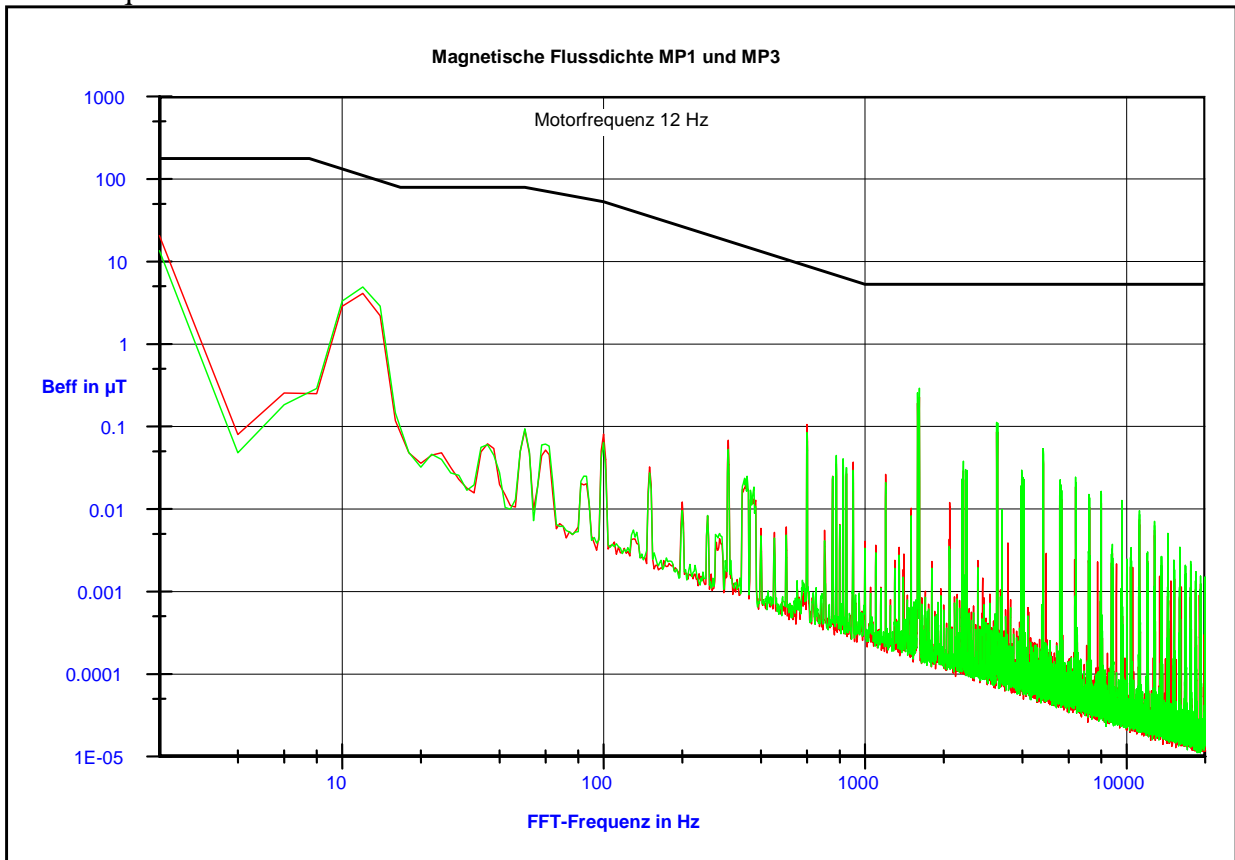
MP3:

Motorspannung (Grundschiwingung) Eff in V	Motorstrom (Grundschiwingung) Eff in A	Stator- frequenz fstat in Hz	Feld bei fstat in $\mu$ T	ICNIRP- Wert in %	DC- wert in $\mu$ T	Uzk in V	Alu- Platte	Motor- fluss in Vs
250	40,1	12	4,00	0	29,2	1811	nein	2,71
544	40,3	26	4,44	0	29,2	1811	nein	2,71
1280	40,3	62	5,03	0	29,2	1811	nein	2,71
1340	24,8	80	2,62	0	28,5	1811	nein	2,17
1412	15,7	122	1,73	0	28,5	1811	nein	
250	40,1	12	2,04	0	28,5	1811	ja	2,71
544	40,3	26	1,23	0	28,6	1811	ja	2,71
1280	40,3	62	0,74	0	28,5	1811	ja	2,71
1340	24,8	80	0,32	0	28,5	1811	ja	2,17
1412	15,7	122	0,19	0	28,5	1811	ja	

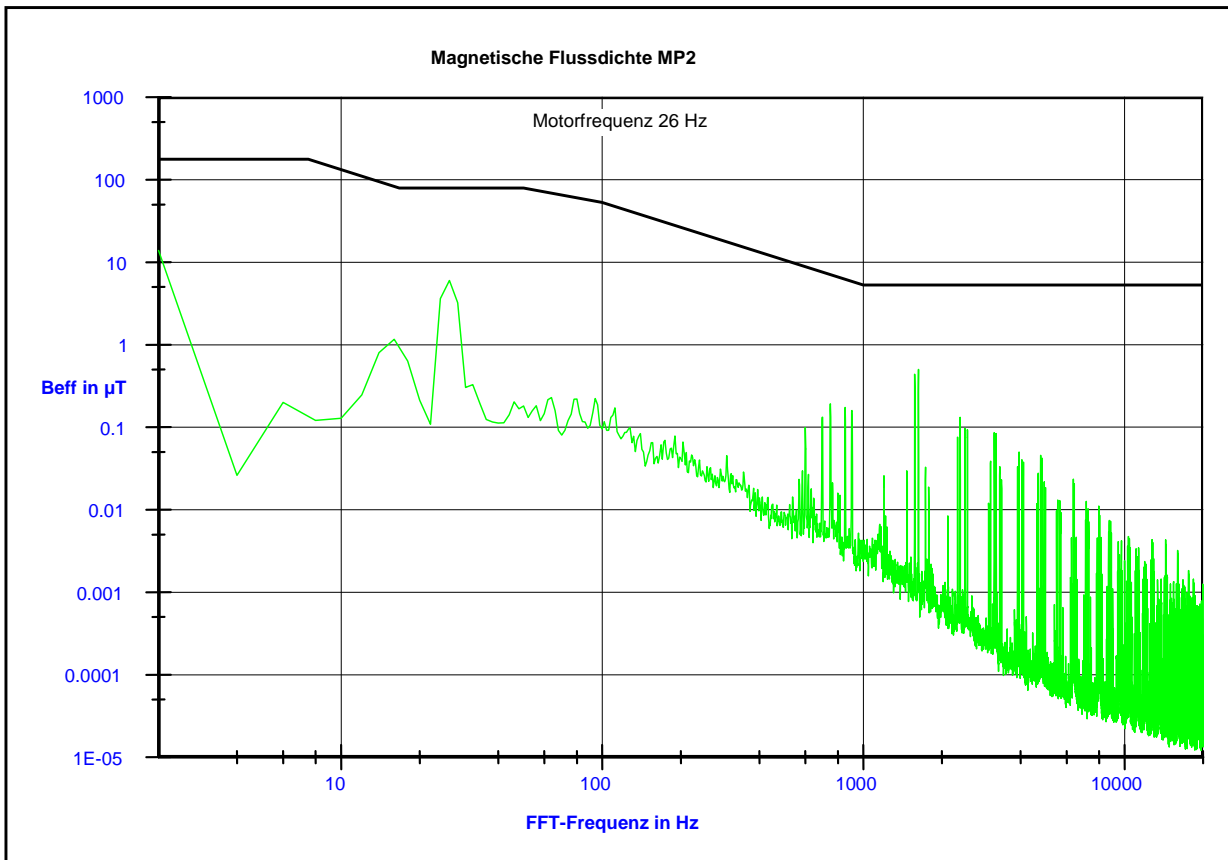
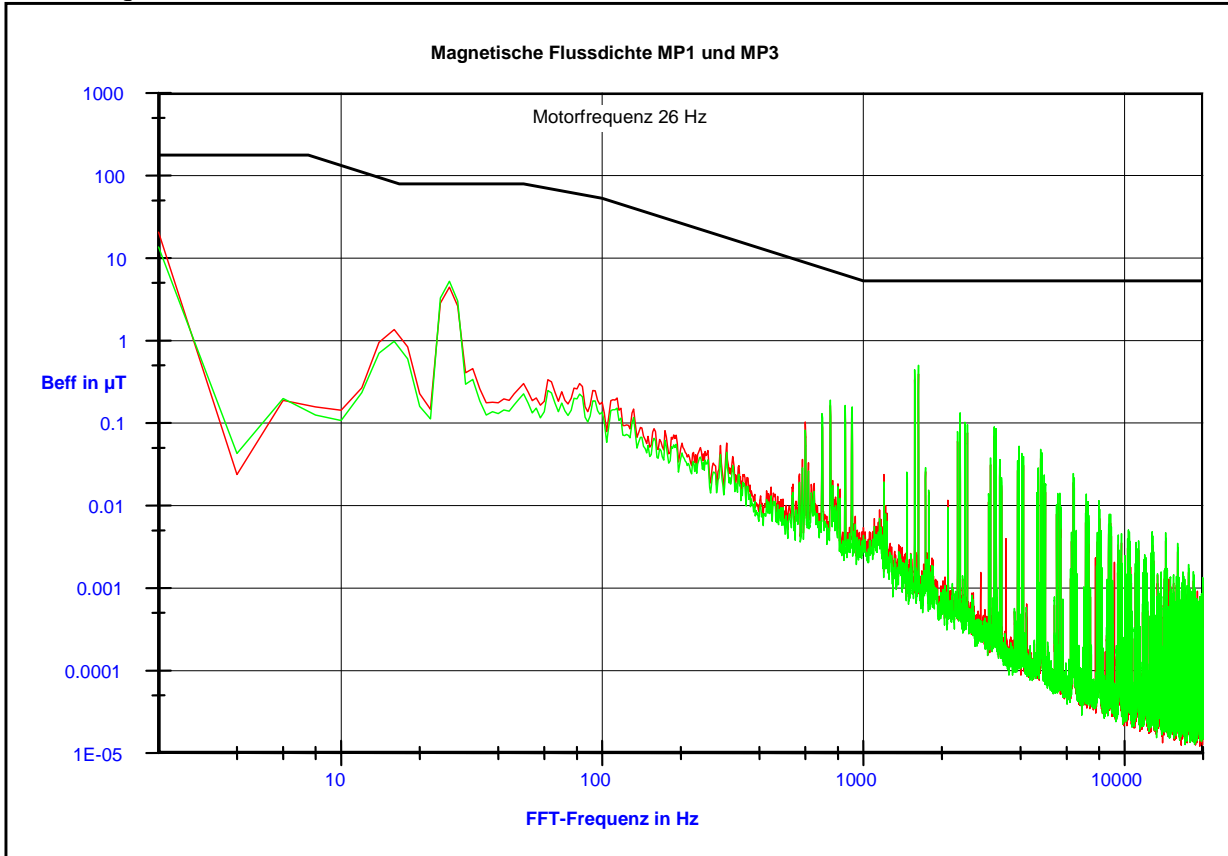
**Tabelle 10-18: Messergebnisse MP3, AC- und DC-Magnetfeld, Traktionsmotor AC, 100% Motorfluss**

Max-Hold-FFT der magnetischen Flussdichte (Effektivwerte) ohne Alu-Platte (HSM mod-Grenzwert)

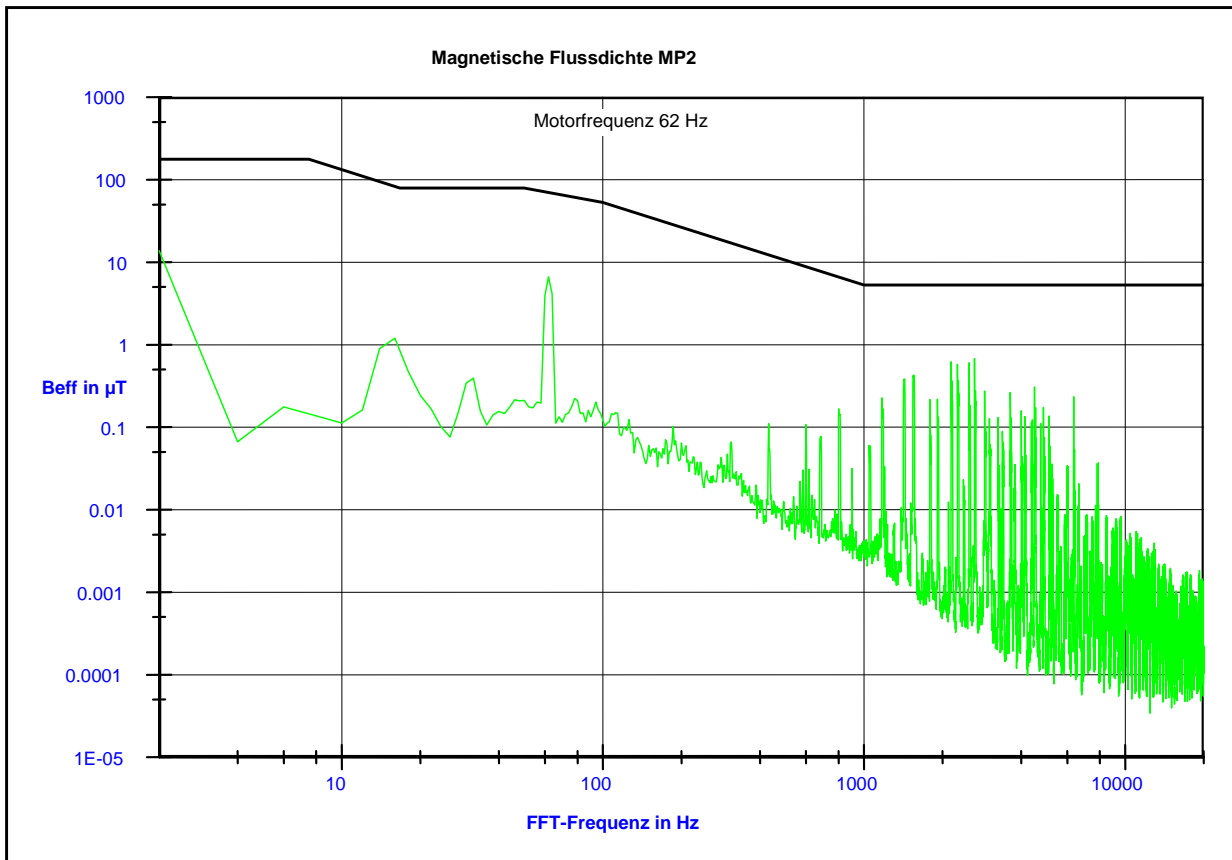
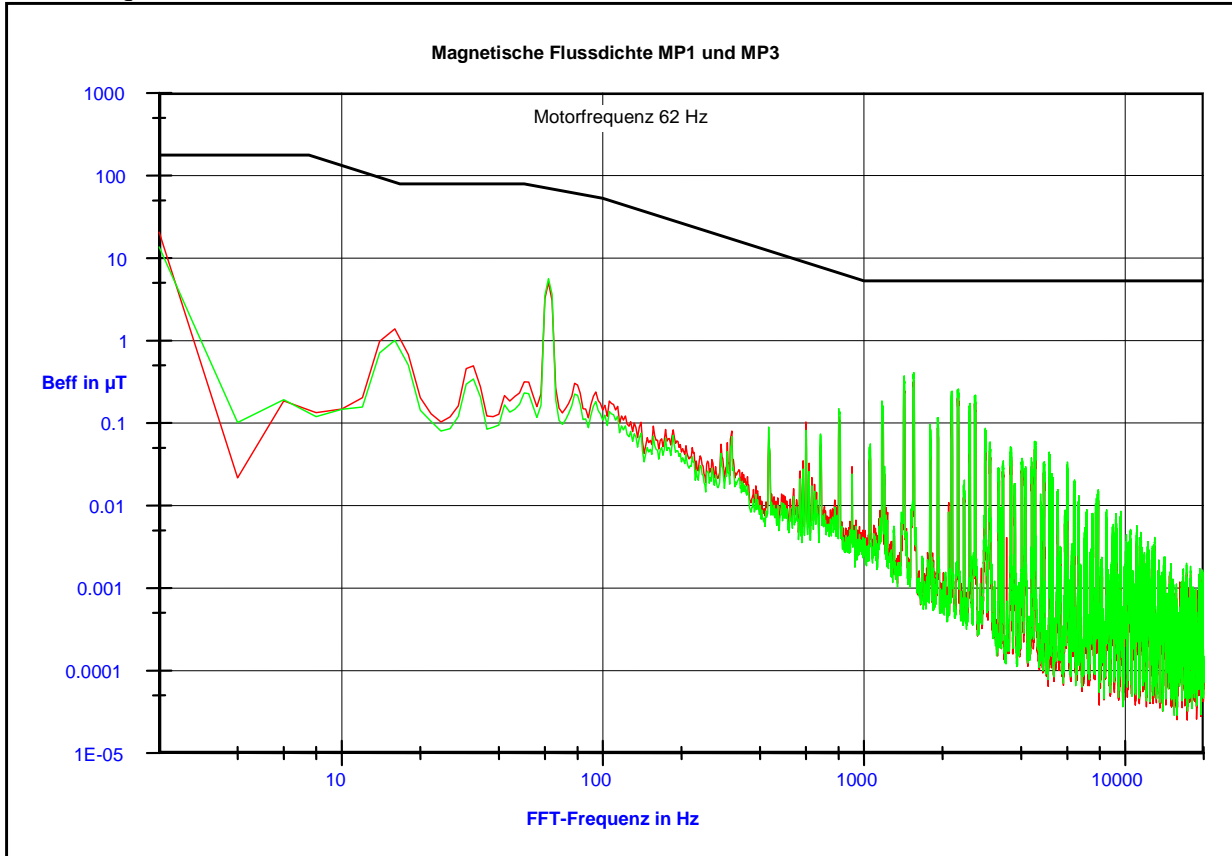
Statorfrequenz 12 Hz:



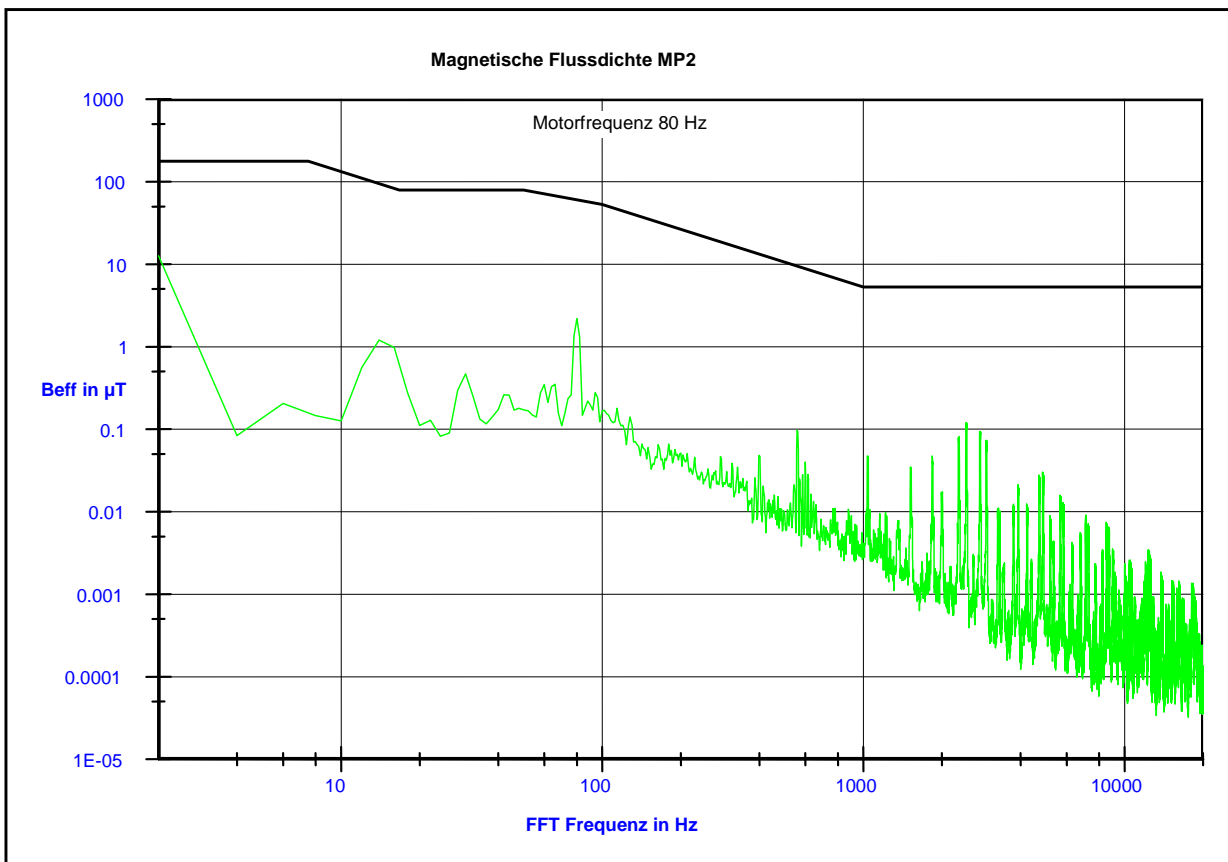
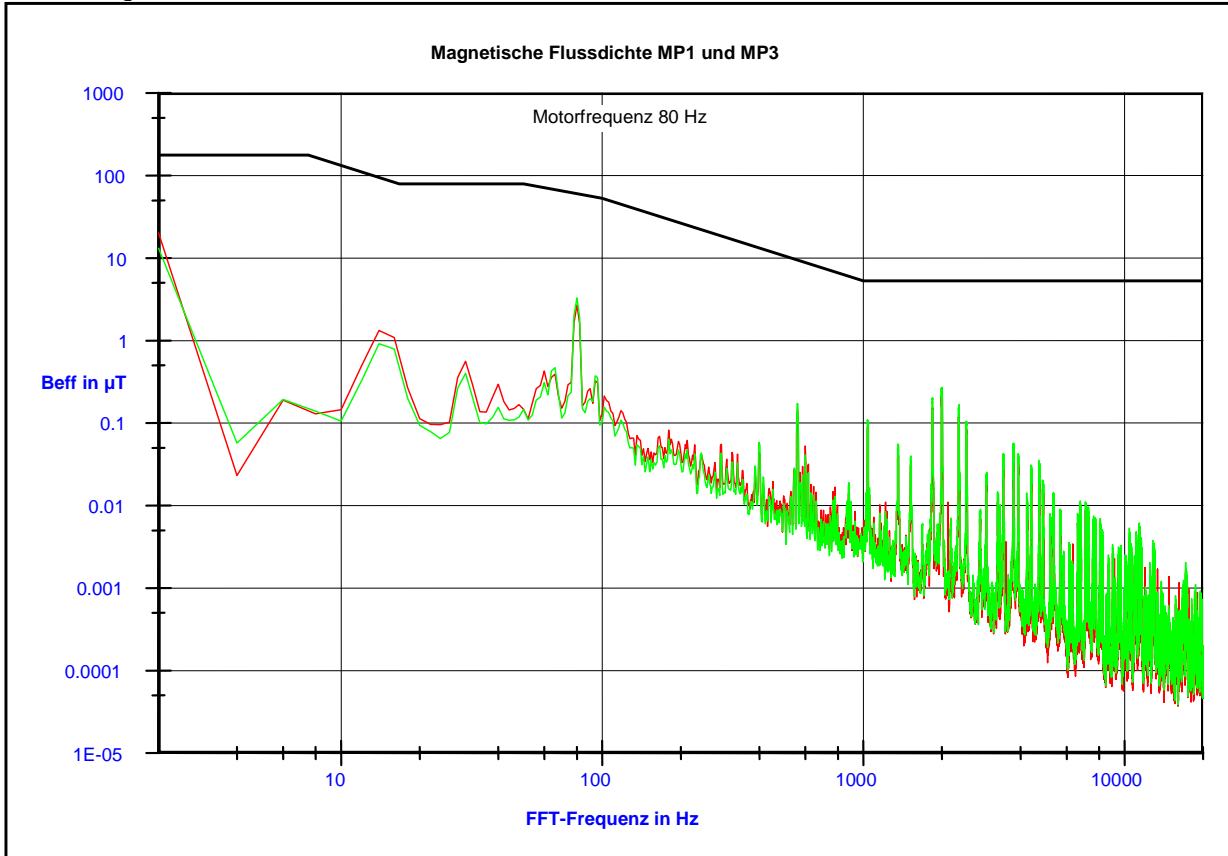
Statorfrequenz 26 Hz:



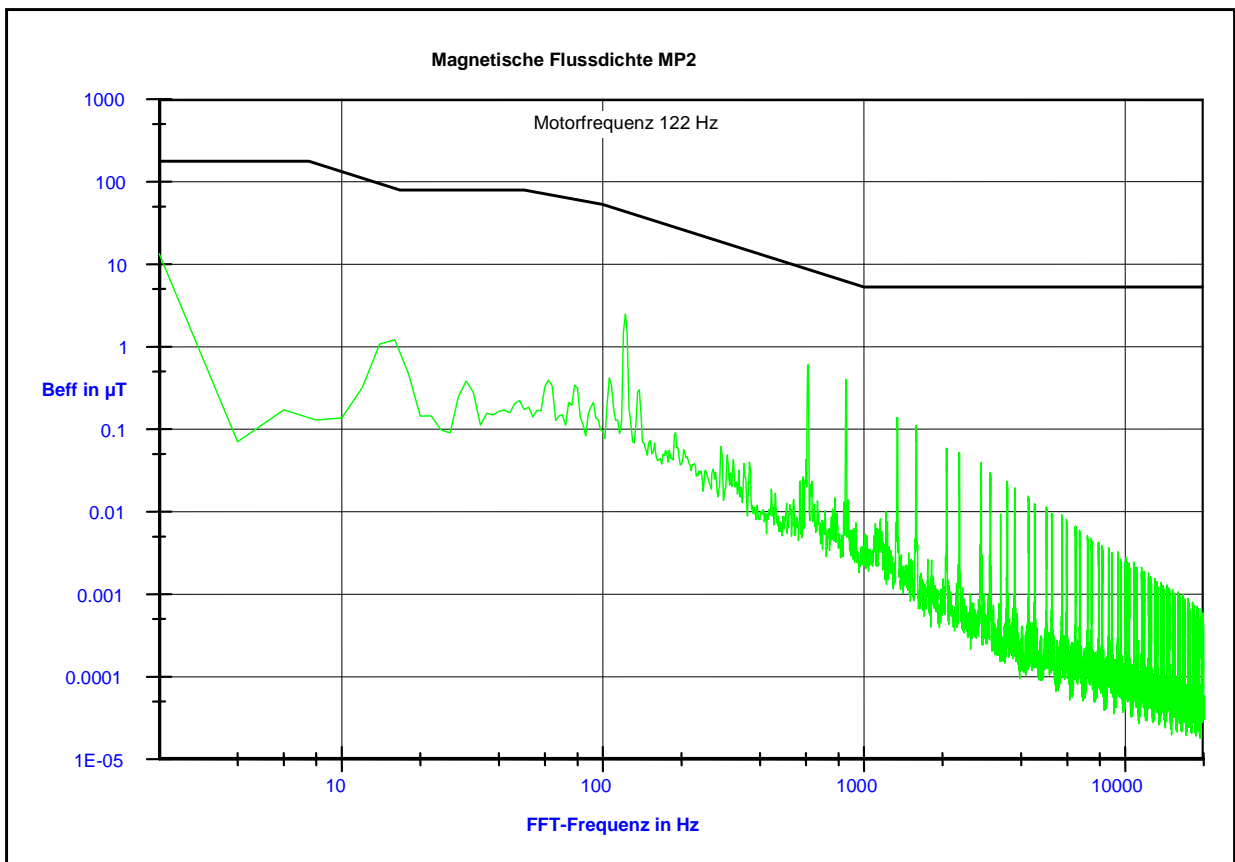
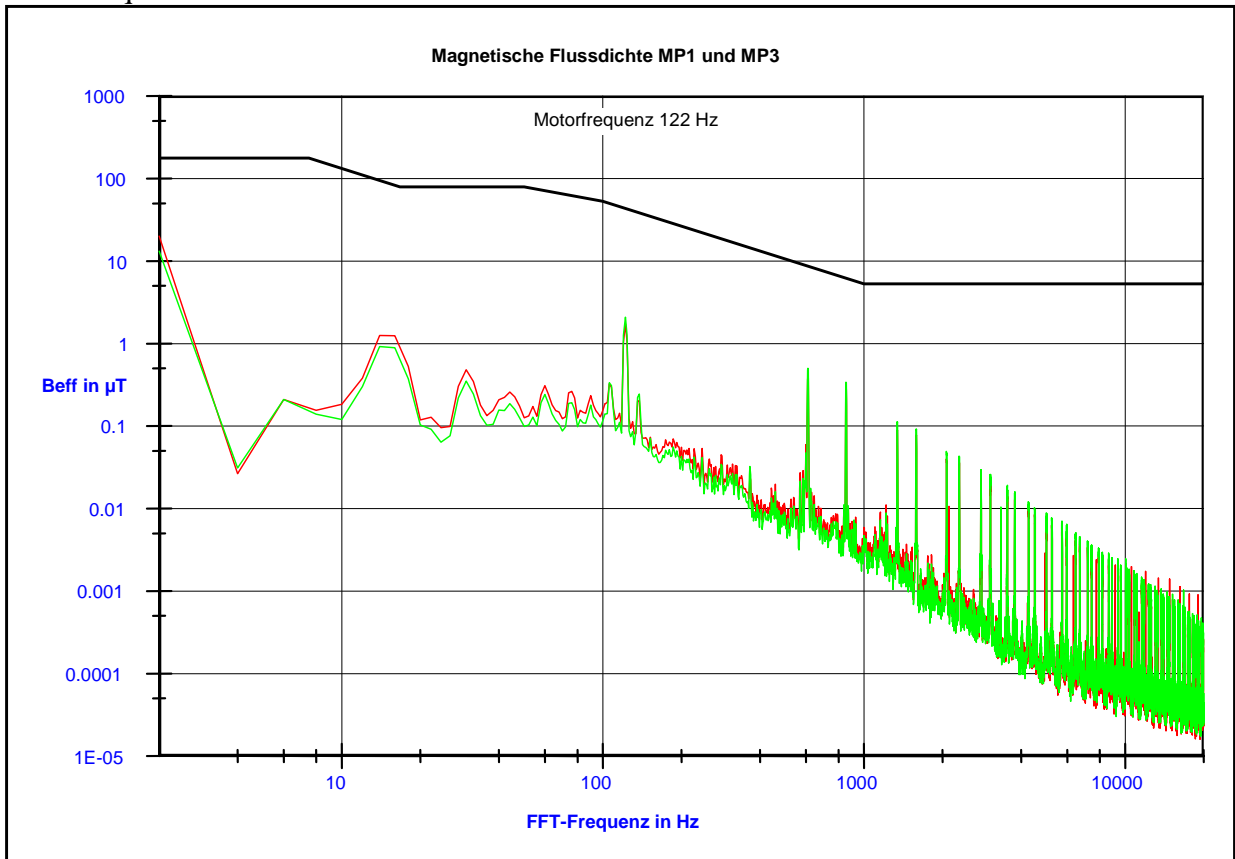
## Statorfrequenz 62 Hz



Statorfrequenz 80 Hz

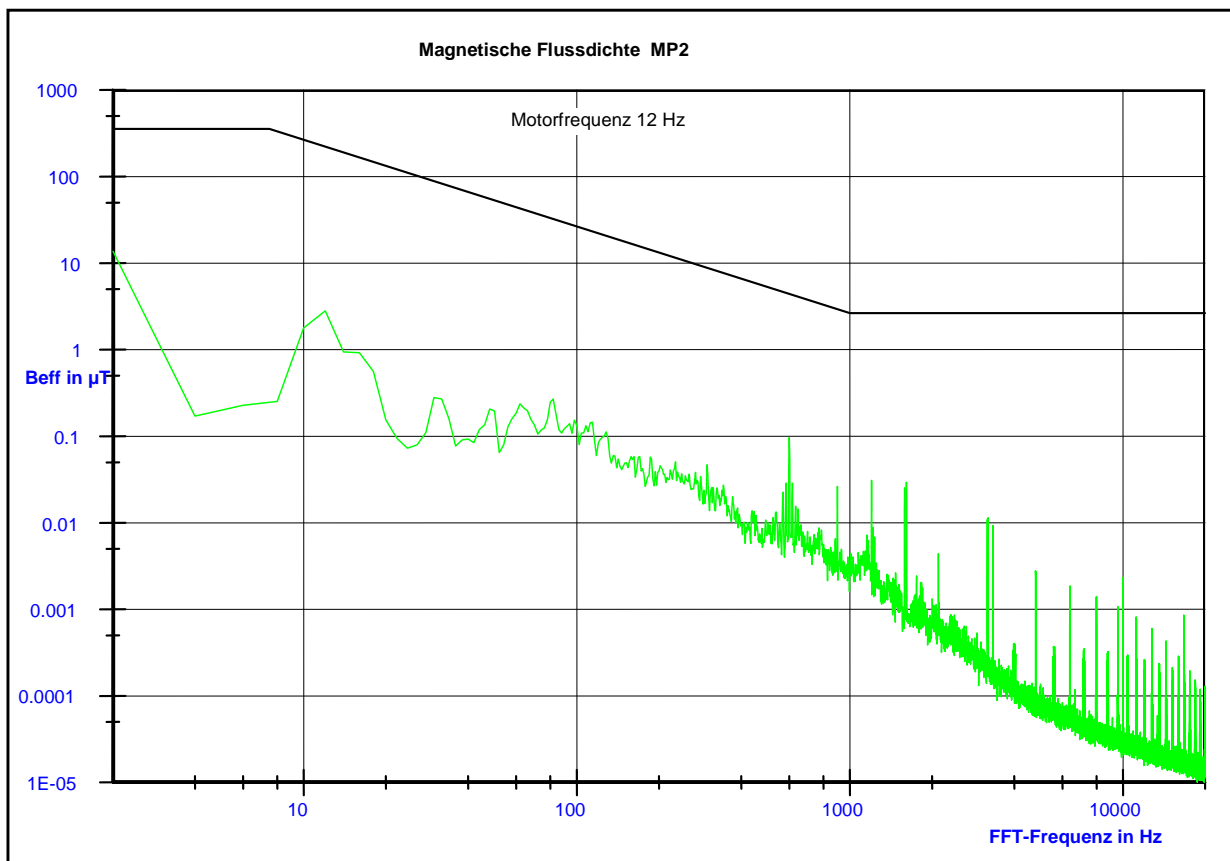
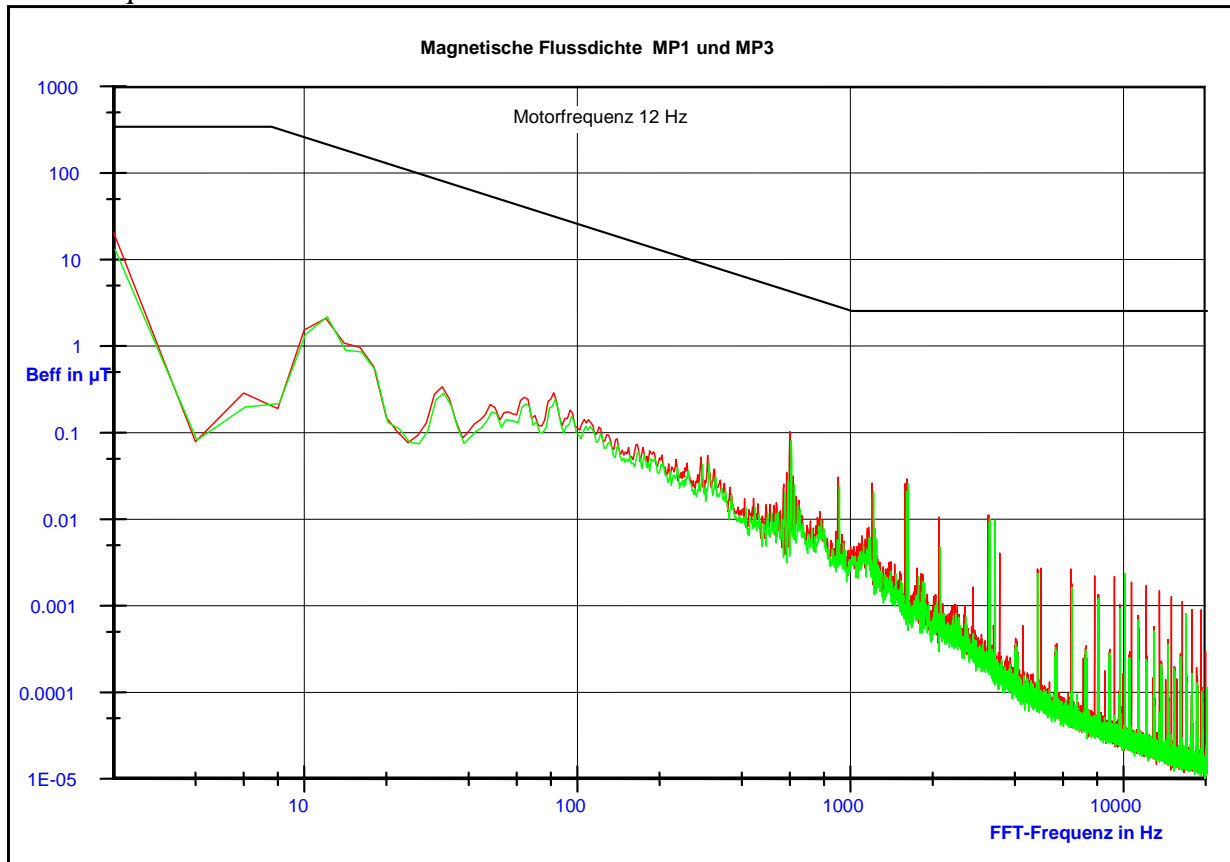


## Statorfrequenz 122 Hz



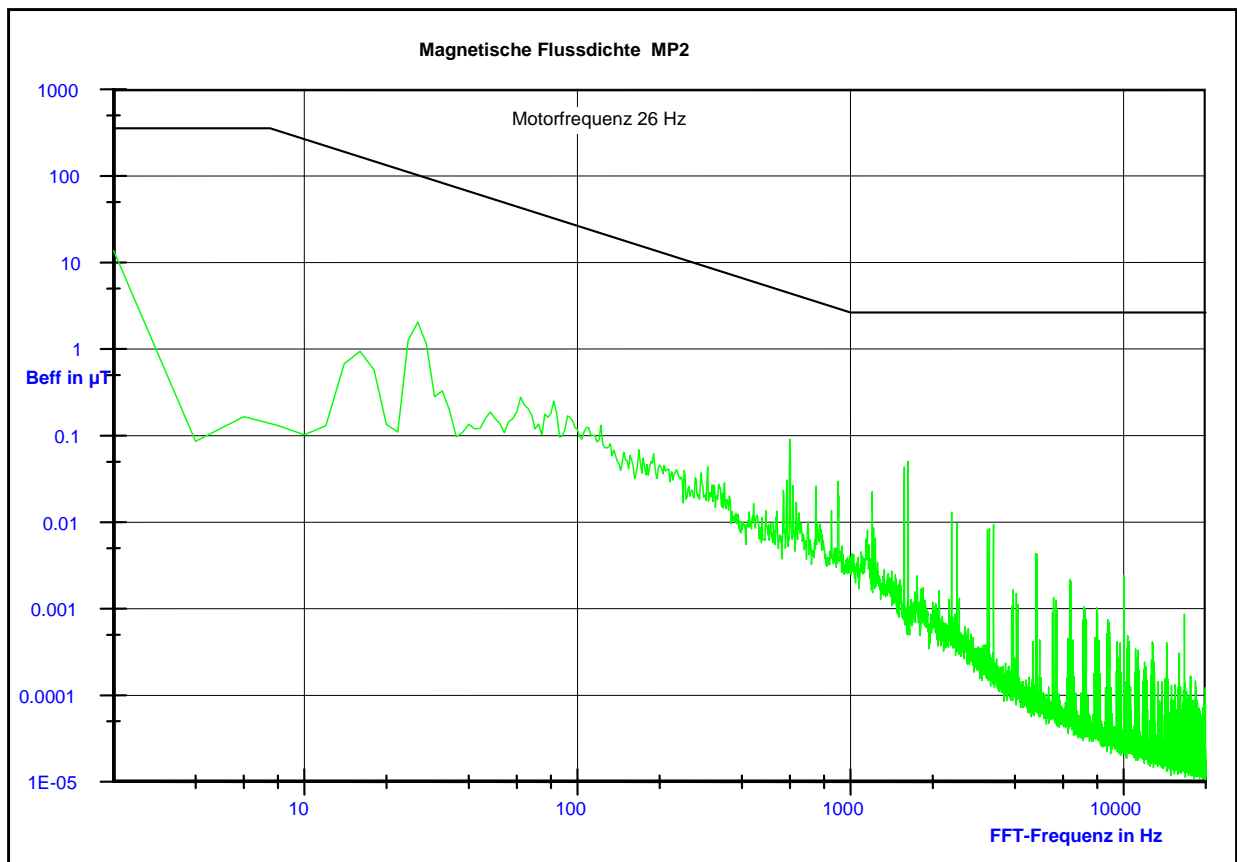
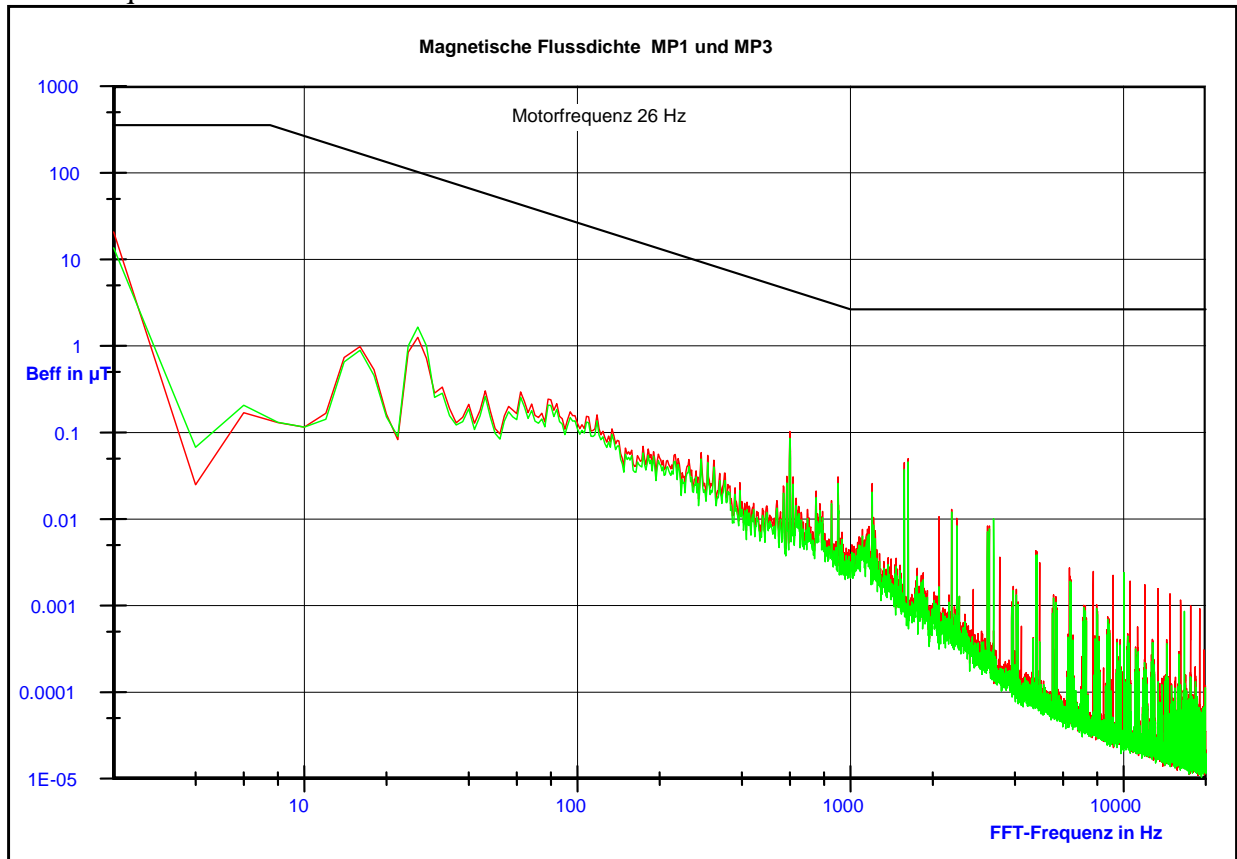
Max-Hold-FFT der magnetischen Flussdichte (Effektivwerte) mit Alu-Platte (HSM-Grenzwert)

Statorfrequenz 12 Hz:

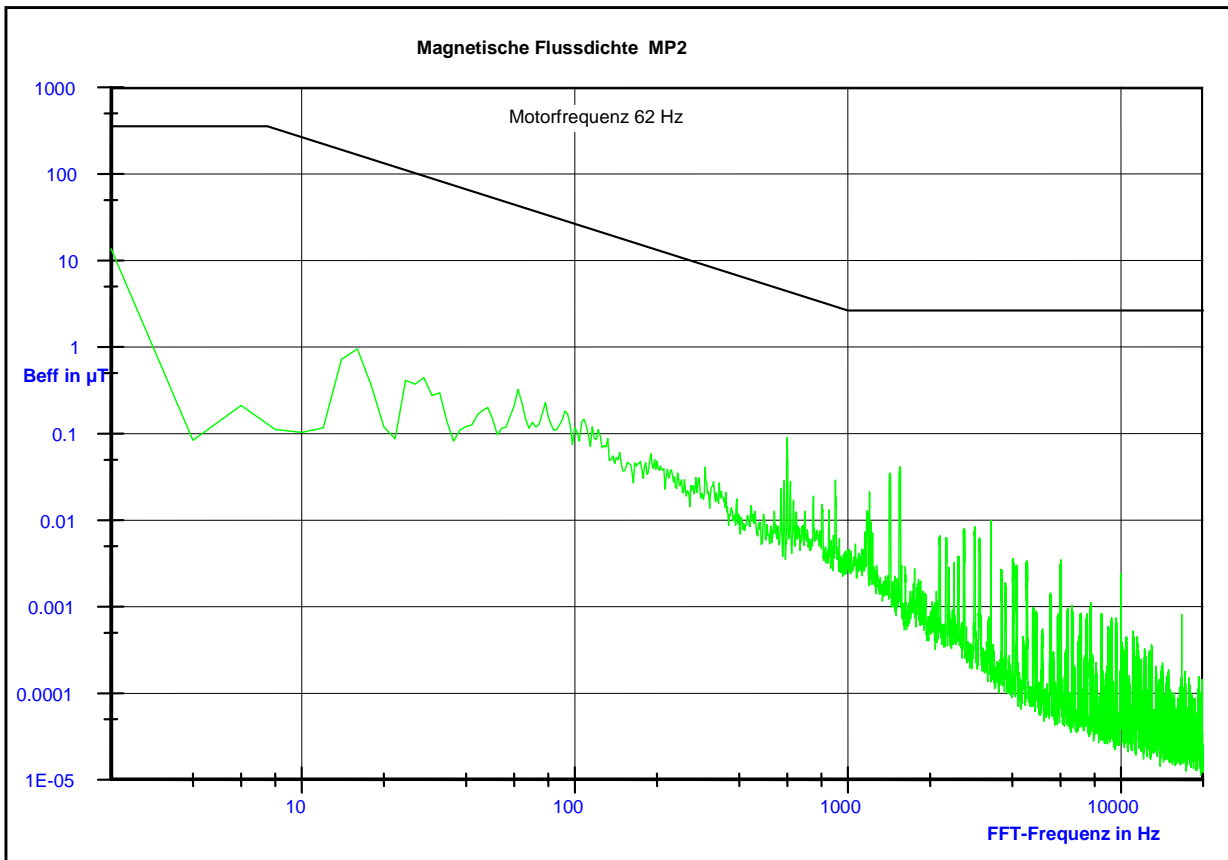
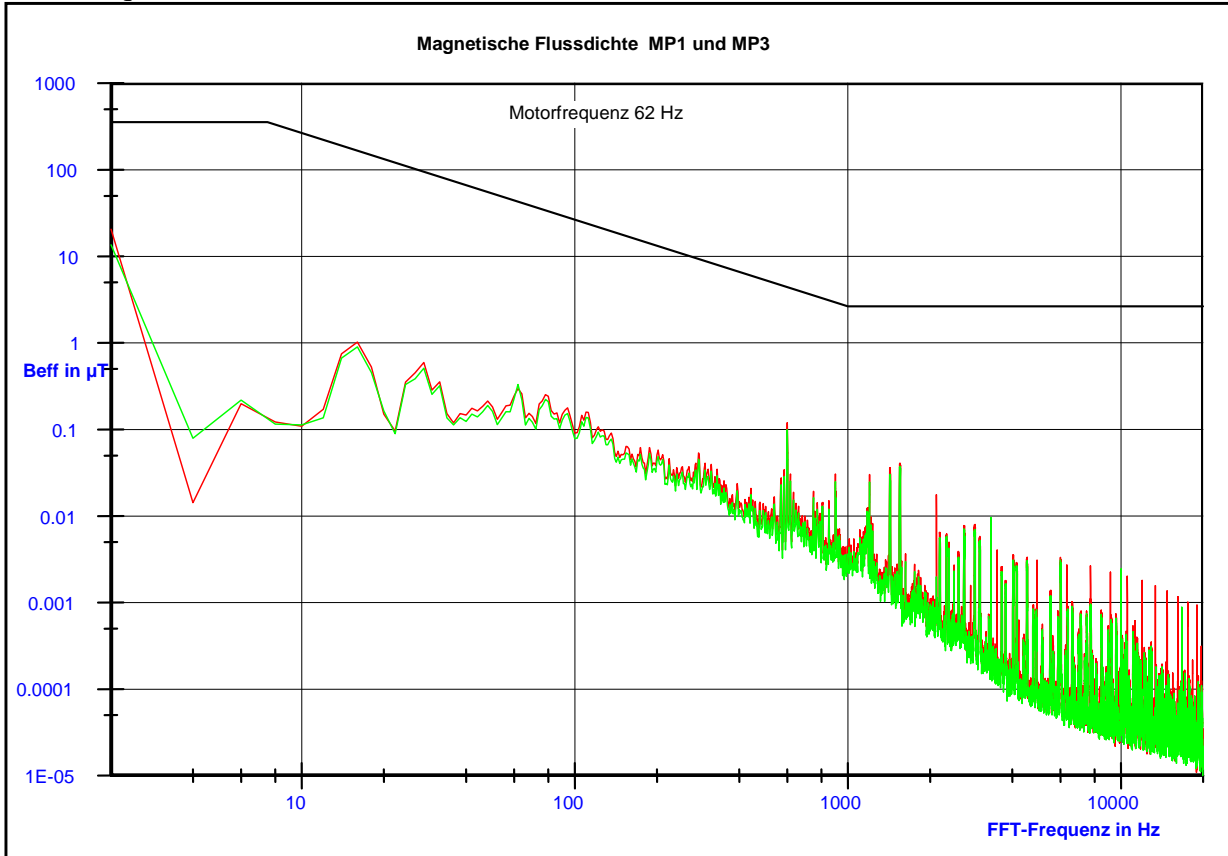




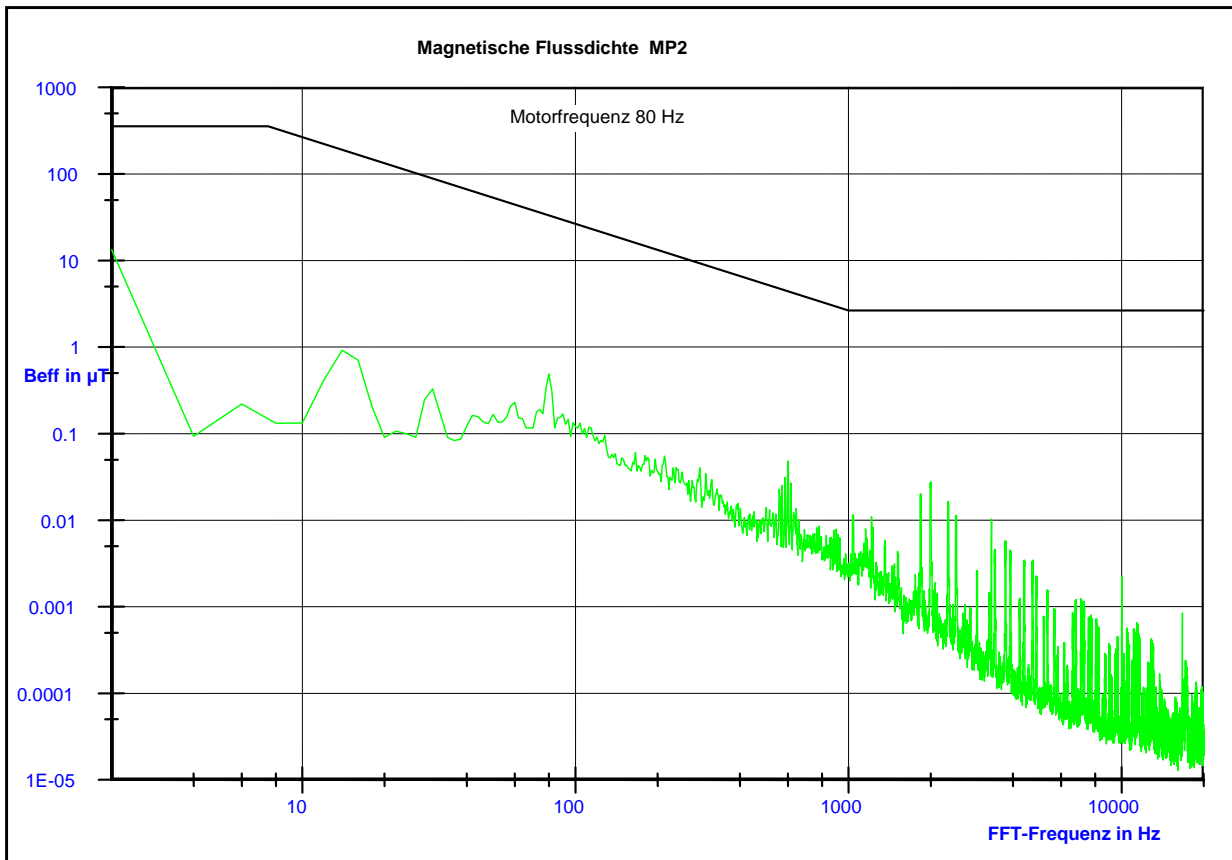
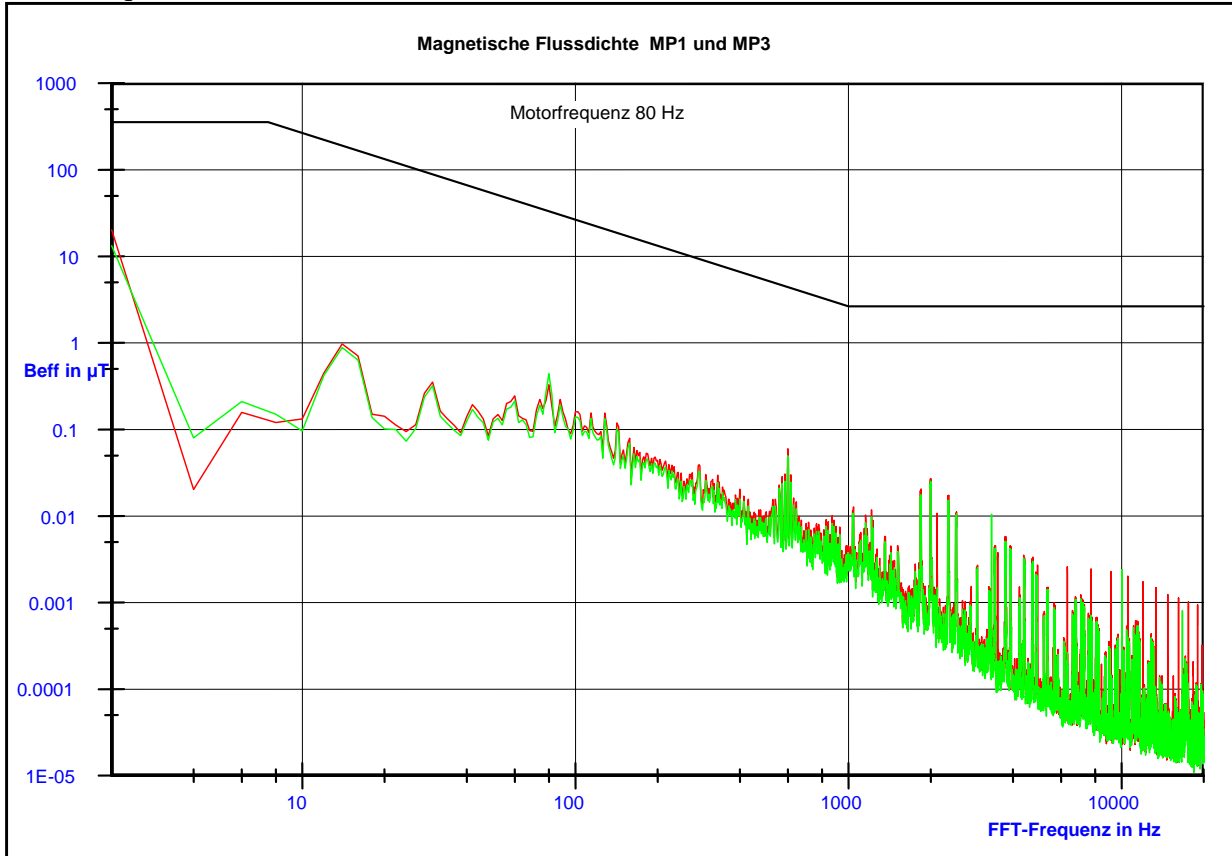
Statorfrequenz 26 Hz:



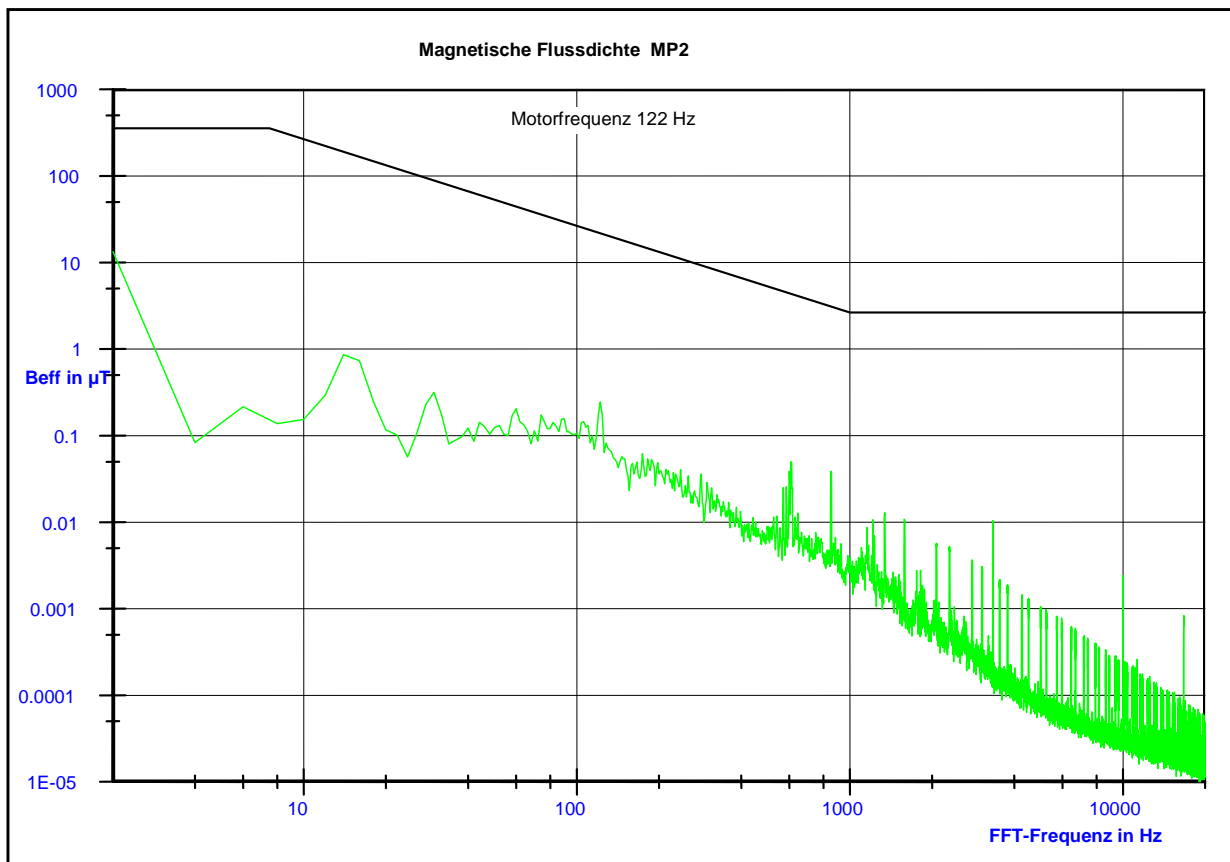
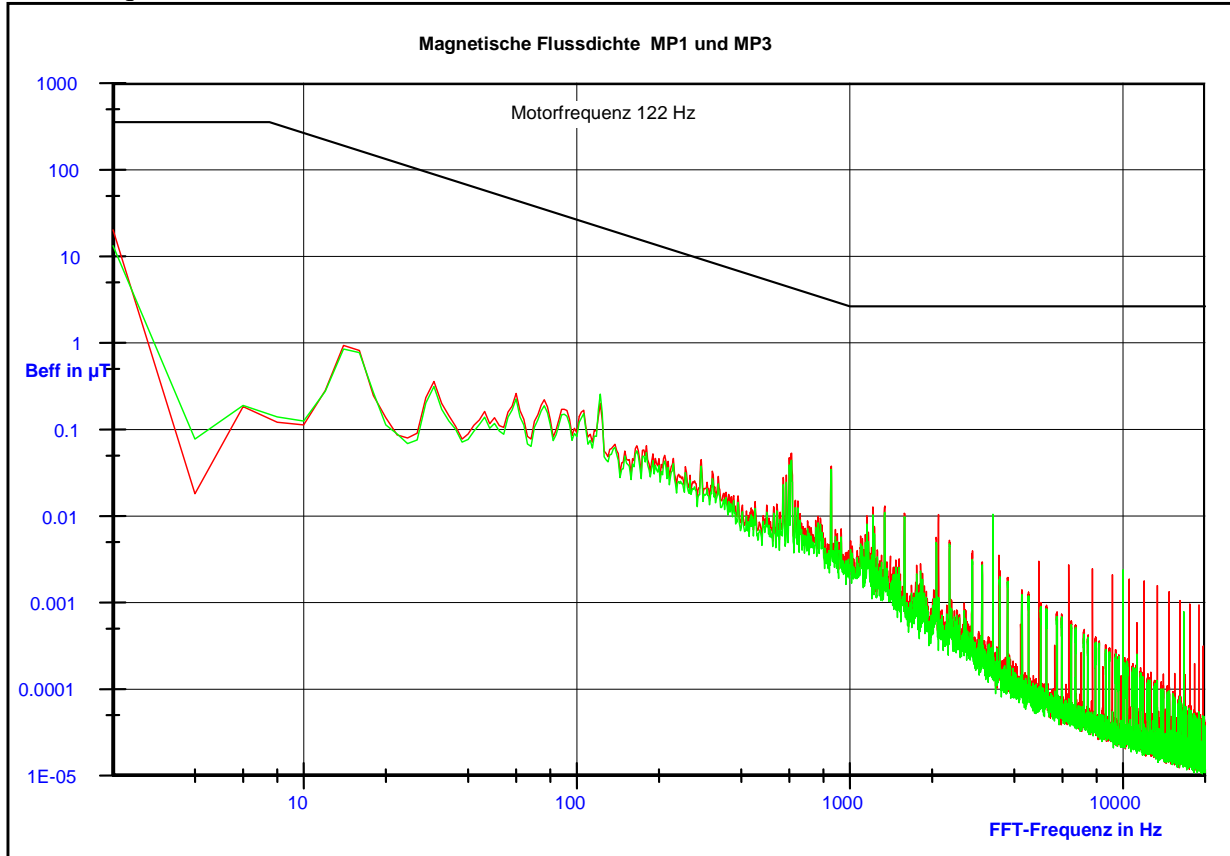
Statorfrequenz 62 Hz



## Statorfrequenz 80 Hz



Statorfrequenz 122 Hz



Die Motorspezifikation wird hinsichtlich DC-Magnetfeld, ICNIRP-Grenzwert und Herzschrittmarker-Grenzwert eingehalten.

## ATP-Frequenzen

Die Tabelle 10-19 zeigt die für die Verifikation der ATP-Anforderung durchgeführten Messungen.

<b>Statorfrequenz in Hz</b>	<b>Grund für den Messpunkt</b>	<b>Motorfluss in %</b>	<b>mit Alu Schirmplatte</b>	<b>Messpunkte</b>
12	ATP-Frequenzen	Flussabsenkung	NEIN	MP 11 bis MP 13
26	ATP-Frequenzen	Flussabsenkung	NEIN	MP 11 bis MP 13
62	ATP-Frequenzen	Flussabsenkung	NEIN	MP 11 bis MP 13
80	ATP-Frequenzen	100	NEIN	MP 11 bis MP 13
122	ATP-Frequenzen	100	NEIN	MP 11 bis MP 13

**Tabelle 10-19: Überblick über die durchgeführten Messungen**

Die Frequenzen, die mit Flussabsenkung betrieben wurden, wurden hochgerechnet.

Die Auswertung der ATP-Filter (ATP-Frequenzen in Tabelle 10-20) erfolgte unter der Annahme eines idealen Rechteckfilters. Wie schon erwähnt sind die Ergebnisse, die aufgrund der Hochrechnung ermittelt wurden, mit einer großen Unsicherheit behaftet. Werte größer als 100 nT sind farblich hinterlegt.

<b>Mittenfrequenz in Hz</b>	<b>Bandbreite in Hz</b>
1700	300
2000	300
2300	300
2600	300

**Tabelle 10-20: ATP-Frequenzen, Traktionsmotor AC**

Die Messergebnisse des Gesamtfeldes (Orientierung der ATP-Antenne nicht berücksichtigt) zeigt Tabelle 10-21, Tabelle 10-22 und Tabelle 10-23.

#### MP11 (Gesamtfeld):

Statorfrequenz in Hz	Motorfluss in %	Filterwert 1700 Hz	Filterwert 2000 Hz	Filterwert 2300 Hz	Filterwert 2600 Hz
12	Flussabsenkung	78 nT	4 nT	5 nT	3 nT
26	Flussabsenkung	158 nT	4 nT	13 nT	13 nT
62	Flussabsenkung	243 nT	9 nT	53 nT	50 nT
12	hochgerechnet	234 nT	4 nT	35 nT	9 nT
26	hochgerechnet	395 nT	4 nT	65 nT	65 nT
62	hochgerechnet	243 nT	45 nT	212 nT	150 nT
80	100	123 nT	168 nT	104 nT	70 nT
122	100	63 nT	33 nT	30 nT	3 nT

Tabelle 10-21: Messergebnisse MP11 (Gesamtfeld), ATP-Frequenzen, Traktionsmotor AC

#### MP12 (Gesamtfeld):

Statorfrequenz in Hz	Motorfluss in %	Filterwert 1700 Hz	Filterwert 2000 Hz	Filterwert 2300 Hz	Filterwert 2600 Hz
12	Flussabsenkung	83 nT	5 nT	6 nT	3 nT
26	Flussabsenkung	171 nT	5 nT	14 nT	14 nT
62	Flussabsenkung	262 nT	100 nT	57 nT	54 nT
12	hochgerechnet	249 nT	5 nT	42 nT	9 nT
26	hochgerechnet	428 nT	5 nT	70 nT	70 nT
62	hochgerechnet	262 nT	500 nT	228 nT	162 nT
80	100	49 nT	23 nT	86 nT	127 nT
122	100	68 nT	36 nT	32 nT	3 nT

Tabelle 10-22: Messergebnisse MP12 (Gesamtfeld), ATP-Frequenzen, Traktionsmotor AC

#### MP13 (Gesamtfeld):

Statorfrequenz in Hz	Motorfluss in %	Filterwert 1700 Hz	Filterwert 2000 Hz	Filterwert 2300 Hz	Filterwert 2600 Hz
12	Flussabsenkung	58 nT	12 nT	5 nT	3 nT
26	Flussabsenkung	120 nT	12 nT	11 nT	10 nT
62	Flussabsenkung	189 nT	13 nT	40 nT	39 nT
12	hochgerechnet	174 nT	12 nT	35 nT	9 nT
26	hochgerechnet	300 nT	12 nT	55 nT	50 nT
62	hochgerechnet	189 nT	65 nT	160 nT	117 nT
80	100	88 nT	128 nT	76 nT	53 nT
122	100	50 nT	27 nT	24 nT	3 nT

Tabelle 10-23: Messergebnisse MP13 (Gesamtfeld), ATP-Frequenzen, Traktionsmotor AC

Der Grenzwert von 100 nT wird schon bei den Betriebspunkten mit Flussabsenkung überschritten. Durch die Hochrechnung auf Motor-Nennfluss wird dies noch deutlicher.

Berücksichtigung der Magnetfeldkomponente ausschließlich in der Achse der ATP-Antenne:

Aufgrund der Ausrichtung der ATP-Antennen quer zur Fahrtrichtung wird nur die y-Komponente des magnetischen Feldes wirksam. Nachfolgend wird deshalb nur die y-Komponente ausgewertet, mit dem Wissen, dass an der tatsächlichen Antennenposition am Fahrzeug andere Verhältnisse vorherrschen werden.

Die zusätzliche Auswertung nur der einen Magnetfeldkomponente soll ein Gefühl dafür vermitteln, wie groß der Anteil in der Achse der ATP-Antenne in etwa sein wird.

Die Messergebnisse des Magnetfeldes in der y-Achse (entsprechend der Orientierung der ATP-Antenne) zeigt Tabelle 10-24, Tabelle 10-25 und Tabelle 10-26.

**MP11 (y-Komponente):**

Statorfrequenz in Hz	Motorfluss in %	Filterwert 1700 Hz	Filterwert 2000 Hz	Filterwert 2300 Hz	Filterwert 2600 Hz
12	Flussabsenkung	15 nT	3 nT	3 nT	2 nT
26	Flussabsenkung	30 nT	3 nT	3 nT	3 nT
62	Flussabsenkung	44 nT	4 nT	10 nT	9 nT
80	100	25 nT	30 nT	22 nT	13 nT
122	100	12 nT	8 nT	5 nT	2 nT

**Tabelle 10-24: Messergebnisse MP11(y-Komponente), ATP-Frequenzen, Traktionsmotor AC**

**MP12 (y-Komponente):**

Statorfrequenz in Hz	Motorfluss in %	Filterwert 1700 Hz	Filterwert 2000 Hz	Filterwert 2300 Hz	Filterwert 2600 Hz
12	Flussabsenkung	8 nT	4 nT	3 nT	2 nT
26	Flussabsenkung	14 nT	4 nT	3 nT	2 nT
62	Flussabsenkung	22 nT	4 nT	5 nT	5 nT
80	100	7 nT	4 nT	6 nT	10 nT
122	100	8 nT	5 nT	4 nT	2 nT

**Tabelle 10-25: Messergebnisse MP12(y-Komponente), ATP-Frequenzen, Traktionsmotor AC**

**MP13 (y-Komponente):**

Statorfrequenz in Hz	Motorfluss in %	Filterwert 1700 Hz	Filterwert 2000 Hz	Filterwert 2300 Hz	Filterwert 2600 Hz
12	Flussabsenkung	13 nT	5 nT	3 nT	2 nT
26	Flussabsenkung	24 nT	6 nT	4 nT	3 nT
62	Flussabsenkung	40 nT	6 nT	8 nT	8 nT
80	100	16 nT	29 nT	14 nT	12 nT
122	100	12 nT	7 nT	6 nT	2 nT

**Tabelle 10-26: Messergebnisse MP13(y-Komponente), ATP-Frequenzen, Traktionsmotor AC**

### 10.1.2.7 Zusammenfassung

Die Motorspezifikation wird hinsichtlich DC-Magnetfeld, ICNIRP-Grenzwert und Herzschrittmacher-Grenzwert eingehalten.

Der Grenzwert für die Beeinflussung der ATP-Antenne von 100 nT wird schon bei den Betriebspunkten mit Flussabsenkung überschritten. Noch deutlicher wird dies durch die Hochrechnung auf Motor-Nennfluss.

Durch die Auswertung des Magnetfeldes in der Achse der ATP-Antenne werden die hohen Gesamtfelder ein wenig entschärft. Erst die Überprüfung am Fahrzeug wird die Einhaltung des Grenzwertes bestätigen können.

## **10.2 Netzdrossel bzw. Traktionsstromrichter**

### **10.2.1 Netzdrossel**

#### **10.2.1.1 Beschreibung**

Voruntersuchungen haben gezeigt, dass die geplante Netzdrossel hohe magnetische Felder erzeugt.

Um die Grenzwerte der magnetischen Flussdichte für den Personenschutz entsprechend der Forderungen des Kunden (DC Grenzwert) bzw. der ICNIRP Richtlinie (AC Grenzwert) erfüllen zu können, sind Schirmungsmaßnahmen zu treffen.

Für die Erstmessungen im Labor wurden zur Schirmung Elektrobleche vom Typ M350 mit einer Größe von 120 cm x 120 cm verwendet. Am Fahrzeug werden die aus der FEM-Berechnung ermittelten Elektrobleche vom Typ M400 mit einer Größe von 120 cm x 160 cm zum Einsatz kommen.

Die beiden Blechtypen unterscheiden sich in den Garantiewerten für die Magnetisierung nur geringfügig.

Die Schirmplatte am Fahrzeug wird aus 10 Stück Einzelblechen mit einer Dicke von jeweils 0,5 mm, also einer Gesamtdicke von 5 mm, bestehen. Die Feldmessungen wurden mit unterschiedlichen Anzahlen von Schirmblechen durchgeführt.

Vom Kunden gefordert wird die Einhaltung des DC-Grenzwertes von 1 mT von 0 cm bis 60 cm über dem Fußboden und 0,5 mT oberhalb von 60 cm über dem Fußboden. Bei der FEM-Berechnung wurde deshalb auf die Einhaltung ab 0 cm über dem Fußboden dimensioniert. Garantiert wird allerdings die Einhaltung der Grenzwerte bei Anwendung der EN 50500. Die Personenschutzmessungen am Fahrzeug sollen deshalb auch nach der EN 50500 durchgeführt werden, dabei liegt der unterste Messpunkt 30 cm über der fertigen Fußbodenoberkante des Fahrzeuges.

Der Einbau der Schirmbleche direkt unter dem Fahrzeugfußboden wurde zwar favorisiert, stand aber zum Zeitpunkt der Vermessung der Netzdrossel noch nicht endgültig fest.

Die Messanordnung, bei der die Schirmbleche in einem Abstand von 40 cm von der Drosseloberkante positioniert waren, entspricht der voraussichtlichen Anordnung am Fahrzeug (Schirmbleche 332 mm über dem Stromrichter). Die Schirmbleche werden direkt unter dem Fahrzeugboden angebracht. Bei der Messung wurde die Feldsonde 10 cm über dem Schirmblech angeordnet. Bei der Messung nach EN 50500 liegt der erste Messpunkt jedoch im Abstand von 30 cm zum Fahrzeugboden. Hier besteht also noch eine Reserve, bedingt durch den um 20 cm größeren Messabstand bei der Fahrzeugvermessung.

Zusätzlich zu dieser Messanordnung wurden noch andere Positionen der Schirmbleche überlegt und deshalb messtechnisch erfasst. Der Messabstand wurde bei diesen Messungen so festgelegt, dass er der Fußbodenoberkante im Fahrzeug entspricht.

Da für das Projekt zwei Eingangsfiltervarianten mit unterschiedlichen Drosselinduktivitäten möglich wären, wird die DC-Drosselfeldmessung für die größere der beiden Netzdrosseln durchgeführt. Dies entspricht dem Worst Case, weil der maximale DC-Netzstrom unabhängig von der Netzdrosselinduktivität ist, die größere Induktivität aber ein größeres magnetisches Feld generiert. Die AC-Drosselfeldmessung wird für beide Drosselgrößen durchgeführt, weil die auftretenden Netzharmonischen von der Netzdrossel mitbestimmt werden. Die beiden Netzdrosseln



unterscheiden sich nur durch die axiale Ausdehnung, womit der Messaufbau und die Messabstände für beide Varianten gültig sind.

Bei der Messung unberücksichtigt blieben die Einflüsse der Fahrzeugstruktur und des Stromrichtergehäuses. Dieser Umstand bedeutet ebenfalls eine Reserve für die Fahrzeugmessung, da sowohl Fahrzeugstruktur und Stromrichtergehäuse eine schirmende Wirkung, zumindest für das AC-Magnetfeld, besitzen.

### 10.2.1.2 Drossel Daten

#### Daten Netzdrossel 2mH

**L:** 2 mH (Wert bei 50 Hz)

**R<sub>20</sub>:** 12,4 mΩ

#### Daten Netzdrossel 3mH

**L:** 3 mH (Wert bei 50 Hz)

**R<sub>20</sub>:** 14,4 mΩ

### 10.2.1.3 Messequipment

Es wurde ein Magnetfeldmessgerät nach EN 50500 eingesetzt.

Geräteart	Typ/Modell	Hersteller
Chassis	PXI 1033	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
AC-Feld-Erfassung	50.20.1	Eigenbau
AC-Feld-Erfassung	50.20.2	Eigenbau
DC-Feld-Erfassung	880	Wuntronic
DC-Feld-Erfassung	881	Wuntronic
Laptop	Celsius H700	Fujitsu/Siemens

#### DC-Feld:

Aus den drei Richtungskomponenten des DC-Feldes wird der Feldvektor gebildet.  
Das Messgerät liefert einen DC-Messwert in  $\mu\text{T}$ .

#### AC-Feld:

Die Auswertung basiert auf einer FFT des gemessenen zeitlichen Verlaufs.

#### FFT Parameter:

Fenster-Funktion: .....Hanning

Messzeit: .....500 ms

Sampling Frequenz: .....49152 Hz

Aus den drei Richtungskomponenten des AC-Feldes wird der Feldvektor ohne Berücksichtigung der Phasenverschiebung gebildet (= Worst Case).

Die mit dem Grenzwert bewerteten Spektralkomponenten der FFT werden linear summiert (entsprechend EN 50500 werden Spektrallinien unter einem Wert von 10% des Grenzwertes nicht berücksichtigt).

Das Messgerät liefert einen Messwert in % des Grenzwertes der ICNIRP Richtlinie. Ein Auslesen der Induktionswerte (in  $\mu\text{T}$ ) für jede einzelne Frequenz ist ebenfalls möglich.

Es wird der zeitliche Verlauf des Feldes, getrennt für jede Raumachse, mit aufgezeichnet. Damit sind unterschiedlichste Offline-Auswertungen möglich.

#### 10.2.1.4 Messaufbau

Die Messungen wurden im Labor durchgeführt.

Die Messaufbauten entsprechend der Abbildung 10-17, Abbildung 10-18 und Abbildung 10-19 wurden dazu hergestellt. Die Messschaltung für das DC-Magnetfeld zeigt Abbildung 10-15, die für das AC-Magnetfeld zeigt Abbildung 10-16.

Elektrische Schaltung DC-Magnetfeldmessung:

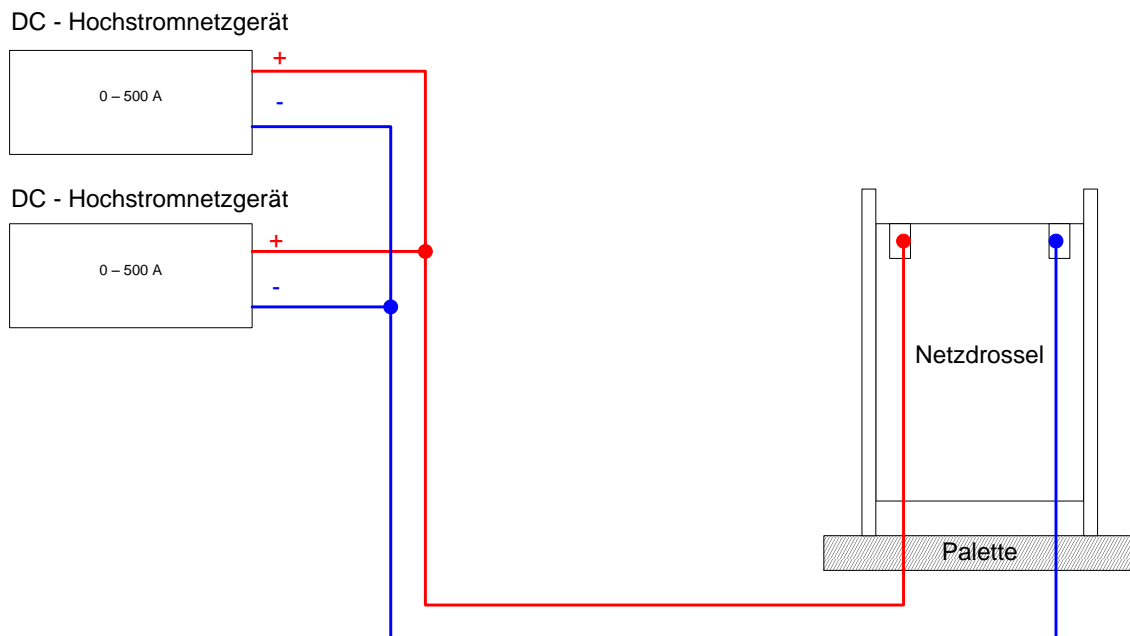
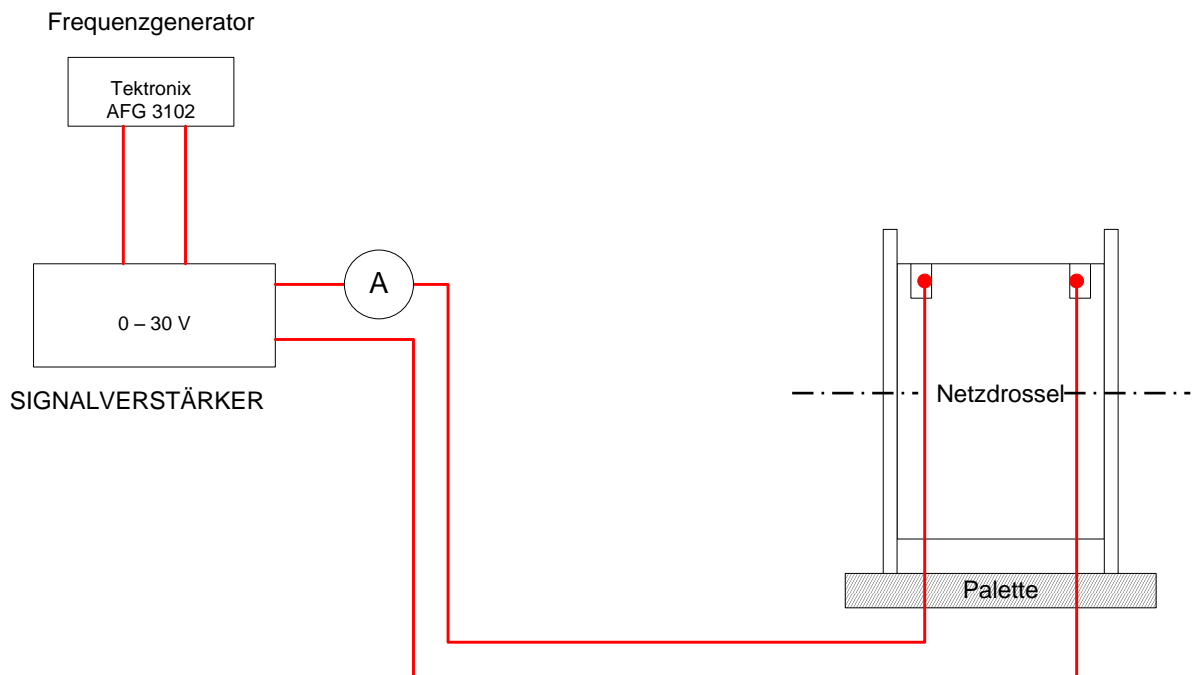


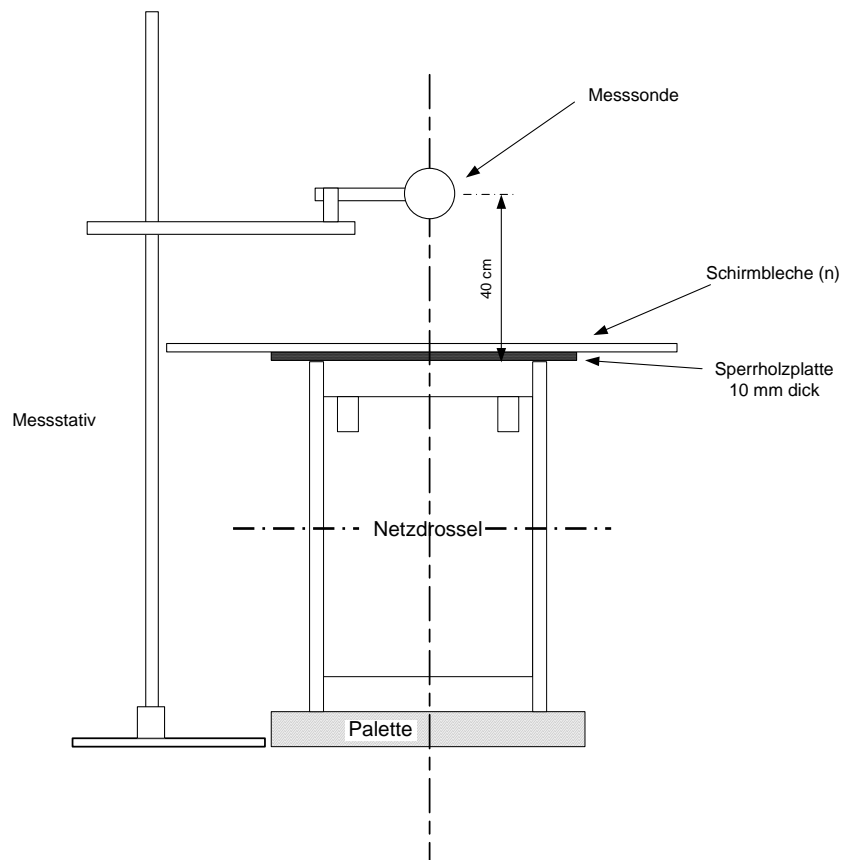
Abbildung 10-15: Netzdrossel, Messschaltung DC-Magnetfeld

Elektrische Schaltung AC-Magnetfeld Messung:



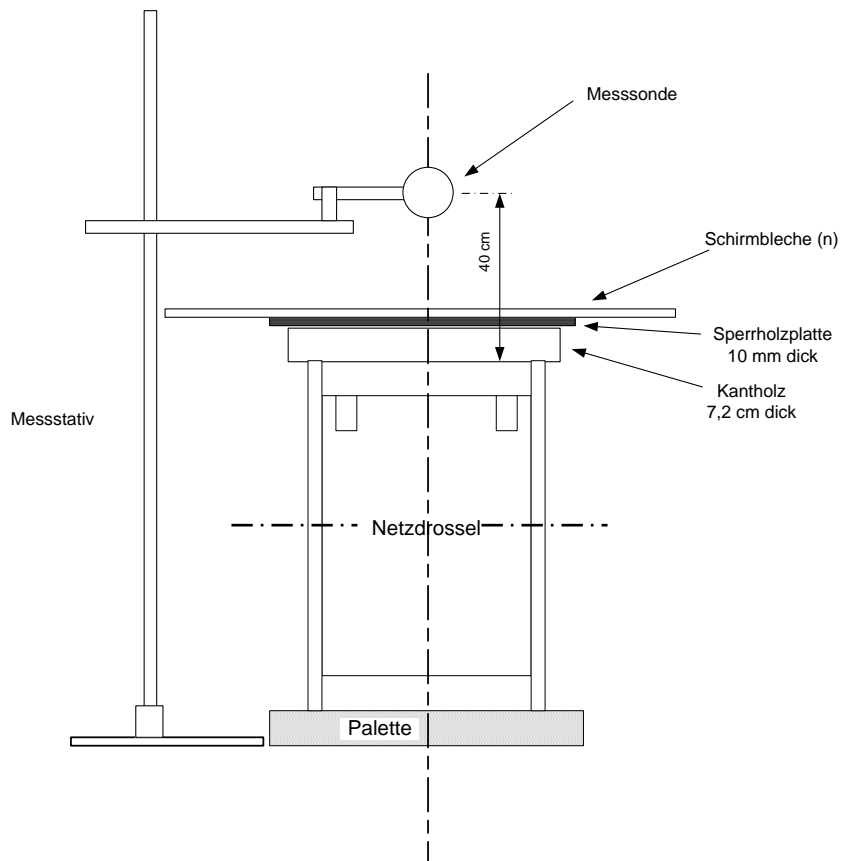
**Abbildung 10-16: Netz-drossel, Messschaltung AC-Magnetfeld**

Messaufbau mechanisch, mit 1 cm Distanzierung der Schirmbleche:

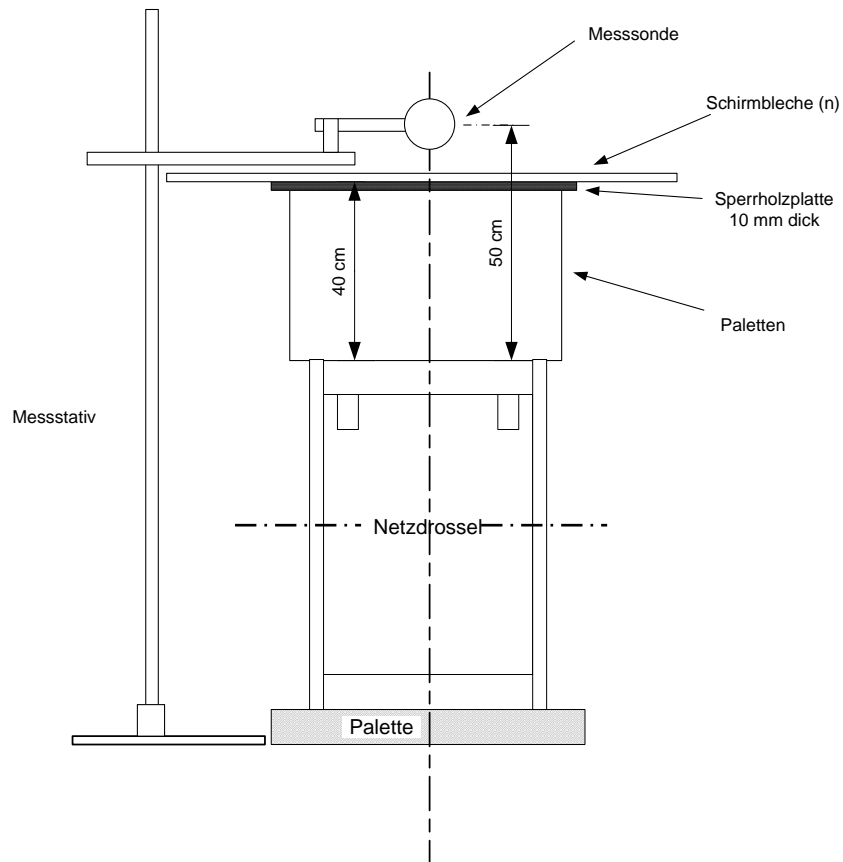


**Abbildung 10-17: Netz-drossel, Messaufbau 1**

Messaufbau mechanisch, mit 8,2 cm Distanzierung der Schirmbleche:

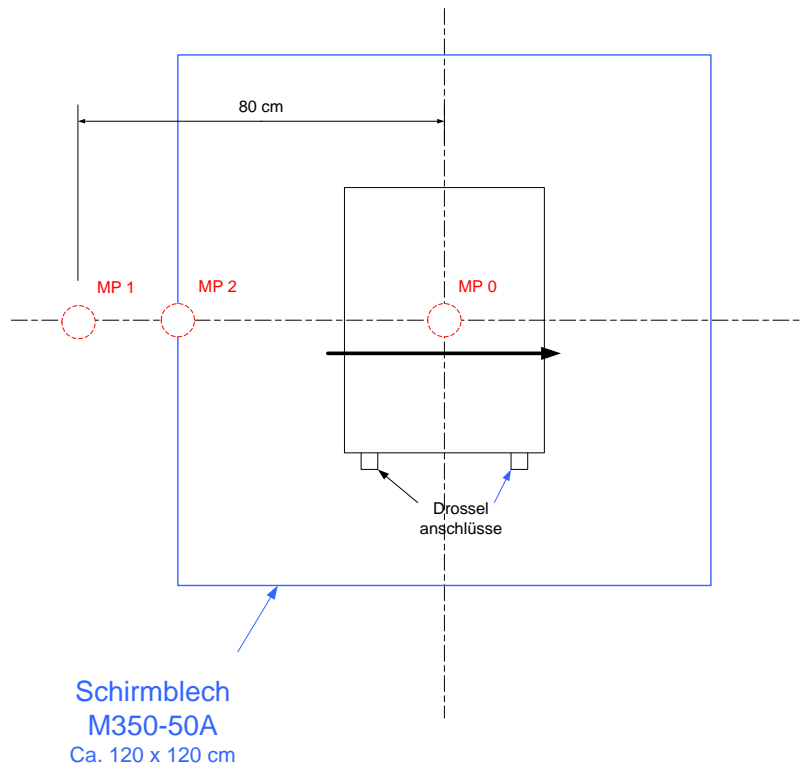


**Abbildung 10-18: Netz-drossel, Messaufbau 2**

Messaufbau mechanisch, mit 40 cm Distanzierung der Schirmbleche:**Abbildung 10-19: Netzdrossel, Messaufbau 3**

Messpunkte:

Die Abbildung 10-20 zeigt die Draufsicht auf den jeweiligen Messaufbau. Die Messpunkte MP 0 bis MP 2 befinden sich daher alle auf der selben Messhöhe, entsprechend den Angaben in Abbildung 10-17, Abbildung 10-18 und Abbildung 10-19.



**Abbildung 10-20: Netzdrossel, Messpunkte**

### 10.2.1.5 Daten Schirmblech

Für die Messung wurde folgendes Schirmblech verwendet:  
Elektroblech M350-50A, 0,5 mm dick.

Es wurden Messungen mit unterschiedlicher Anzahl von Blechlagen durchgeführt.

### 10.2.1.6 Flussdichte Grenzwerte

DC Magnetfeld Grenzwert lt. Kundenforderung:

- 1 mT von 0 bis 0,6 m Abstand von der Fahrzeugfußbodenoberkante.
- 0,5 mT bei einem Abstand >0,6 m vom Fahrzeugfußboden.

AC Magnetfeld Grenzwerte lt. ICNIRP Richtlinie (1998):

Die Abbildung 10-21 und die Tabelle 10-27 zeigen die ICNIRP 1998 Grenzwerte für das Magnetfeld.

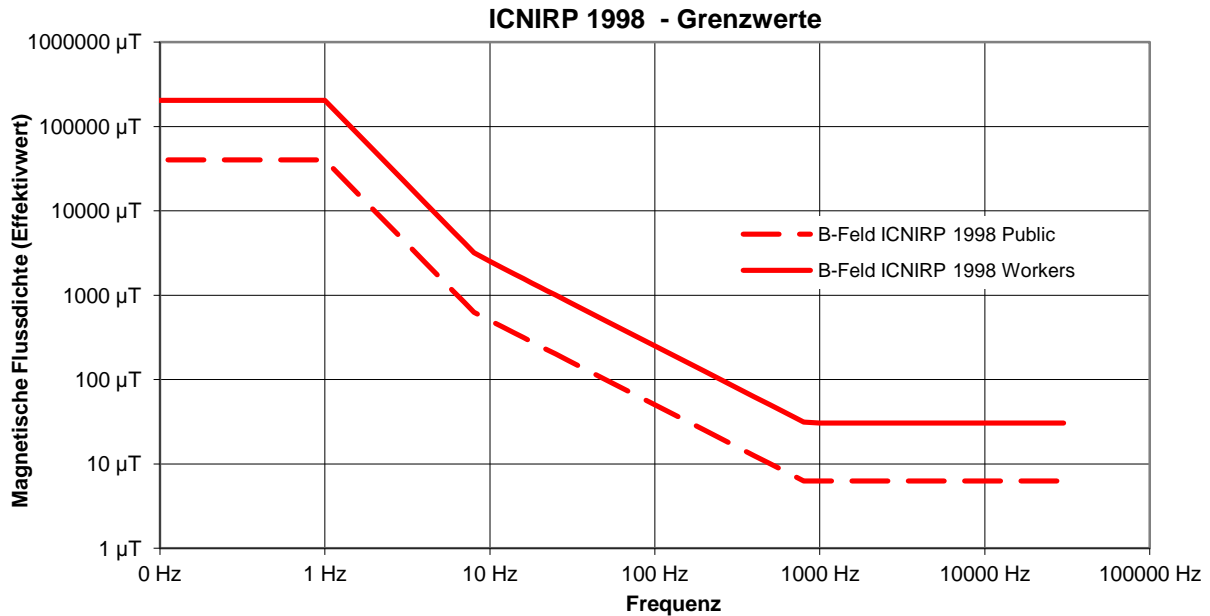


Abbildung 10-21: ICNIRP 1998, Grenzwerte

ICNIRP-Grenzwert:

Frequenz	ICNIRP Public (Effektivwerte)	ICNIRP Workers (Effektivwerte)
300 Hz	16,76 µT	83,78 µT
500 Hz	10,05 µT	50,27 µT
1000 Hz	6,28 µT	30,66 µT
2000 Hz	6,28 µT	30,66 µT
3000 Hz	6,28 µT	30,66 µT
4000 Hz	6,28 µT	30,66 µT
5000 Hz	6,28 µT	30,66 µT
10000 Hz	6,28 µT	30,66 µT
20000 Hz	6,28 µT	30,66 µT

Tabelle 10-27: ICNIRP 1998 Magnetfeldgrenzwerte (300 Hz bis 20 kHz)

### 10.2.1.7 Messergebnisse

**AC – Feldmessung 2 mH Drossel; Schirmblech 40 cm von der Drosseloberkante distanziert**

Anordnung siehe Pkt.10.2.1.4

Die in der Netzdrossel maßgeblich auftretenden AC-Ströme sind jene, die durch den Netzgleichrichter verursacht werden. Unter der Annahme, dass ein 6-puls-Gleichrichter bei einer Netzfrequenz von 50 Hz zum Einsatz kommen wird, ergeben sich für die Netzharmonischen Vielfache von 300 Hz (Unsymmetrien bleiben unberücksichtigt). Die bei den einzelnen Frequenzen angegebenen Stromwerte sind die bei der angegebenen Frequenz mit dem zur Verfügung stehenden Messequipment maximal erreichbaren Ströme. Die Ströme und damit die Flussdichte wird entsprechend den zu erwartenden Strömen später korrigiert.

Die Tabelle 10-28 und die Abbildung 10-22 zeigen die Messergebnisse der AC-Messung der 2 mH Netzdrossel.

Messpunkt	Anzahl d. Bleche	Frequenz in Hz	Strom in A	Flussdichte in $\mu\text{T}$
0	0	300	6,82	16,36
0	0	600	3,68	8,094
0	0	900	2,58	5,4
0	0	1200	1,99	4,083
0	0	1500	1,63	3,29
0	0	1800	1,39	2,76
0	0	2100	1,21	2,38
0	0	2400	1,07	2,1
0	0	2700	0,96	1,87
0	0	3000	0,87	1,69
1	0	300	6,82	8,84
2	0	300	6,82	10,5
0	10	300	6,82	1,72
0	10	600	3,68	0,929
0	10	900	2,57	0,655
0	10	1200	1,99	0,51
0	10	1500	1,63	0,426
0	10	1800	1,39	0,367
0	10	2100	1,21	0,324
0	10	2400	1,07	0,291
0	10	2700	0,96	0,266
0	10	3000	0,87	0,245
1	10	300	6,82	5,38
2	10	300	6,82	5,6

Tabelle 10-28: Netzdrossel 2mH, Messergebnisse AC-Magnetfeld

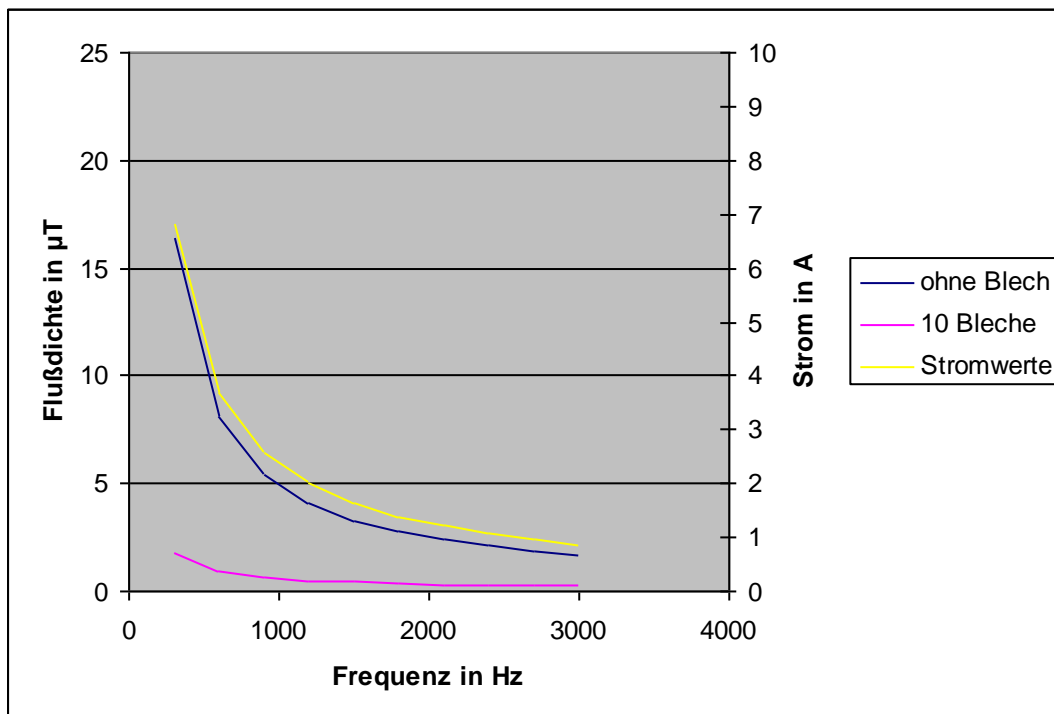


Abbildung 10-22: Netzdrossel 2mH, AC-Magnetfeld



ICNIRP-Bewertung:

Für die endgültige ICNIRP-Bewertung der Messergebnisse wurden die Ströme der einzelnen Frequenzen auf die zu erwartenden Werte der Netzharmonischen (Berechnung für typischen 6-puls Gleichrichter) umgerechnet und das magnetische Feld entsprechend korrigiert. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 10-29.

Messpunkt	Anzahl d. Bleche	Frequenz in Hz	Strom in A	I 6 puls in A	Flussdichte in $\mu\text{T}$	Flussdichte auf 6 puls Strom umger. in $\mu\text{T}$	ICNIRP-Grenzwert in $\mu\text{T}$	auf ICNIRP bezogen	Aufsummierung	10% Kriterium	Aufsummierung 10% Kriterium
0	0	300	6,82	11,5425	16,36	27,69	16,76	1,652		1,652	
0	0	600	3,68	1,7360	8,094	3,82	8,38	0,456		0,456	
0	0	900	2,58	0,5315	5,4	1,11	6,28	0,177		0,177	
0	0	1200	1,99	0,2413	4,083	0,49	6,28	0,079		0,000	
0	0	1500	1,63	0,1745	3,29	0,35	6,28	0,056		0,000	
0	0	1800	1,39	0,1435	2,76	0,28	6,28	0,045		0,000	
0	0	2100	1,21	0,1118	2,38	0,22	6,28	0,035		0,000	
0	0	2400	1,07	0,0828	2,1	0,16	6,28	0,026		0,000	
0	0	2700	0,96	0,0585	1,87	0,11	6,28	0,018		0,000	
0	0	3000	0,87	0,0435	1,69	0,08	6,28	0,013	<b>2,558</b>	0,000	<b>2,285</b>
1	0	300	6,82	11,5425	8,84	14,96	16,76	0,893		0,893	
2	0	300	6,82	11,5425	10,5	17,77	16,76	1,060		1,060	
0	10	300	6,82	11,5425	1,72	2,91	16,76	0,174		0,174	
0	10	600	3,68	1,7360	0,929	0,44	8,38	0,052		0,000	
0	10	900	2,57	0,5315	0,655	0,14	6,28	0,022		0,000	
0	10	1200	1,99	0,2413	0,51	0,06	6,28	0,010		0,000	
0	10	1500	1,63	0,1745	0,426	0,05	6,28	0,007		0,000	
0	10	1800	1,39	0,1435	0,367	0,04	6,28	0,006		0,000	
0	10	2100	1,21	0,1118	0,324	0,03	6,28	0,005		0,000	
0	10	2400	1,07	0,0828	0,291	0,02	6,28	0,004		0,000	
0	10	2700	0,96	0,0585	0,266	0,02	6,28	0,003		0,000	
0	10	3000	0,87	0,0435	0,245	0,01	6,28	0,002	<b>0,284</b>	0,000	<b>0,174</b>
1	10	300	6,82	11,5425	5,38	9,11	16,76	0,543		0,543	
2	10	300	6,82	11,5425	5,6	9,48	16,76	0,565		0,565	

Tabelle 10-29: Netzdrossel 2mH, Messergebnisse AC-Magnetfeld (Netzharmonische)

Bei 10 Schirmblechen ergibt sich das ICNIRP-bewertete Feld im Messpunkt 0 zu **28,4 %**.

Wird das 10 %-Kriterium angewandt, liegt der ICNIRP Wert für den gleichen Punkt bei **17,4%**.

Bei den Messpunkten am Rand und außerhalb des Schirmbleches erhöht sich der ICNIRP Wert entsprechend.

**DC – Feldmessung 3 mH Drossel; Schirmblech 1 cm von der Drosseloberkante distanziert**  
Anordnung siehe Pkt.10.2.1.4. Messergebnisse in Tabelle 10-30 und Abbildung 10-23.

Messpunkt	Anzahl d. Bleche	Flussdichte in $\mu\text{T}$ bei		
		500 A	750 A	1000 A
0	0	1882	2853	a.M.
0	1	1493	2445	a.M.
0	2	1149	2071	a.M.
0	3	855	1728	2657
0	4	638	1423	2302
0	5	458	1167	1984
0	6	300	948	1702
0	7	169	765	1464
0	8	77	601	1262
0	9	57	447	1069
0	10	52	309	898
0	11	53	197	735
0	12	53	115	585
0	13	53	82	450

a.M.....außerhalb des Messbereichs

Tabelle 10-30: Netzdrossel 3mH, Messergebnisse DC-Magnetfeld(1)

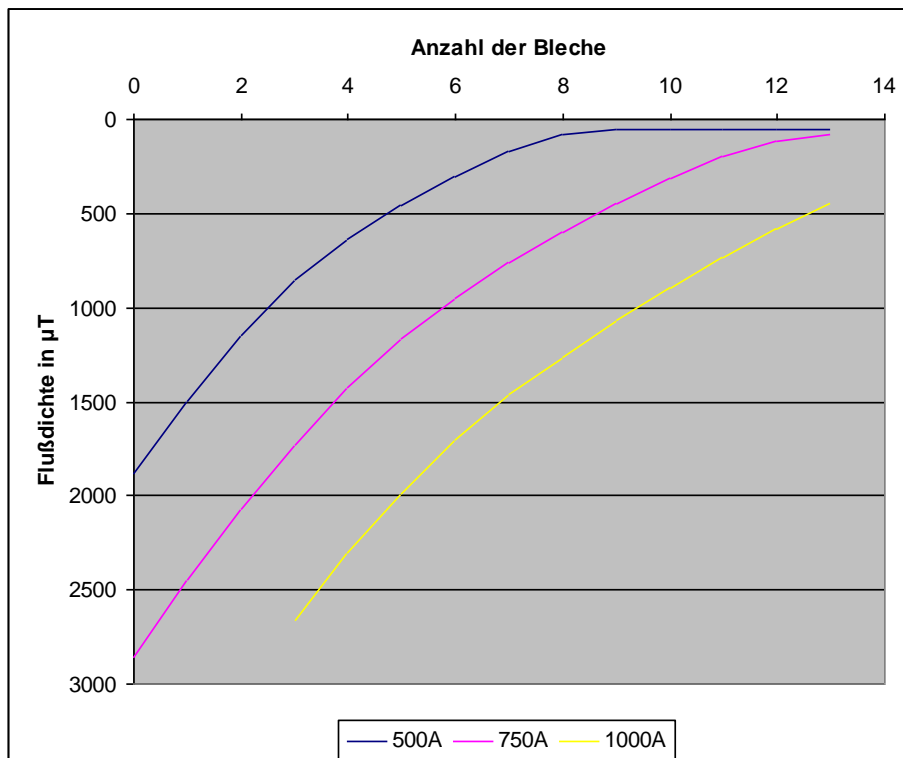


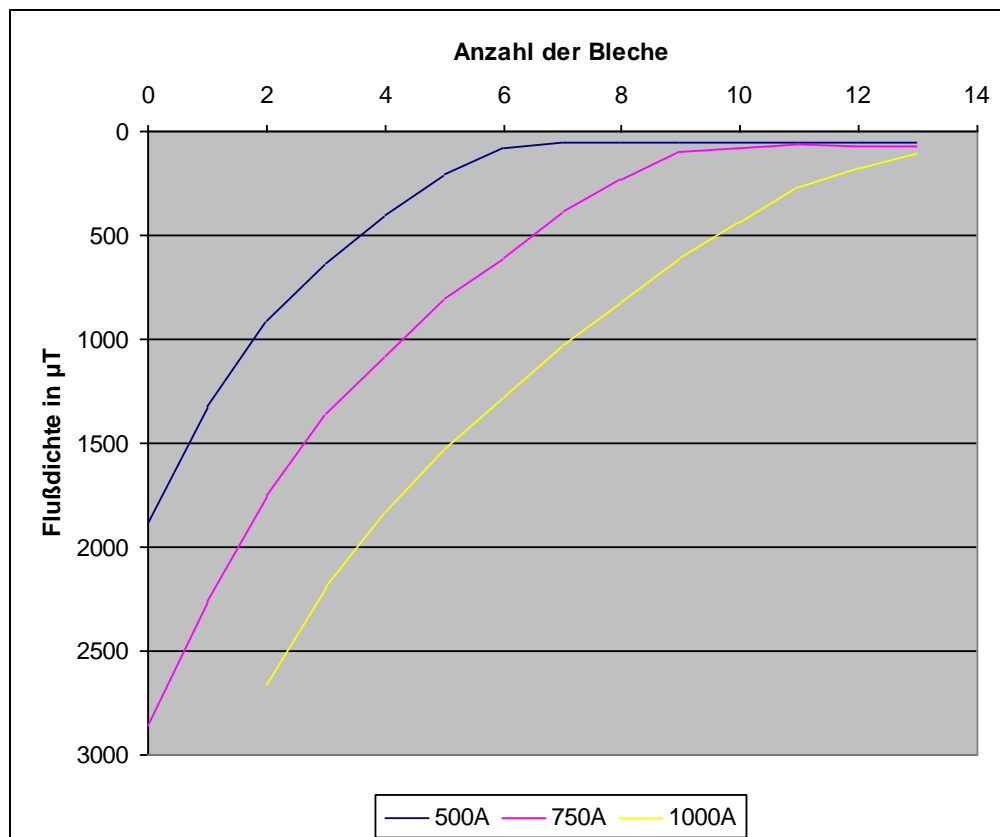
Abbildung 10-23: Netzdrossel 3mH, DC-Magnetfeld(1)

**DC – Feldmessung 3 mH Drossel; Schirmblech 8,2 cm von Drosseloberkante distanziert**  
Anordnung siehe Pkt.10.2.1.4. Messergebnisse in Tabelle 10-31 und Abbildung 10-24.

Messpunkt	Anzahl d. Bleche	Flussdichte in $\mu\text{T}$ bei		
		500 A	750 A	1000 A
0	0	1882	2853	a.M.
0	1	1321	2258	a.M.
0	2	914	1749	2661
0	3	634	1355	2188
0	4	401	1081	1834
0	5	208	807	1524
0	6	84	609	1281
0	7	56	382	1026
0	8	53	235	819
0	9	54	97	603
0	10	55	83	438
0	11	55	62	269
0	12	53	72	181
0	13	56	70	111

a.M. ....außerhalb des Messbereichs

**Tabelle 10-31: Netzdrossel 3mH, Messergebnisse DC-Magnetfeld(2)**



**Abbildung 10-24: Netzdrossel 3mH, DC-Magnetfeld(2)**

**DC – Feldmessung 3 mH Drossel; Schirmblech 40 cm von Drosseloberkante distanziert**  
Anordnung siehe Pkt.10.2.1.4. Messergebnisse in Tabelle 10-32 und Abbildung 10-25.

Messpunkt	Anzahl d. Bleche	Flussdichte in $\mu\text{T}$ bei		
		500 A	750 A	1000 A
0	0	1445	2193	2956
0	1	777	1449	2150
0	2	251	869	1539
0	3	33	384	1014
0	4	24	25	522
0	5	22	18	170
0	6	22	18	74
0	7	17	18	60
0	8			56
0	9			50
0	10			50
1	4	-	-	600
1	5	-	-	650
1	6	-	-	668
1	7	-	-	680
1	10	-	-	446
2	5	-	-	280
2	6	-	-	413
2	7	-	-	373

**Tabelle 10-32: Netzdrossel 3mH, Messergebnisse DC-Magnetfeld(3)**

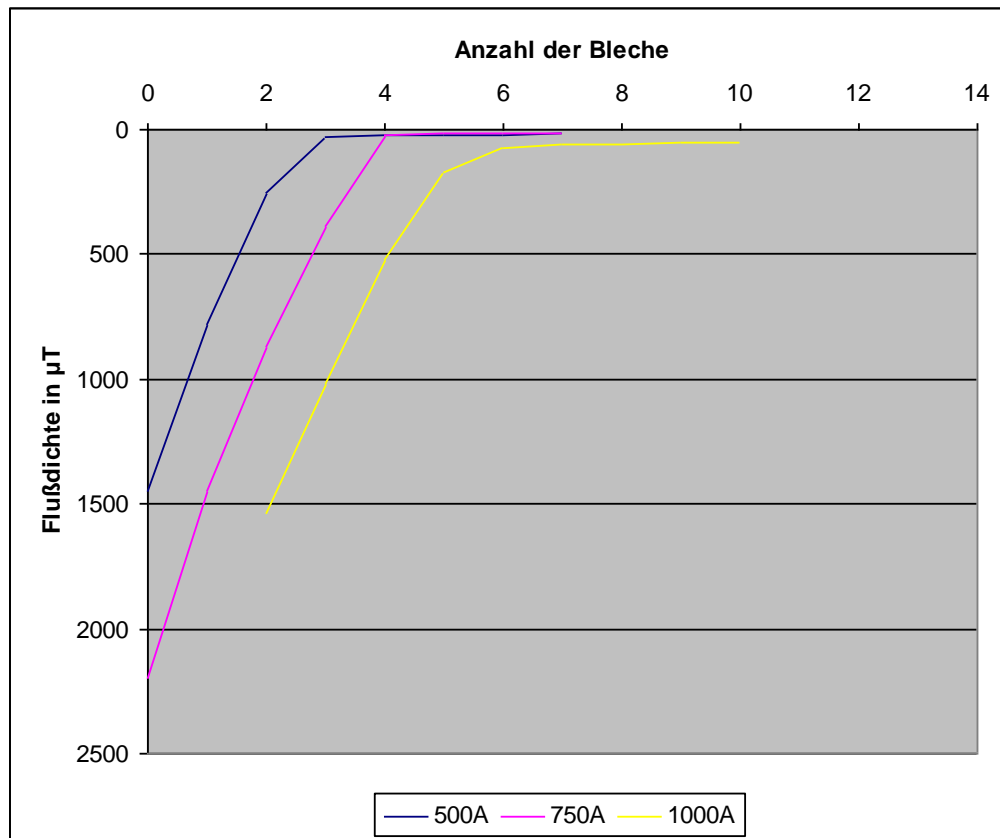


Abbildung 10-25: Netzdrossel 3mH, DC-Magnetfeld(3)

Der am Fahrzeug maximal auftretende Strom beträgt 1570 A. Mit dem zur Verfügung stehenden Messequipment konnte jedoch nur ein maximaler Strom von 1000 A erreicht werden.

Wir gehen jedoch davon aus, dass, wenn bei 1000 A bereits mit 3 Blechen der Grenzwert an Messpunkt 0 nur knapp nicht eingehalten wird, der Grenzwert bei Erhöhung des Stromes um den Faktor 1,4 und einer Verdreifachung der Schirmblechanzahl, auch bei 1570 A (DC) der Grenzwert von 1 mT eingehalten wird.

Bei Messpunkt 1 ist mit einer nahezu linearen Zunahme des Feldes bei Erhöhung des Stromes um Faktor 1,5 zu rechnen. Der Wert liegt noch unter dem geforderten Grenzwert – vor allem ist wie in Pkt. 10.2.1.1 beschrieben, am Fahrzeug ein größeres Schirmblech als bei der gegenständlichen Messung vorgesehen.

**AC – Feldmessung 3 mH Drossel; Schirmblech 40 cm von Drosseloberkante distanziert**

Anordnung siehe Pkt.10.2.1.4. Messergebnisse in Tabelle 10-33 und Abbildung 10-26.

Die in der Netzdrossel maßgeblich auftretenden Ströme sind jene, die durch den Netzgleichrichter verursacht werden. Unter der Annahme, dass ein 6-puls-Gleichrichter bei einer Netzfrequenz von 50 Hz zum Einsatz kommen wird, ergeben sich für die Netzharmonischen Vielfache von 300 Hz (Unsymmetrien bleiben unberücksichtigt). Die bei den einzelnen Frequenzen angegebenen Stromwerte sind die, bei der angegebenen Frequenz mit dem zur Verfügung stehenden Messequipment, maximal erreichbaren Ströme. Die Ströme und damit die Flussdichte wird entsprechend den zu erwartenden Strömen später korrigiert.

Messpunkt	Anzahl d. Bleche	Frequenz in Hz	Strom in A	Flussdichte in $\mu\text{T}$
0	0	300	6,81	19,6
0	0	600	3,83	9,93
0	0	900	2,74	6,73
0	0	1200	2,18	5,2
0	0	1500	1,85	4,35
0	0	1800	1,62	3,75
0	0	2100	1,43	3,3
0	0	2400	1,29	2,95
0	0	2700	1,17	2,67
0	0	3000	1,08	2,45
1	0	300	6,81	9
2	0	300	6,81	12
0	10	300	6,8	2,12
0	10	600	3,83	1,2
0	10	900	2,74	0,87
0	10	1200	2,18	0,7
0	10	1500	1,85	0,615
0	10	1800	1,62	0,547
0	10	2100	1,44	0,494
0	10	2400	1,29	0,452
0	10	2700	1,18	0,419
0	10	3000	1,08	0,39
1	10	300	6,8	5,28
2	10	300	6,8	4,7

Tabelle 10-33: Netzdrossel 3mH, Messergebnisse AC-Magnetfeld

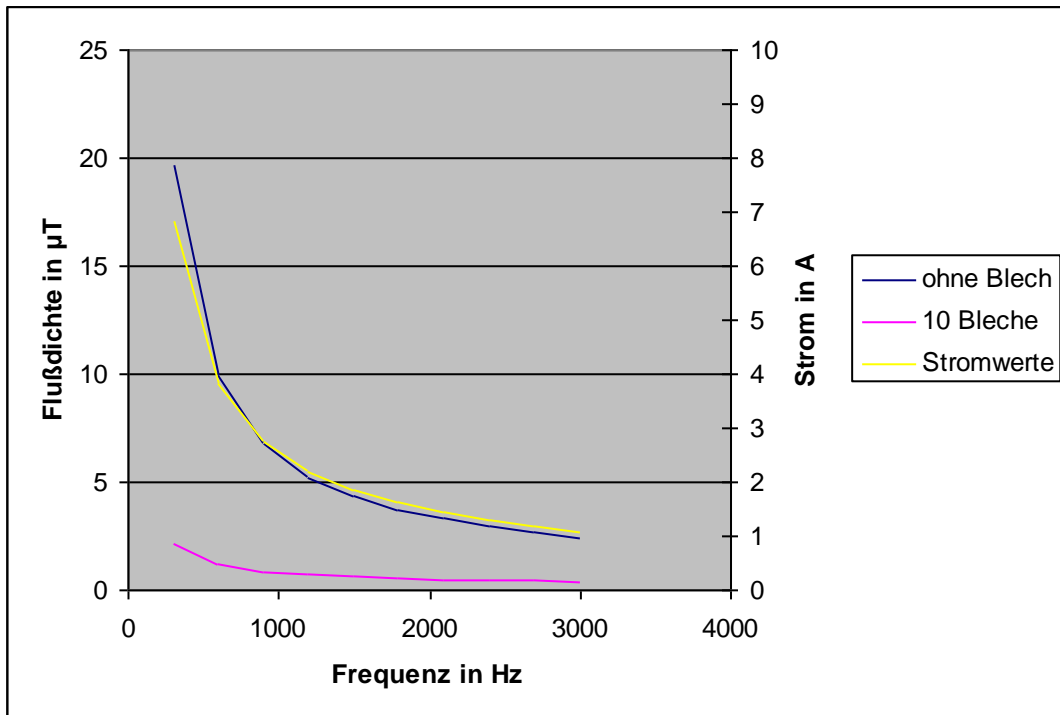


Abbildung 10-26: Netzdrossel 3mH, AC-Magnetfeld

ICNIRP-Bewertung:

Für die endgültige ICNIRP-Bewertung der Messergebnisse wurden die Amplitude der einzelnen Frequenzen auf die Werte aus der Simulation umgerechnet und das magnetische Feld entsprechend korrigiert. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 10-34.

Messpunkt	Anzahl d. Bleche	Frequenz in Hz	Strom in A	I 6 puls in A	Flussdichte in $\mu\text{T}$	Flussdichte auf 6 puls Strom umger. in $\mu\text{T}$	ICNIRP-Grenzwert in $\mu\text{T}$	Auf ICNIRP bezogen	Aufsummierung	10% Kriterium	Aufsummierung 10% Kriterium
0	0	300	6,81	7,7720	19,6	22,37	16,76	1,335		1,335	
0	0	600	3,83	1,1698	9,93	3,03	8,38	0,362		0,362	
0	0	900	2,74	0,3578	6,73	0,88	6,28	0,140		0,140	
0	0	1200	2,18	0,1625	5,2	0,39	6,28	0,062		0,000	
0	0	1500	1,85	0,1180	4,35	0,28	6,28	0,044		0,000	
0	0	1800	1,62	0,0970	3,75	0,22	6,28	0,036		0,000	
0	0	2100	1,43	0,0755	3,3	0,17	6,28	0,028		0,000	
0	0	2400	1,29	0,0558	2,95	0,13	6,28	0,020		0,000	
0	0	2700	1,17	0,0395	2,67	0,09	6,28	0,014		0,000	
0	0	3000	1,08	0,0293	2,45	0,07	6,28	0,011	<b>2,051</b>	0,000	<b>1,836</b>
1	0	300	6,81	7,7720	9	10,27	16,76	0,613		0,613	
2	0	300	6,81	7,7720	12	13,70	16,76	0,817		0,817	
0	10	300	6,8	7,7720	2,12	2,42	16,76	0,145		0,145	
0	10	600	3,83	1,1698	1,2	0,37	8,38	0,044		0,000	
0	10	900	2,74	0,3578	0,87	0,11	6,28	0,018		0,000	
0	10	1200	2,18	0,1625	0,7	0,05	6,28	0,008		0,000	
0	10	1500	1,85	0,1180	0,615	0,04	6,28	0,006		0,000	
0	10	1800	1,62	0,0970	0,547	0,03	6,28	0,005		0,000	
0	10	2100	1,44	0,0755	0,494	0,03	6,28	0,004		0,000	
0	10	2400	1,29	0,0558	0,452	0,02	6,28	0,003		0,000	
0	10	2700	1,18	0,0395	0,419	0,01	6,28	0,002		0,000	
0	10	3000	1,08	0,0293	0,39	0,01	6,28	0,002	<b>0,237</b>	0,000	<b>0,145</b>
1	10	300	6,8	7,7720	5,28	6,03	16,76	0,360		0,360	
2	10	300	6,8	7,7720	4,7	5,37	16,76	0,321		0,321	

Tabelle 10-34: Netzdrossel 3mH, Messergebnisse AC-Magnetfeld (Netzharmonische)

Bei 10 Schirmblechen ergibt sich das ICNIRP-bewertete Feld im Messpunkt 0 zu **23,7 %**.  
Wird das 10 %-Kriterium angewandt, liegt der ICNIRP Wert für den gleichen Punkt bei **14,5%**.



### 10.2.1.8 Zusammenfassung

Aufgrund der Messergebnisse kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass bei Verwendung von 10 Stück Elektroblechen die geforderten Grenzwerte eingehalten werden.

Als neuralgische Punkte wurden die Punkte am Rand des Schirmbleches identifiziert. Diese Punkte sind am Prüffeldaufbau noch genauer zu untersuchen.

Ein Prüffeldaufbau, der die Situation wie am Fahrzeug möglichst gut abbildet, wird schon deshalb erforderlich sein, weil der Kunde selbst Messungen der Feldstärke am Aufbau vornehmen will.

## 10.2.2 Traktionsstromrichter am Prüffeldaufbau

### 10.2.2.1 Allgemein

Beim Traktionsstromrichter wird das niederfrequente Magnetfeld vor allem durch die Netzdrossel erzeugt.

Das DC-Magnetfeld wurde bei maximalem Netzstrom und damit unter Worst Case Bedingungen gemessen. Zum Vergleich wurde der Maximalwert des DC-Magnetfeldes während eines Fahrspieles ermittelt. Der Wechselanteil des Magnetfeldes kann aufgrund der geringen Amplituden vernachlässigt werden.

### 10.2.2.2 Grenzwerte

Die Grenzwerte sind Kundenanforderungen. Durch die Anwendung der EN 50500 wird der minimale Messabstand auf 30 cm über der Fußbodenoberkante festgelegt. Zusätzlich wurde noch bei 10 cm über der Fußbodenoberkante gemessen.

Grenzwert	Frequenz-Bereich	Angewendete Norm
1 mT (0 bis 60 cm)	DC	EN 50500
0,5 mT (darüber)	DC	EN 50500

Messergebnisse, die durch transiente Vorgänge beeinflusst werden, werden nicht berücksichtigt.

### 10.2.2.3 Messgerät

Es wurde ein Magnetfeldmessgerät nach EN 50500 eingesetzt.

Geräteart	Typ/Modell	Hersteller
Chassis	PXI 1033	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
AC-Feld-Erfassung	50.20.1	Eigenbau
AC-Feld-Erfassung	50.20.2	Eigenbau
DC-Feld-Erfassung	880	Wuntronic
DC-Feld-Erfassung	881	Wuntronic
Laptop	Celsius H700	Fujitsu/Siemens

**DC-Feld:**

Aus den drei Richtungskomponenten des DC-Feldes wird der Feldvektor gebildet.  
Das Messgerät liefert einen DC-Messwert in  $\mu\text{T}$ .

**AC-Feld:**

Die Auswertung basiert auf einer FFT des gemessenen zeitlichen Verlaufs.

**FFT Parameter:**

Fenster-Funktion: ..... Hanning

Messzeit: ..... 500 ms

Sampling Frequenz: ..... 49152 Hz

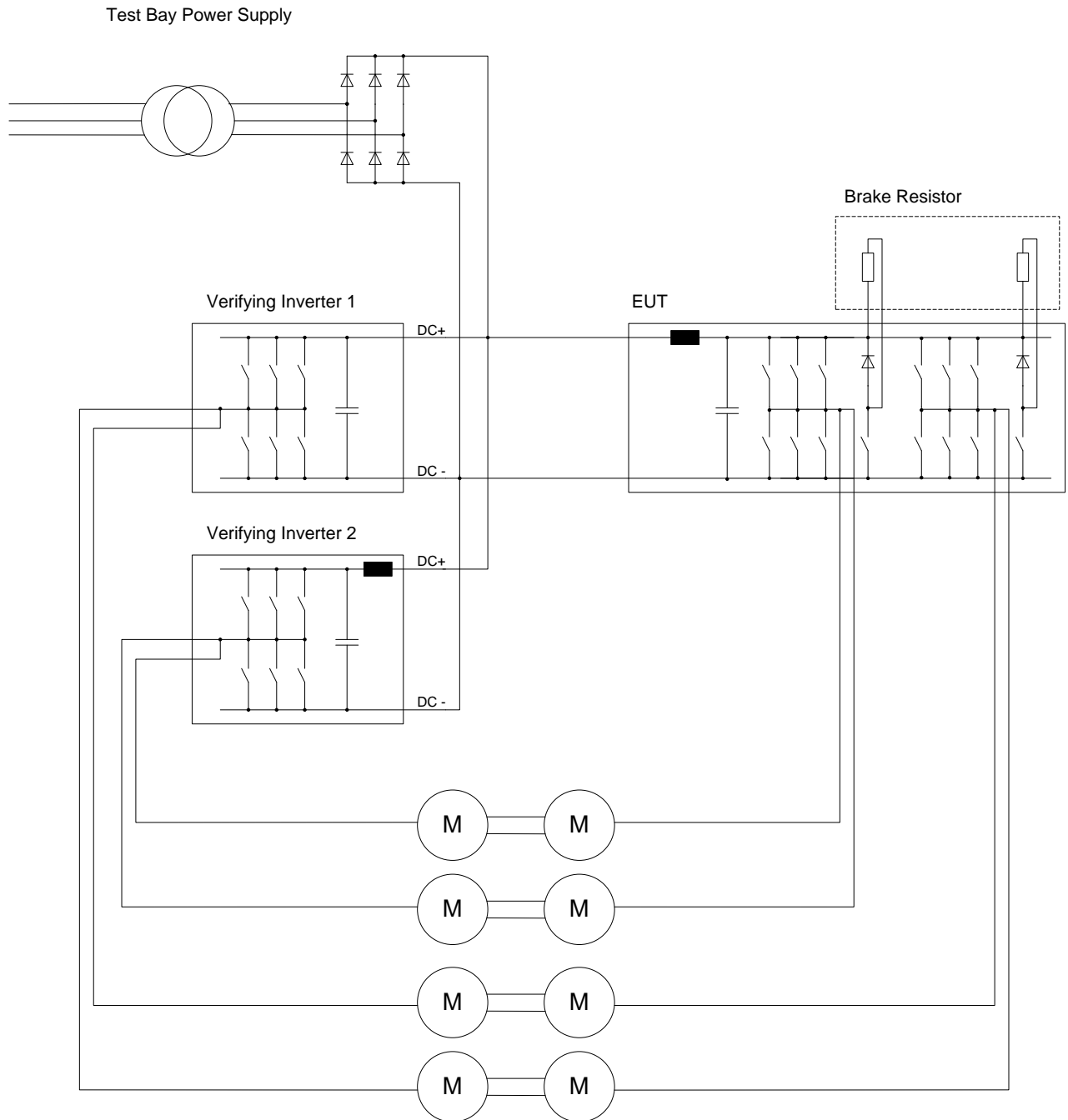
Aus den drei Richtungskomponenten des AC-Feldes wird der Feldvektor ohne Berücksichtigung der Phasenverschiebung gebildet (= Worst Case).

Die mit dem Grenzwert bewerteten Spektralkomponenten der FFT werden linear summiert (entsprechend EN 50500 werden Spektrallinien unter einem Wert von 10% des Grenzwertes nicht berücksichtigt).

Das Messgerät liefert einen Messwert in % des Grenzwertes der ICNIRP Richtlinie. Ein Auslesen der Induktionswerte (in  $\mu\text{T}$ ) für jede einzelne Frequenz ist ebenfalls möglich.

Es wird der zeitliche Verlauf des Feldes, getrennt für jede Raumachse, mit aufgezeichnet. Damit sind unterschiedlichste Offline-Auswertungen möglich.

### 10.2.2.4 Prüfaufbau



**Abbildung 10-27: Traktionsstromrichter, Prüfaufbau – schematisch**

Die Abbildung 10-27 zeigt die Schaltung des Prüfaufbaus für den Test des Traktionsstromrichters. Der Prüfaufbau besteht aus dem Prüfling (EUT) und aufgrund der Prüflings-Leistung, in diesem Fall, aus zwei Prüfer-Stromrichtern (Verifying Inverter). Die Prüfer-Stromrichter dienen entweder der simulierten Belastung (Fahrbetrieb) oder bilden die Dynamik des Fahrzeuges beim Bremsen nach. In beiden Fällen wird die Leistung über die verbundenen Zwischenkreise im Kreis transportiert. Vom Versorgungs-Netz (Gleichrichter) muss somit nur die Verlustleistung geliefert werden.

### 10.2.2.5 Messanordnung

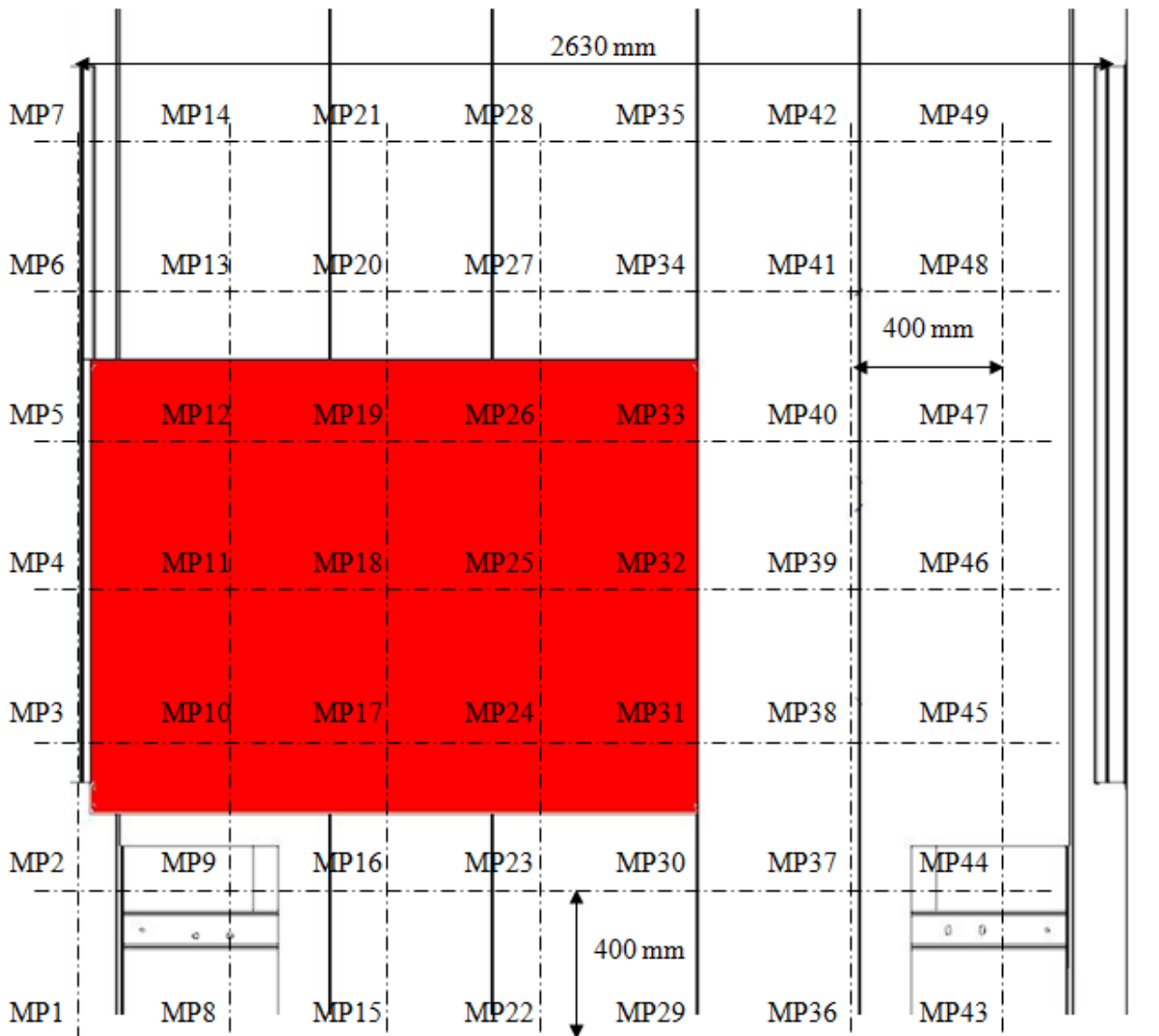
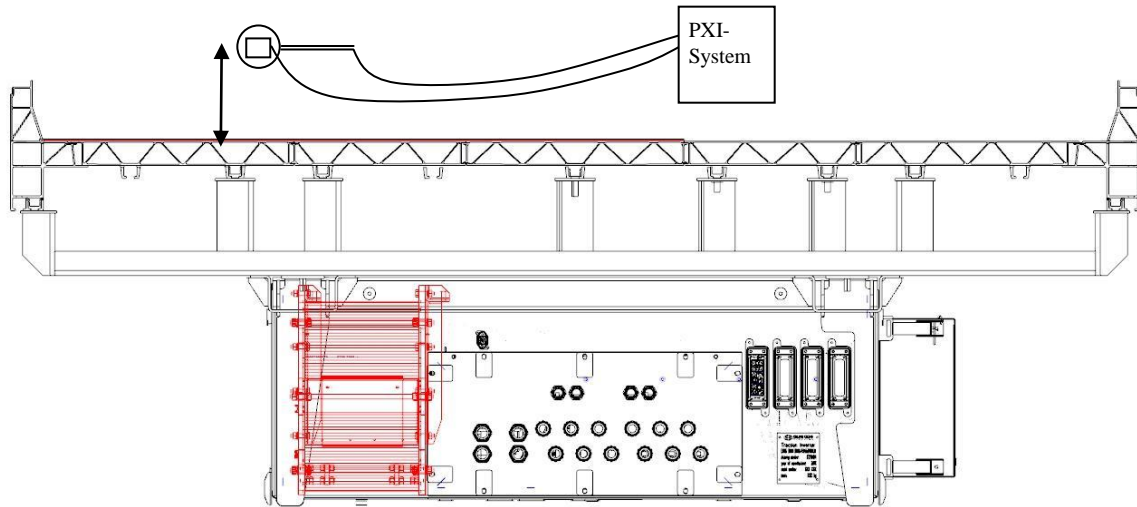


Abbildung 10-28: Traktionsstromrichter, Messanordnung

### 10.2.2.6 Messpunkte

Messraster: 40 cm x 40 cm; der Mittelpunkt der Messsonde liegt auf den Schnittpunkten des Rasters, 49 Messpunkte wie Abbildung 10-28 zeigt.

Die Messpunkte sind sowohl auf dem Schirmblech (Abbildung 10-30) als auch auf dem darunterliegenden Alu-Blech, das den Wagenkasten darstellt, markiert.

#### Messhöhe:

Entsprechend der EN 50500 ist die Messhöhe 30 cm über dem Fußboden, in diesem Fall 30 cm über den Schirmblechen.

#### Materialien:

Der Prüfaufbau (Abbildung 10-29) wurde so gestaltet, dass er so gut als möglich die tatsächliche Situation am Fahrzeug darstellt.

Die Aluminium-Sandwich Konstruktion des Wagenbodens wurde durch eine 5 mm dicke Alu-Platte nachgebildet.

#### Schirmbleche:

Material: M400-50

Anzahl: 10 Bleche mit je 0,5 mm Dicke

Abmessungen: Länge 160 cm, Breite 120

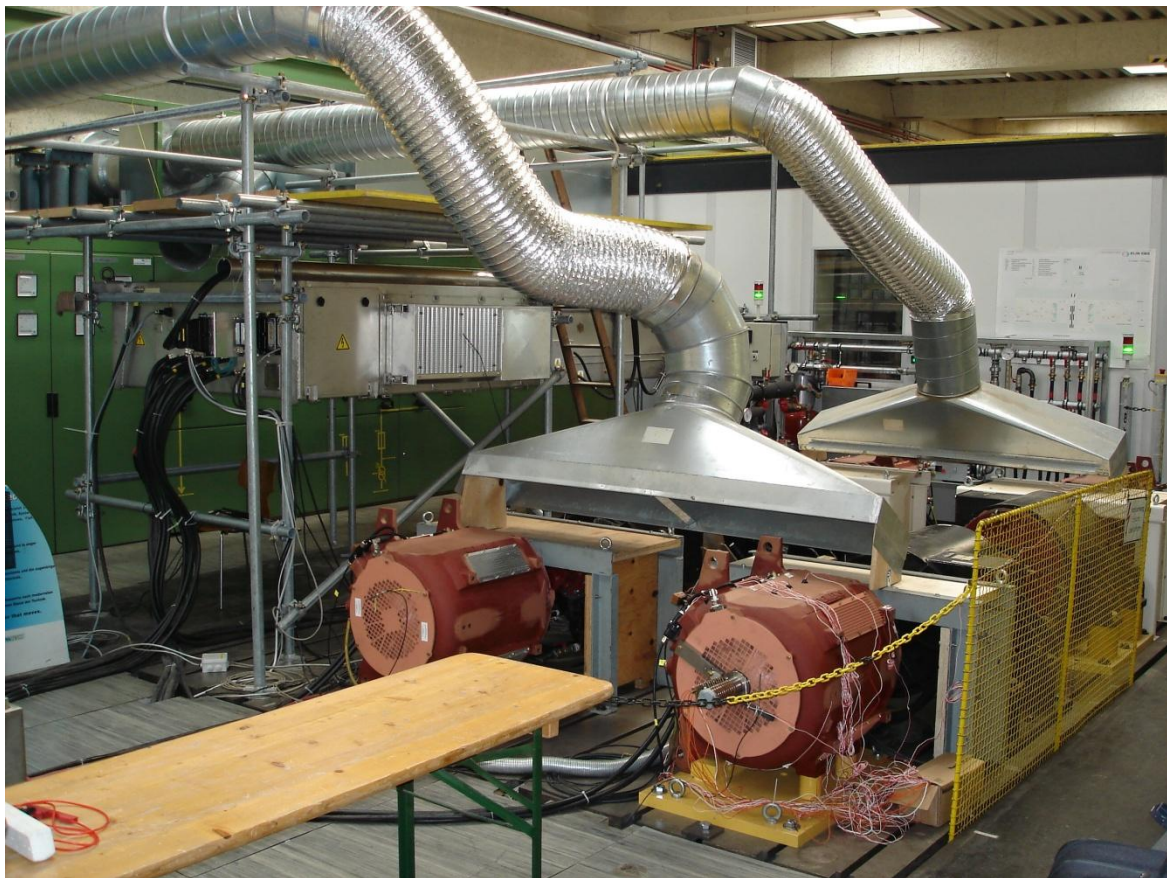
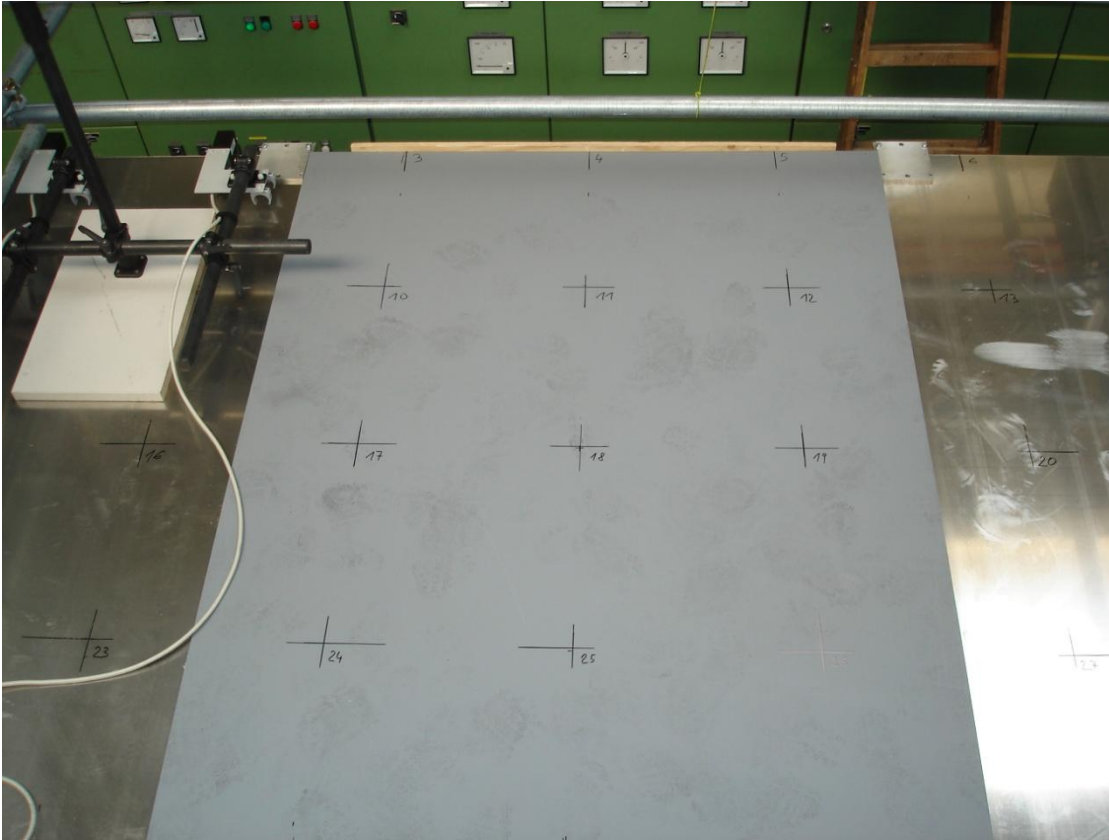


Abbildung 10-29: Traktionsstromrichter, Prüfaufbau



**Abbildung 10-30: Traktionsstromrichter, DC-Magnetfeld-Sonde am Messaufbau, Schirmblech und Alu-Blech mit Messpunkt-Markierungen**

## 10.2.2.7 Betriebspunkte

### 10.2.2.7.1 Maximaler Netzstrom

Um den Worst Case Fall zu erhalten, wurde mit maximalem Netzstrom von 1570 A (DC) gemessen.

### 10.2.2.7.2 Fahrspiel

Als Vergleich zu der Messung mit maximalem Netzstrom wurde eine Messung über ein typisches Fahrspiel gemacht. Dabei wurde ca. 20 Sekunden lang eine Beschleunigung des Fahrzeuges simuliert, danach für 5 Sekunden Rollen und am Ende eine 15 Sekunden lange Verzögerung bis zum Stillstand. Dabei wurde durch eine Max-Hold-Messung der maximale Wert des DC-Magnetfeldes während eines solchen Fahrspieles ermittelt.

### 10.2.2.8 Messergebnisse

Die Abbildung 10-31 zeigt die Ergebnisse bei Messung mit maximalem Netzstrom und 30 cm Messhöhe, die Abbildung 10-32 die Ergebnisse bei Messung mit maximalem Netzstrom und 10 cm Messhöhe und die Abbildung 10-33 zeigt die Ergebnisse bei Messung während des Fahrspiels und 30 cm Messhöhe.

#### 10.2.2.8.1 Messergebnisse – Maximaler Netzstrom

Messhöhe = 30 cm (Abstand vom Schirmblech bzw. Alu-Blech bis Mitte DC-Magnetfeld-Sonde)

MP7	MP14	MP21	MP28	MP35	MP42	MP49
158 $\mu$ T	224 $\mu$ T	178 $\mu$ T	150 $\mu$ T	162 $\mu$ T	181 $\mu$ T	84 $\mu$ T
MP6	MP13	MP20	MP27	MP34	MP41	MP48
223 $\mu$ T	230 $\mu$ T	217 $\mu$ T	197 $\mu$ T	230 $\mu$ T	230 $\mu$ T	201 $\mu$ T
MP5	MP12	MP19	MP26	MP33	MP40	MP47
226 $\mu$ T	239 $\mu$ T	123 $\mu$ T	147 $\mu$ T	285 $\mu$ T	287 $\mu$ T	223 $\mu$ T
MP4	MP11	MP18	MP25	MP32	MP39	MP46
309 $\mu$ T	135 $\mu$ T	118 $\mu$ T	156 $\mu$ T	341 $\mu$ T	337 $\mu$ T	163 $\mu$ T
MP3	MP10	MP17	MP24	MP31	MP38	MP45
252 $\mu$ T	129 $\mu$ T	111 $\mu$ T	149 $\mu$ T	276 $\mu$ T	274 $\mu$ T	126 $\mu$ T
MP2	MP9	MP16	MP23	MP30	MP37	MP44
233 $\mu$ T	233 $\mu$ T	333 $\mu$ T	200 $\mu$ T	205 $\mu$ T	197 $\mu$ T	112 $\mu$ T
MP1	MP8	MP15	MP22	MP29	MP36	MP43
170 $\mu$ T	202 $\mu$ T	134 $\mu$ T	166 $\mu$ T	173 $\mu$ T	136 $\mu$ T	170 $\mu$ T

Abbildung 10-31: Traktionsstromrichter, Messergebnis – Maximaler Netzstrom – 30 cm Messhöhe

Messhöhe = 10 cm (Abstand vom Schirmblech bzw. Alu-Blech bis Mitte DC-Magnetfeld-Sonde)

MP7	MP14	MP21	MP28	MP35	MP42	MP49
195 $\mu$ T	246 $\mu$ T	240 $\mu$ T	183 $\mu$ T	175 $\mu$ T	160 $\mu$ T	166 $\mu$ T
MP6	MP13	MP20	MP27	MP34	MP41	MP48
280 $\mu$ T	437 $\mu$ T	340 $\mu$ T	326 $\mu$ T	301 $\mu$ T	293 $\mu$ T	203 $\mu$ T
MP5	MP12	MP19	MP26	MP33	MP40	MP47
545 $\mu$ T	146 $\mu$ T	103,4 $\mu$ T	153 $\mu$ T	581 $\mu$ T	471 $\mu$ T	238 $\mu$ T
MP4	MP11	MP18	MP25	MP32	MP39	MP46
668 $\mu$ T	109 $\mu$ T	85,4 $\mu$ T	123 $\mu$ T	679 $\mu$ T	559 $\mu$ T	251 $\mu$ T
MP3	MP10	MP17	MP24	MP31	MP38	MP45
561 $\mu$ T	143 $\mu$ T	99,9 $\mu$ T	162 $\mu$ T	574 $\mu$ T	438 $\mu$ T	236 $\mu$ T
MP2	MP9	MP16	MP23	MP30	MP37	MP44
285 $\mu$ T	421 $\mu$ T	333 $\mu$ T	334 $\mu$ T	314 $\mu$ T	279 $\mu$ T	212 $\mu$ T
MP1	MP8	MP15	MP22	MP29	MP36	MP43
200 $\mu$ T	268 $\mu$ T	235 $\mu$ T	200 $\mu$ T	224 $\mu$ T	218 $\mu$ T	173 $\mu$ T

Abbildung 10-32: Traktionsstromrichter, Messergebnis – Maximaler Netzstrom – 10 cm Messhöhe



### 10.2.2.8.2 Messergebnisse - Fahrspiel

Messhöhe = 30 cm (Abstand vom Schirmblech bzw. Alu-Blech bis Mitte DC-Magnetfeld-Sonde)

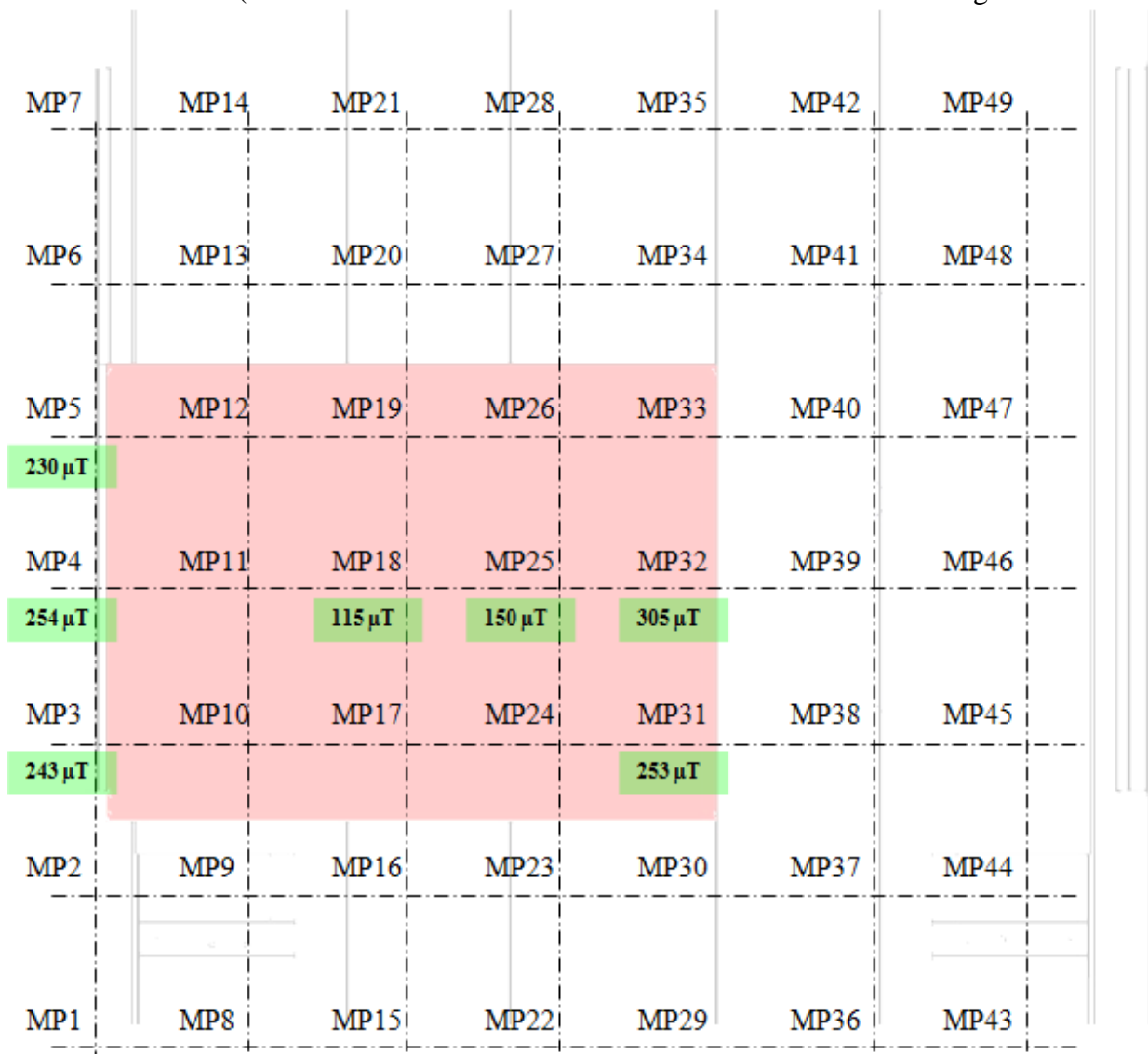


Abbildung 10-33: Traktionsstromrichter, Messergebnis – Fahrspiel – 30 cm Messhöhe

### 10.2.2.9 Zusammenfassung

Das DC-Magnetfeld entspricht den Anforderungen.

### 10.3 Traktionstransformator

Der Traktionstransformator muss unter allen Betriebsbedingungen die ICNIRP-Grenzwerte (1998) für die Allgemeinbevölkerung und die VDE 848-3-1 (Herzschrumpfmacher der Kategorie 1) einhalten. Dies unter Berücksichtigung der Messvorschrift EN 50500, wobei die Messung nach Kundenforderung bereits ab Fußbodenoberkante zu erfolgen hat.

Bei dieser Überprüfung im Prüffeld des Herstellers stand nur eine 50 Hz Sinus-Versorgung zur Verfügung. Man hat sich darauf geeinigt als Kriterium die Hälfte des Grenzwertes bei 50 Hz aus der ICNIRP Richtlinie (1998) für die Allgemeinbevölkerung anzusetzen. Der Einfluss des Wagenkastens wurde durch einen „Ersatz-Fahrzeugboden“ berücksichtigt. Der Fußboden wurde durch eine 5 mm dicke Alu-Platte nachgebildet. Der tatsächliche Fußbodenaufbau ist eine mehrschichtige Wabenkonstruktion, ebenfalls aus Alu, mit insgesamt ca. 8 mm Materialstärke, die höhere Dämpfungswerte verspricht.

#### 10.3.1 Grund der Messung

Die Kosten und den damit verbundenen Terminverzug, der bei einer nachträglichen Ertüchtigung des Transformators am Fahrzeug entstehen würde, sind zu minimieren. Zur Reduzierung des Risikos wurde eine Messung des Transformators vorgesehen.

#### 10.3.2 Messequipment

Es wird ein Magnetfeldmessgerät nach EN 50500 eingesetzt.

Geräteart	Typ/Modell	Hersteller
Chassis	PXI 1033	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
AC-Feld-Erfassung	50.20.1	ETR
AC-Feld-Erfassung	50.20.2	ETR
DC-Feld-Erfassung	880	Wuntronic
DC-Feld-Erfassung	881	Wuntronic
Laptop	Celsius H700	Fujitsu/Siemens

AC-Feld:

Die Auswertung basiert auf einer FFT des gemessenen zeitlichen Verlaufs.

FFT Parameter:

Fenster-Funktion: ..... Hanning

Messzeit: ..... 500 ms

Sampling Frequenz: ..... 49152 Hz

Aus den drei Richtungskomponenten des AC-Feldes wird der Feldvektor ohne Berücksichtigung der Phasenverschiebung gebildet (= Worst Case).

Bei dieser Messung wird nur das Magnetfeld der 50 Hz –Komponente ausgewertet.

Es wird der zeitliche Verlauf des Feldes getrennt für jede Raumachse mit aufgezeichnet. Damit sind unterschiedlichste Offline-Auswertungen möglich.

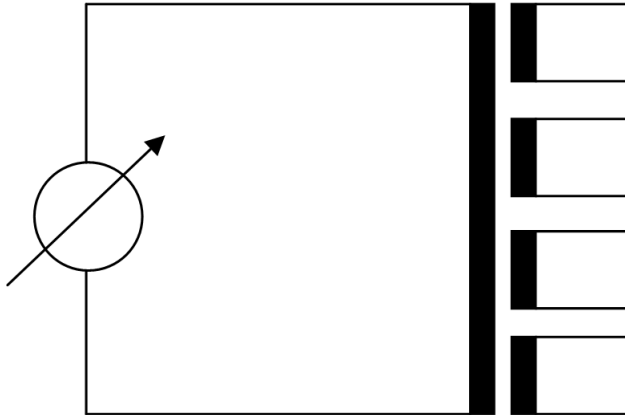
#### 10.3.3 Grenzwert

Der einzuhaltende Grenzwert für die einzelnen Messpunkte ist 50  $\mu$ T (Effektivwert).

### 10.3.4 Messanordnung

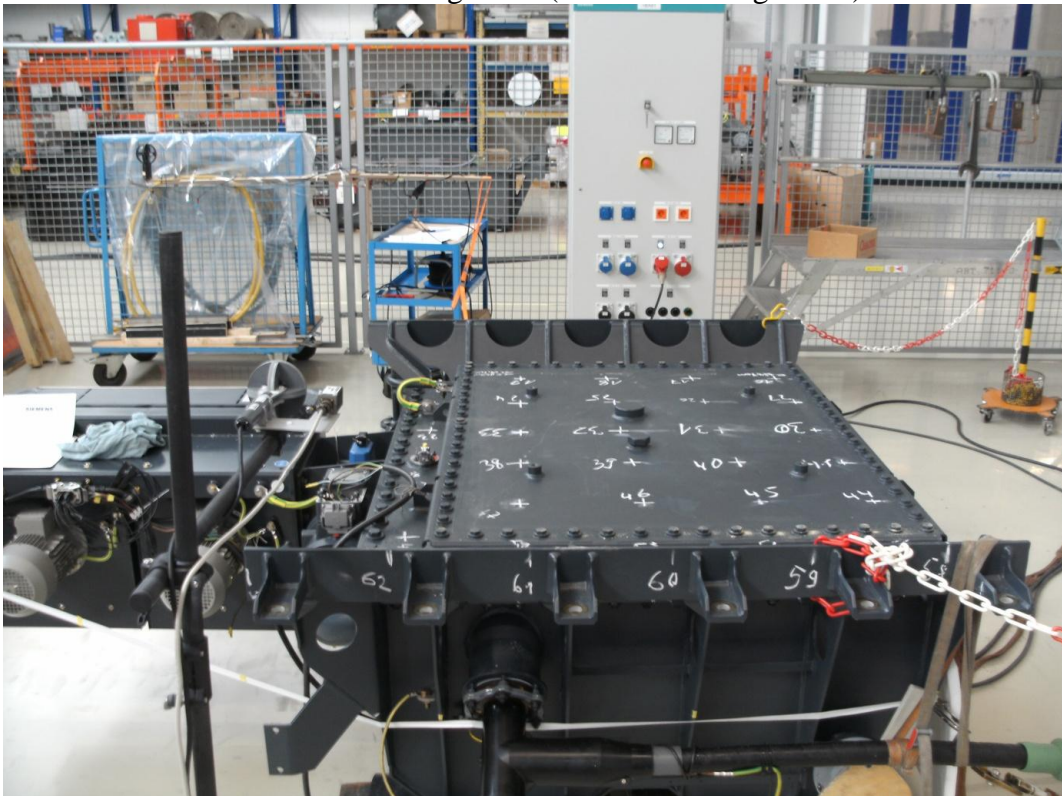
Der Transformator wird an einer 50 Hz Sinusspannung betrieben. Da keine Lasten vorhanden sind, wird der Transformator zur Erreichung der Betriebsströme im Kurzschluss betrieben (Abbildung 10-34). Anschließend wird eine getrennte Messung mit maximaler Versorgungsspannung gemacht, um etwaige Sättigungseffekte abschätzen zu können.

Prinzipschaltung:



**Abbildung 10-34: Prinzipschaltung für die Transformormessung**

Der Transformator wurde frei im Raum aufgestellt (siehe Abbildung 10-35).



**Abbildung 10-35: Transformormessung im PF ohne Schirmung**

Es wurde ein Messraster (siehe Abbildung 10-36) mit einem Abstand von ca. 25 cm festgelegt. Der Messabstand über dem Transformator entsprach der Fußbodenoberkante des Fahrzeuginnenraumes.

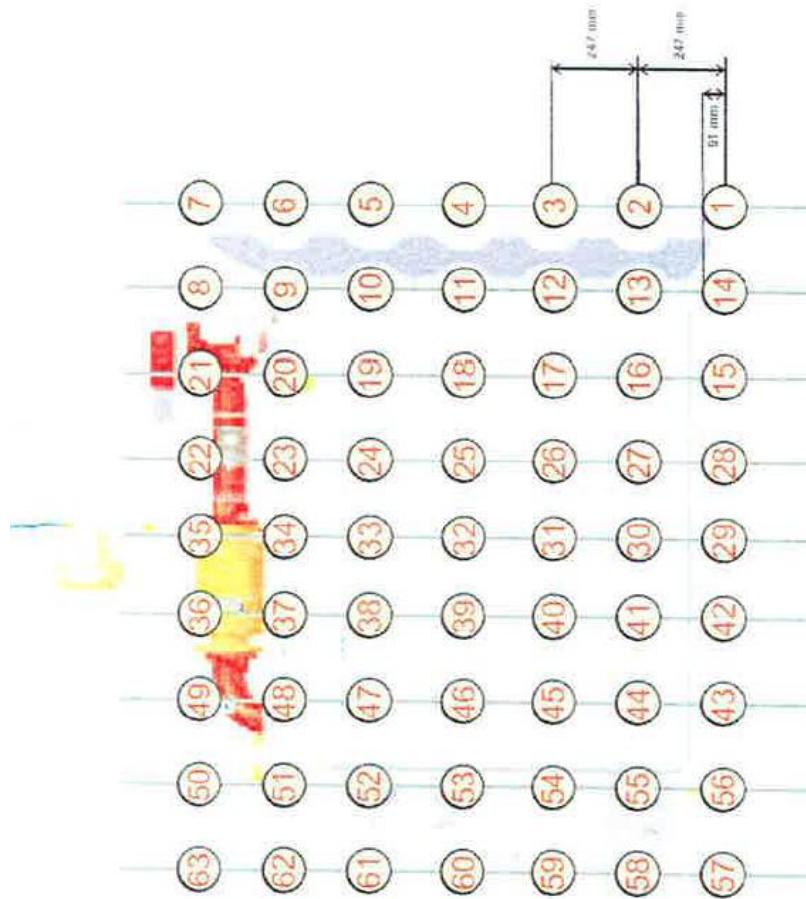


Abbildung 10-36: Messraster

Die Abbildung 10-37 zeigt den Transformator mit „Ersatz-Fahrzeughoden“. Die Messung wurde unmittelbar über dem „Ersatz-Fahrzeughoden“ unter Berücksichtigung des Fußbodenaufbaues durchgeführt (minimaler Messabstand).

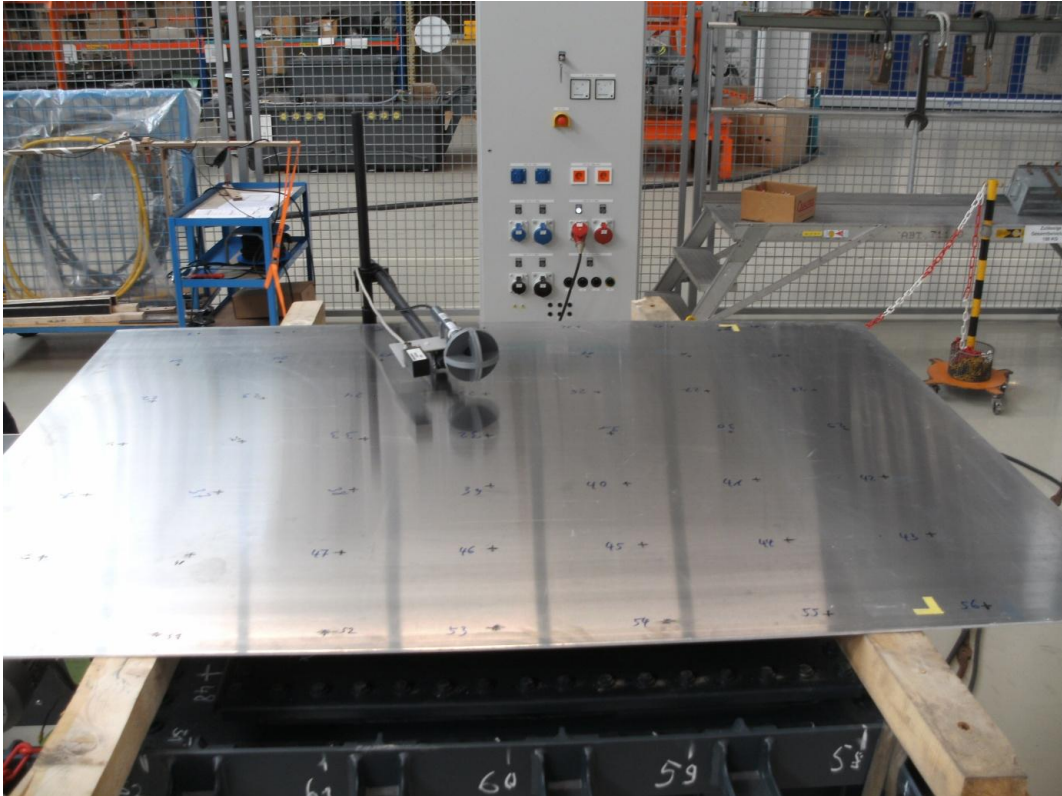


Abbildung 10-37: Transformormessung im PF mit „Ersatz-Fahrzeugboden“

### 10.3.5 Messergebnisse

#### 10.3.5.1 Messung im Kurzschluss

Der Transformator wurde im Kurzschluss betrieben. Jede Wicklung wurde mit dem maximalen Strom von 600 A belastet. Diverse Kombinationen von Belastungszuständen wurden getestet, führten aber zu keinen höheren Magnetfeldern. Messergebnisse in Tabelle 10-35 und Tabelle 10-36.

Ohne „Ersatz-Fahrzeugboden“:

MP 7:	MP 6:	MP 5:	MP 4:	MP 3:	MP 2:	MP 1:
MP 8:	MP 9:	MP 10:	MP 11:	MP 12:	MP 13:	MP 14:
MP 21: 204,5 $\mu$ T	MP 20: 231,4 $\mu$ T	MP 19: 166,6 $\mu$ T	MP 18: 118,9 $\mu$ T	MP 17: 123,5 $\mu$ T	MP 16: 148,7 $\mu$ T	MP 15: 131,5 $\mu$ T
MP 22: 176,8 $\mu$ T	MP 23: 184,8 $\mu$ T	MP 24: 118,3 $\mu$ T	MP 25: 60,6 $\mu$ T	MP 26: 68,5 $\mu$ T	MP 27: 106,1 $\mu$ T	MP 28: 115,8 $\mu$ T
MP 35:	MP 34:	MP 33:	MP 32:	MP 31:	MP 30:	MP 29:
MP 36: 157,7 $\mu$ T	MP 37: 180,7 $\mu$ T	MP 38: 111,3 $\mu$ T	MP 39: 72,9 $\mu$ T	MP 40: 55,6 $\mu$ T	MP 41: 94,9 $\mu$ T	MP 42: 103,0 $\mu$ T
MP 49: 162,5 $\mu$ T	MP 48: 200,9 $\mu$ T	MP 47: 155,6 $\mu$ T	MP 46: 115,7 $\mu$ T	MP 45: 93,4 $\mu$ T	MP 44: 123,0 $\mu$ T	MP 43: 120,8 $\mu$ T
MP 50:	MP 51:	MP 52:	MP 53:	MP 54:	MP 55:	MP 56:
MP 63:	MP 62:	MP 61:	MP 60:	MP 59:	MP 58:	MP 57:

Tabelle 10-35: Messergebnisse, 50Hz-Trafomessung, KS-Messung, ohne Fzg-Boden

Mit „Ersatz-Fahrzeugboden“:

MP 7:	MP 6:	MP 5:	MP 4:	MP 3:	MP 2:	MP 1:
MP 8:	MP 9:	MP 10:	MP 11:	MP 12:	MP 13:	MP 14:
MP 21: 70,5 $\mu$ T	MP 20: 83,4 $\mu$ T	MP 19: 62,7 $\mu$ T	MP 18: 47,4 $\mu$ T	MP 17: 45,4 $\mu$ T	MP 16: 54,9 $\mu$ T	MP 15: 48,7 $\mu$ T
MP 22: 49,8 $\mu$ T	MP 23: 45,0 $\mu$ T	MP 24: 31,3 $\mu$ T	MP 25: 20,3 $\mu$ T	MP 26: 17,6 $\mu$ T	MP 27: 24,8 $\mu$ T	MP 28: 30,3 $\mu$ T
MP 35:	MP 34:	MP 33:	MP 32:	MP 31:	MP 30:	MP 29:
MP 36: 48,7 $\mu$ T	MP 37: 45,6 $\mu$ T	MP 38: 33,1 $\mu$ T	MP 39: 17,6 $\mu$ T	MP 40: 12,5 $\mu$ T	MP 41: 18,0 $\mu$ T	MP 42: 24,2 $\mu$ T
MP 49: 56,5 $\mu$ T	MP 48: 72,2 $\mu$ T	MP 47: 58,5 $\mu$ T	MP 46: 39,1 $\mu$ T	MP 45: 30,4 $\mu$ T	MP 44: 34,9 $\mu$ T	MP 43: 32,6 $\mu$ T
MP 50:	MP 51:	MP 52:	MP 53:	MP 54:	MP 55:	MP 56:
MP 63:	MP 62:	MP 61:	MP 60:	MP 59:	MP 58:	MP 57:

**Tabelle 10-36: Messergebnisse, 50Hz-Trafomessung, KS-Messung, mit Fzg-Boden**

Damit ergeben sich folgende Dämpfungswerte an den einzelnen Messpunkten für die 50 Hz Grundschiwingung (Tabelle 10-37):

MP 7:	MP 6:	MP 5:	MP 4:	MP 3:	MP 2:	MP 1:
MP 8:	MP 9:	MP 10:	MP 11:	MP 12:	MP 13:	MP 14:
MP 21: 2,90	MP 20: 2,77	MP 19: 2,66	MP 18: 2,51	MP 17: 2,72	MP 16: 2,73	MP 15: 2,70
MP 22: 3,55	MP 23: 4,11	MP 24: 3,78	MP 25: 2,99	MP 26: 3,89	MP 27: 4,28	MP 28: 3,82
MP 35:	MP 34:	MP 33:	MP 32:	MP 31:	MP 30:	MP 29:
MP 36: 3,24	MP 37: 3,96	MP 38: 3,36	MP 39: 4,14	MP 40: 4,45	MP 41: 5,27	MP 42: 4,26
MP 49: 2,88	MP 48: 2,78	MP 47: 2,66	MP 46: 2,96	MP 45: 3,07	MP 44: 3,52	MP 43: 3,71
MP 50:	MP 51:	MP 52:	MP 53:	MP 54:	MP 55:	MP 56:
MP 63:	MP 62:	MP 61:	MP 60:	MP 59:	MP 58:	MP 57:

**Tabelle 10-37: Magnetfeld-Dämpfungswerte, 50 Hz, Alu-Fzg-Boden**

### 10.3.5.2 Messung im Leerlauf

Um den Einfluss etwaiger Sättigungseffekte bei Betrieb mit maximaler Spannung auf das Magnetfeld zu überprüfen, wurden Messungen (Tabelle 10-38) bei Nennspannung von 25 kV und maximaler Spannung von 29 kV gemacht.

Nennspannung 25 kV		Maximale Spannung 29 kV	
MP 49: 5,0 $\mu$ T	MP 48: 5,7 $\mu$ T	MP 49: 11,5 $\mu$ T	MP 48: 12,5 $\mu$ T
MP 50: 5,2 $\mu$ T	MP 51: 6,4 $\mu$ T	MP 50: 10,5 $\mu$ T	MP 51: 14,6 $\mu$ T

**Tabelle 10-38: Messergebnisse, 50Hz-Trafomessung, Leerlauf-Messung, ohne Fzg-Boden**

Der Einfluss der Spannung ist sehr gering, außerdem ist ein gleichzeitiges Auftreten von maximaler Magnetisierungsspannung und maximaler Belastung nicht möglich.

### 10.3.6 Zusammenfassung

Da die auftretenden Magnetfelder höher als erwartet waren, hat man sich dazu entschlossen, ein zusätzliches Alu-Schirmblech (siehe Abbildung 10-38) zu entwerfen, das im Bedarfsfall relativ einfach zu montieren wäre und zusätzliche Dämpfung des Magnetfeldes bringt.

Man ging aber davon aus, dass die Dämpfung des Wagenbodens ausreichen sollte, was sich schließlich bei der Fahrzeugmessung bestätigte.

Die Grenzwerte seitlich des Fahrzeuges wurden nicht überprüft, weil der Traktionstransformator im Stillstand nur durch die passive Last der Hilfsbetriebeumrichter belastet wird und kein erhöhtes Magnetfeld erwartet wird. Bei der Fahrzeugmessung wurde dies bestätigt.



Abbildung 10-38: Transformator mit ALU-Schirmblech

## 11. Beispiele von Fahrzeugmessungen

### 11.1 DC-Fahrzeug

#### 11.1.1 Allgemeines

##### 11.1.1.1 Prüfling

Beim Prüfling (Abbildung 11-1) handelt es sich um eine Niederflurstraßenbahngarnitur (NFSB), Versorgung über einen Stromabnehmer. Führerstand an einer Seite.



Abbildung 11-1: NFSB, Prüfling in der Remise

**Versorgung**  
600V DC



### 11.1.1.2 Prüfgrundlage

- ICNIRP 1998 Grenzwerte (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)
- EN 50500 - Messverfahren für magnetische Felder, die durch elektronische und elektrische Geräte in der Bahnumgebung erzeugt werden hinsichtlich der Exposition von Personen.

### 11.1.1.3 Verwendetes Messequipment

Es wurde ein Magnetfeldmessgerät nach EN 50500 eingesetzt.

Geräteart	Typ/Modell	Hersteller
Chassis	PXI 1033	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
AC-Feld-Erfassung	50.20.1	Eigenbau
AC-Feld-Erfassung	50.20.2	Eigenbau
DC-Feld-Erfassung	880	Wuntronic
DC-Feld-Erfassung	881	Wuntronic
Laptop	Celsius H700	Fujitsu/Siemens

DC-Feld:

Aus den drei Richtungskomponenten des DC-Feldes wird der Feldvektor gebildet.  
Das Messgerät liefert einen DC-Messwert in  $\mu\text{T}$ .

AC-Feld:

Die Auswertung basiert auf einer FFT des gemessenen zeitlichen Verlaufs.

FFT Parameter:

Fenster-Funktion: .....Hanning

Messzeit: ..... 480 ms (2 1/12 Hz)

Sampling Frequenz: .....49152 Hz

Aus den drei Richtungskomponenten des AC-Feldes wird der Feldvektor ohne Berücksichtigung der Phasenverschiebung gebildet (= Worst Case).

Die mit dem Grenzwert bewerteten Spektralkomponenten der FFT werden linear summiert (entsprechend EN 50500 werden Spektrallinien unter einem Wert von 10% des Grenzwertes nicht berücksichtigt).

Das Messgerät liefert einen Messwert in % des Grenzwertes der ICNIRP Richtlinie. Ein Auslesen der Induktionswerte (in  $\mu\text{T}$ ) für jede einzelne Frequenz ist ebenfalls möglich.

Es wird der zeitliche Verlauf des Feldes, getrennt für jede Raumachse, mit aufgezeichnet. Damit sind unterschiedlichste Offline-Auswertungen möglich.

### 11.1.2 Betriebszustände

Die Messungen wurden in den Betriebszuständen, wie sie in der EN 50500 definiert sind, durchgeführt.

Die Betriebszustände sind:

#### Betriebszustand „Stillstand“ (S)

Das Fahrzeug befindet sich im Stillstand. Die Traktionsstromrichter sind unter Spannung, takten aber nicht. Alle Stromkreise des statischen Umformers (HBU) sind in Betrieb, die versorgten Geräte (z. B.: Klimaanlage, Fzg.-Beleuchtung usw. ) sind eingeschaltet.

#### Fahrbetrieb (D)

Das Fahrzeug wird aus dem Stillstand mit maximaler Beschleunigung bis zur Maximalgeschwindigkeit beschleunigt. Danach erfolgt eine kurze Rollphase mit anschließender Bremsung mit maximaler Betriebsbremse bis zum Stillstand.

Die Traktionsstromrichter sind dabei naturgemäß unter Spannung und takten. Alle Stromkreise des statischen Umformers (HBU) sind eingeschaltet, die versorgten Geräte (z. B.: Klimaanlage, Fzg.-Beleuchtung usw. ) sind in Betrieb.

An den Messpunkten im Fahrzeuginneren wurde gemäß EN 50500 in beiden Betriebszuständen gemessen.

Die Messungen an den Messpunkten außerhalb des Fahrzeuges erfolgten entsprechend EN 50500 nur im Betriebszustand „Stillstand“.

### 11.1.3 Grenzwerte

Für die Beurteilung der Messwerte wurden die Grenzwerte der ICNIRP 1998 Richtlinie (Abbildung 11-2) herangezogen.

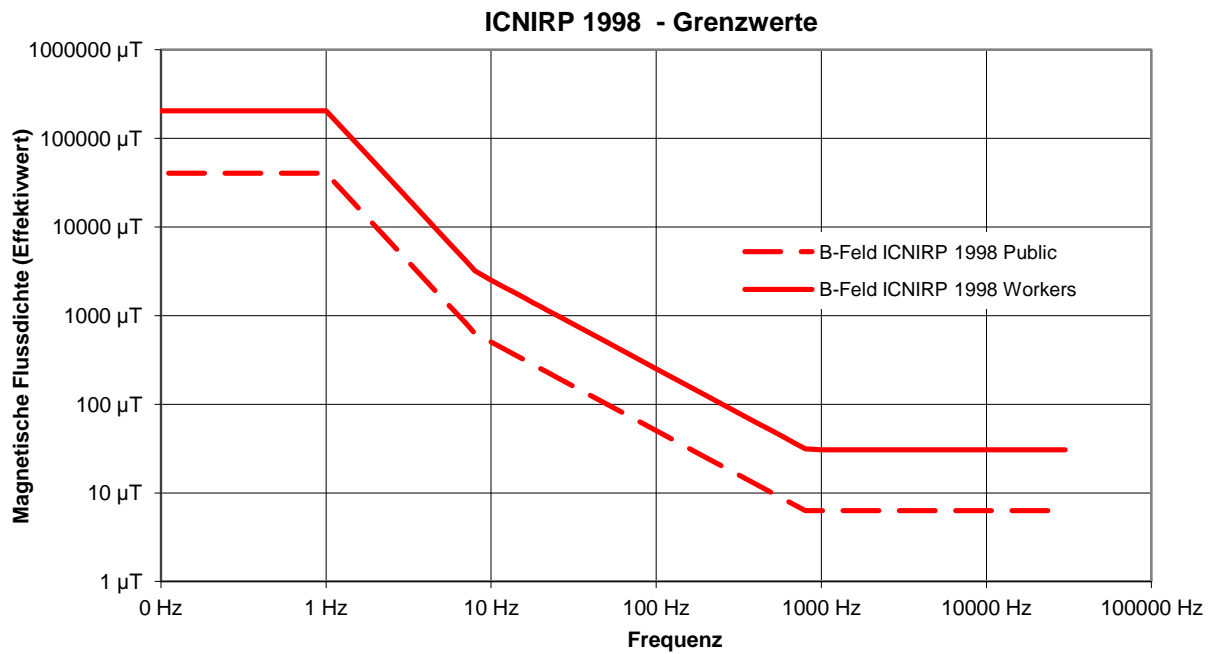


Abbildung 11-2: ICNIRP 1998, Grenzwerte

### 11.1.4 Überblick Messpunkte

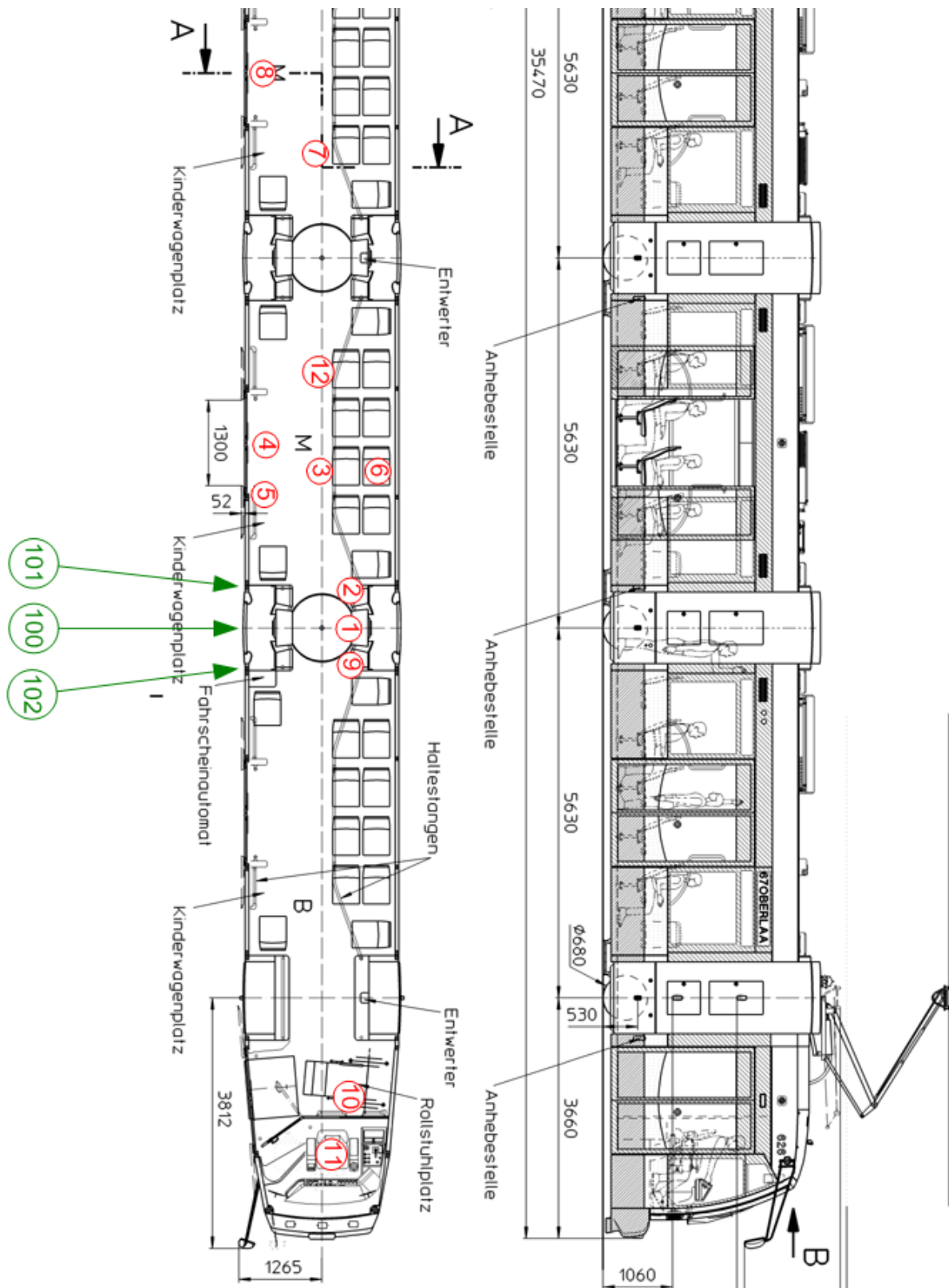


Abbildung 11-3: NFSB, DC-Fahrzeug, Messpunkte

Die Messpunkte in Abbildung 11-3:

Fahrzeug – Innenbereich:

- 1..... Motor
- 2..... Motorleitungen
- 3..... Traktionsstromrichter
- 4..... Leistungsverkabelung (HBU+TSR)
- 5..... Netzdrossel Traktionsstromrichter
- 6..... Steuerverkabelung
- 7..... Statischer Umformer (HBU)
- 8..... Leistungsverkabelung (TSR)
- 9..... Traktionsminus
- 10..... Elektronikschrank hinter dem Führerstand
- 11..... Fahrersitz
- 12..... Klimaanlage

Fahrzeug –Außenbereich:

- 100..... Motor
- 101..... Motorleitungen
- 102..... Traktionsminus

**11.1.4.1.1 Fahrzeuginnenraum**

Die EN 50500 gibt für den Fahrzeuginnenraum folgende Messabstände über dem Fahrzeugboden an.

Für allgemein zugängliche Bereiche (Bevölkerung):

0,3 m / 0,9 m / 1,5 m, der horizontale Messabstand zu den Fahrzeugwänden beträgt mind. 0,3 m.

Für ausschließlich Bedienstete zugängliche Bereiche (Beruf):

0,9 m / 1,5 m, der horizontale Messabstand zu den Fahrzeugwänden beträgt mind. 0,3 m.

**11.1.4.1.2 Fahrzeugaußenseite**

Für die Fahrzeugaußenseite gibt die EN 50500 folgende Messabstände über der Schienenoberkante an.

Die Messhöhen sind für die Bevölkerung und die Bediensteten gültig:

0,5 m / 1,5 m / 2,5 m, der horizontale Messabstand zur Fahrzeug-Außenhaut beträgt mind. 0,3 m.

Die Messhöhe von 2,5 m ist nur bei vorhandenem Bahnsteig sinnvoll. Ist kein Bahnsteig vorhanden, so ist diese Höhe weit außerhalb der Reichweite von Personen. Da im Netz in dem die gegenständlichen Fahrzeuge verkehren, keine Bahnsteige vorhanden sind, wurde der 2,5 m Messpunkt nicht gemessen.

Es wurden nur Messungen in allen Messhöhen durchgeführt, wo dies auch sinnvoll ist ( z. B.: bei vertikal ausgedehnten Quellen wie etwa den Motorkabeln). Es macht wenig Sinn, Messhöhen in einem größeren Abstand zu einer Quelle zu messen, wenn bereits die Messung in geringerem Abstand zur Quelle den Grenzwert bei Weitem nicht erreicht, da die Feldstärke mit der Entfernung abnimmt.

## 11.1.5 Messergebnisse

### 11.1.5.1 Fahrzeuginnenraum Passagierbereich

Die Messung im Innenraum zeigt Abbildung 11-4. Die Messergebnisse zeigt Tabelle 11-1 für Stillstand und Tabelle 11-2 für den Fahrbetrieb.

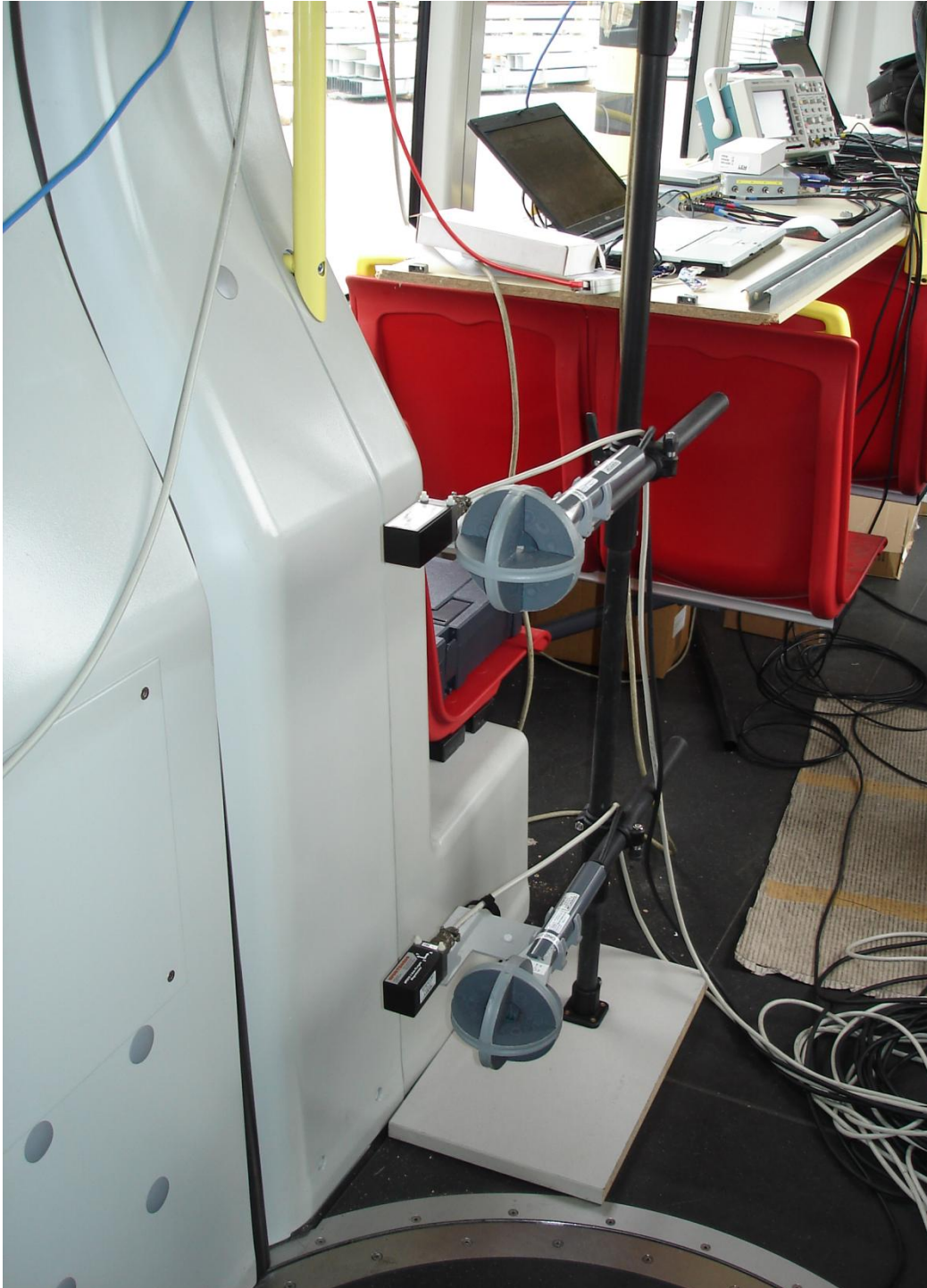


Abbildung 11-4: NFSB, DC-Fahrzeug, Innenraum, Messung nach EN 50500

## 11.1.5.1.1 Stillstand

Messpunkt	Quelle	Messhöhe 30 cm			Messhöhe 90 cm			Messhöhe 150 cm			Messhöhe		
		AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert in $\mu\text{T}$	AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert in $\mu\text{T}$	AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert in $\mu\text{T}$	AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert in $\mu\text{T}$
1	Motor	1,19	0	24,4	1,29	0	32,6	1,19	0	24,7			
2	Motorleitungen	1,0	0	30,3	1,22	0	19,3	1,12	0	16,2			
3	Traktionsstromrichter							1,04	0	45,9			
4	Leistungsverkabelung							1,05	0	35,6			
5	Netzdrossel TSR							1,04	0	41,4			
6	Steuerverkabelung							1,02	0	39,4			
7	Statischer Umformer							0,98	0	28,3			
8	Leistungsverkabelung							0,98	0	26,2			
9	Traktionsminus	1,15	0	35,5	1,27	0	31,7	1,18	0	21,6			
10	Elektronikschrank	0,93	0	48,1	1,05	0	18,6	1,51	0	24,9			
12	Klimaanlage							0,99	0	28,8			

Tabelle 11-1: NFSB, DC-Fahrzeug, Messergebnisse Innenraum - Stillstand

11.1.5.1.2 *Fahrbetrieb*

Messpunkt	Quelle	Messhöhe 30 cm			Messhöhe 90 cm			Messhöhe 150 cm			Messhöhe an der Fahrzeugdecke		
		AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert in $\mu\text{T}$	AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert IN $\mu\text{T}$	AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert in $\mu\text{T}$	AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert in $\mu\text{T}$
1	Motor	8,42	0	108	6,57	0	122	6,43	0	150			
2	Motorleitungen	4,01	0	67,1	4,26	0	61,8	6,29	0	57,9	42,1	50,9	51
3	Traktionsstromrichter							3,26	0	99,3			
4	Leistungsverkabelung							3,04	0	103			
5	Netzdrossel TSR							7,02	0	160	5,05	0	436
6	Steuerverkabelung							2,92	0	89			
7	Statischer Umformer							2,97	0	78,5			
8	Leistungsverkabelung							2,97	0	66			
9	Traktionsminus	4,91	0	86,6	5,28	0	96,6	4,93	0	108	21,1	15,7	172
10	Elektronikschrank	4,22	0	111	2,56	0	72,1	3,94	0	146			
12	Klimaanlage							3,18	0	118			

Tabelle 11-2: NFSB, DC-Fahrzeug, Messergebnisse Innenraum - Fahrbetrieb



### 11.1.5.2 Fahrzeuginnenraum Bedienstete

ICNIRP-Grenzwert für Bedienstete (workers). Die Messergebnisse zeigt Tabelle 11-3 für Stillstand und Tabelle 11-4 für den Fahrbetrieb.

#### 11.1.5.2.1 Stillstand

Messpunkt	Quelle	Messhöhe 30 cm			Messhöhe 90 cm			Messhöhe 150 cm			Messhöhe		
		AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert in $\mu\text{T}$	AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert IN $\mu\text{T}$	AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert in $\mu\text{T}$	AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert in $\mu\text{T}$
11	Fahrersitz				0,23	0	24,7	0,38	0	36,6			

Tabelle 11-3: NFSB, DC-Fahrzeug, Messergebnisse Fahrersitz - Stillstand

#### 11.1.5.2.2 Fahrbetrieb

Messpunkt	Quelle	Messhöhe 30 cm			Messhöhe 90 cm			Messhöhe 150 cm			Messhöhe		
		AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert in $\mu\text{T}$	AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert IN $\mu\text{T}$	AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert in $\mu\text{T}$	AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert in $\mu\text{T}$
11	Fahrersitz				0,77	0	95,9	0,92	0	114			

Tabelle 11-4: NFSB, DC-Fahrzeug, Messergebnisse Fahrersitz - Fahrbetrieb

### 11.1.5.3 Fahrzeugaußenseite

Die Messung an der Fahrzeugaußenseite zeigt Abbildung 11-5. Messergebnisse zeigt die Tabelle 11-5 und die Ergebnisse der Zusatzmessung mit Zugkraft (Drehmoment) gegen die Bremse zeigt Tabelle 11-6.



Abbildung 11-5: NFSB, DC-Fahrzeug, Außenbereich, Messung nach EN 50500

### 11.1.5.3.1 Stillstand

Messpunkt	Quelle	Messhöhe 50 cm			Messhöhe 150 cm			Messhöhe			Messhöhe		
		AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert in $\mu\text{T}$	AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert in $\mu\text{T}$	AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert in $\mu\text{T}$	AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert in $\mu\text{T}$
100	Motor	1,47	0	49,7	1,83	0	26,4						
101	Motorleitungen	1,32	0	58,1	1,5	0	40,7						
102	Traktionsminus	1,36	0	45,3	1,42	0	32,6						

Tabelle 11-5: NFSB, DC-Fahrzeug, Messergebnisse Außenbereich - Stillstand

### 11.1.5.3.2 Stillstand mit 1/3 Moment gegen die Bremse

Da alle Messwerte bei der Messung im Stillstand sehr nieder waren, wurde zusätzlich zu den Forderungen der EN 50500 auch noch im Stillstand mit 1/3 Moment gegen die mechanische Bremse gemessen.

Messpunkt	Quelle	Messhöhe 50 cm			Messhöhe 150 cm			Messhöhe			Messhöhe		
		AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert in $\mu\text{T}$	AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert in $\mu\text{T}$	AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert in $\mu\text{T}$	AC Filter Wert in %	AC FFT Wert in %	DC Wert in $\mu\text{T}$
100	Motor	2,75	0	68,8	2,19	0	48,5						
101	Motorleitungen	1,55	0	62,4	1,84	0	44,4						
102	Traktionsminus	1,94	0	37,6	2,36	0	22,0						

Tabelle 11-6: NFSB, DC-Fahrzeug, Messergebnisse Außenbereich - Stillstand mit Moment gegen die Bremse

### 11.1.6 Prüfergebnis

Sämtliche gemessenen Werte liegen weit unter den Grenzwerten der ICNIRP 1998 Richtlinie für die Allgemeinbevölkerung.

## 11.2 AC-Fahrzeug

### 11.2.1 Allgemeines

#### 11.2.1.1 Prüfling

Beim Prüfling (Abbildung 11-6) handelt es sich um ein EMU (Electrical Multiple Unit), Versorgung über einen Stromabnehmer, Führerstand an beiden Seiten.



Abbildung 11-6: EMU, AC-Fahrzeug, Prüfling auf der Strecke

**Versorgung**  
25 kV, 50 Hz

### 11.2.1.2 Prüfgrundlage

- ICNIRP 1998 Grenzwerte (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)
- EN 50500 - Messverfahren für magnetische Felder, die durch elektronische und elektrische Geräte in der Bahnumgebung erzeugt werden hinsichtlich der Exposition von Personen.

### 11.2.1.3 Verwendetes Messequipment

Es wurde ein Magnetfeldmessgerät nach EN 50500 eingesetzt.

Geräteart	Typ/Modell	Hersteller
Chassis	PXI 1033	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
Datenerfassungskarte	NI 4472 B	National Instruments
AC-Feld-Erfassung	50.20.1	Eigenbau
AC-Feld-Erfassung	50.20.2	Eigenbau
DC-Feld-Erfassung	880	Wuntronic
DC-Feld-Erfassung	881	Wuntronic
Laptop	Celsius H700	Fujitsu/Siemens

DC-Feld:

Aus den drei Richtungskomponenten des DC-Feldes wird der Feldvektor gebildet.  
Das Messgerät liefert einen DC-Messwert in  $\mu\text{T}$ .

AC-Feld:

Die Auswertung basiert auf einer FFT des gemessenen zeitlichen Verlaufs.

FFT Parameter:

Fenster-Funktion: .....Hanning

Messzeit: .....1s (1 Hz)

Sampling Frequenz: .....49152 Hz

Aus den drei Richtungskomponenten des AC-Feldes wird der Feldvektor ohne Berücksichtigung der Phasenverschiebung gebildet (= Worst Case).

Die mit dem Grenzwert bewerteten Spektralkomponenten der FFT werden linear summiert (entsprechend EN 50500 werden Spektrallinien unter einem Wert von 10% des Grenzwertes nicht berücksichtigt).

Das Messgerät liefert einen Messwert in % des Grenzwertes der ICNIRP Richtlinie. Ein Auslesen der Induktionswerte (in  $\mu\text{T}$ ) für jede einzelne Frequenz ist ebenfalls möglich.

Es wird der zeitliche Verlauf des Feldes, getrennt für jede Raumachse, mit aufgezeichnet. Damit sind unterschiedlichste Offline-Auswertungen möglich.

### 11.2.2 Betriebszustände

Die Messungen wurden in den Betriebszuständen, wie sie in der EN 50500 definiert sind, durchgeführt.

Die Betriebszustände sind:

#### Betriebszustand „Stillstand“ (S)

Das Fahrzeug befindet sich im Stillstand. Die Traktionsstromrichter sind unter Spannung, takten aber nicht. Alle Stromkreise des statischen Umformers (HBU) sind in Betrieb, die versorgten Geräte (z. B.: Klimaanlage, Fzg.-Beleuchtung usw. ) sind eingeschaltet.

#### Fahrbetrieb (D)

Das Fahrzeug wird aus dem Stillstand mit maximaler Beschleunigung bis zur Maximalgeschwindigkeit beschleunigt. Danach erfolgt eine kurze Rollphase mit anschließender Bremsung mit maximaler Betriebsbremse bis zum Stillstand.

Die Traktionsstromrichter sind dabei naturgemäß unter Spannung und takten. Alle Stromkreise des statischen Umformers (HBU) sind eingeschaltet, die versorgten Geräte (z. B.: Klimaanlage, Fzg.-Beleuchtung usw. ) sind in Betrieb.

An den Messpunkten im Fahrzeuginneren wurde gemäß EN 50500 in beiden Betriebszuständen gemessen.

Die Messungen an den Messpunkten außerhalb des Fahrzeuges erfolgten entsprechend EN 50500 nur im Betriebszustand „Stillstand“.

### 11.2.3 Grenzwerte

Für die Beurteilung der Messwerte wurden die Grenzwerte der ICNIRP 1998 Richtlinie (Abbildung 11-7) herangezogen.

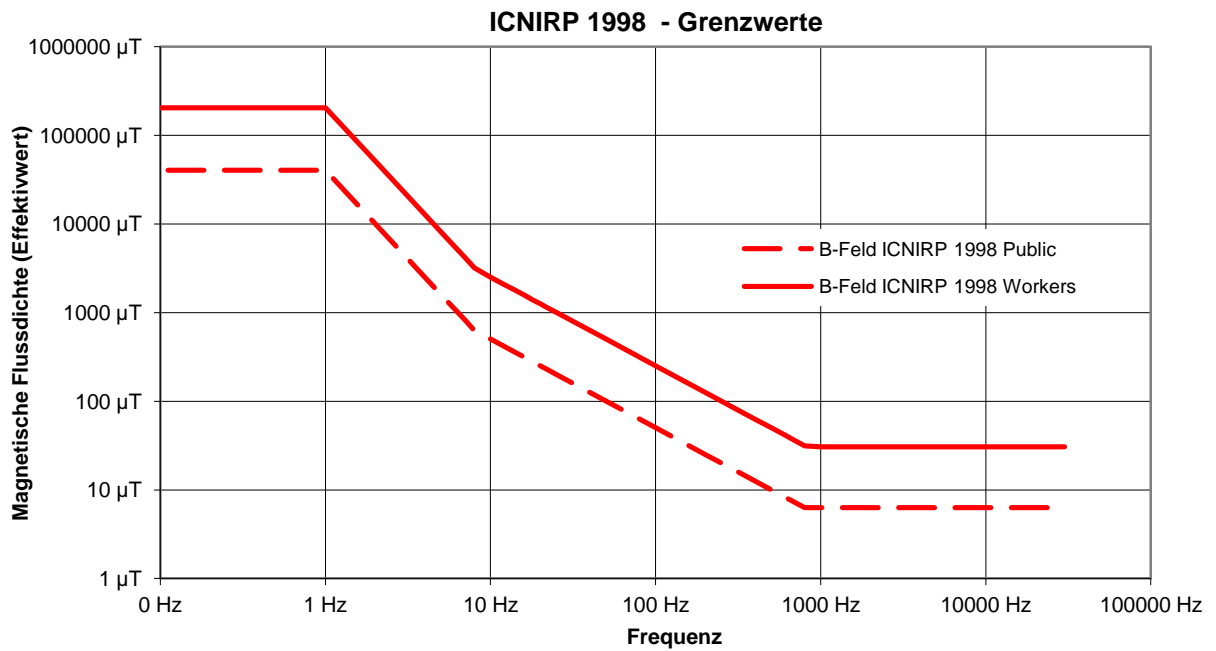


Abbildung 11-7: ICNIRP 1998, Grenzwerte

## 11.2.4 Überblick Messpunkte

Bei den Messpunkten beschränkte man sich auf den bei der Komponentenqualifikation auffällig gewordenen Traktionstransformator (50 Hz Messung) und auf den Traktionscontainer (beinhaltet Traktions- und Hilfsbetriebeumrichter). Im Innenraum wurden Messungen oberhalb des Traktionscontainers und des Traktionstransformators durchgeführt, um den Einfluss des Wagenkastens zu erfassen. Im Außenbereich wurde nur das magnetische Feld des Traktionstransformators untersucht. Die anderen Komponenten waren nicht auffällig und die Schirmung des Wagenkastens erhöht den schon vorhandenen Abstand zum Grenzwert weiter.

## 11.2.5 Messergebnisse

### 11.2.5.1 Messung im Innenraum

#### Traktionscontainer:

Es wurden acht Messpunkte oberhalb des Traktionscontainers im Fahrbetrieb aufgenommen. Die ICNIRP-Bewertung blieb dabei immer bei 0 %, was bedeutet, dass keine Harmonische im Frequenzbereich 10 % des ICNIRP-Grenzwertes überschritten hat. Eine Messung im Stillstand wurde nicht durchgeführt. Die Abbildung 11-8 zeigt beispielhaft die FFT eines Messpunktes oberhalb des Traktionscontainers.

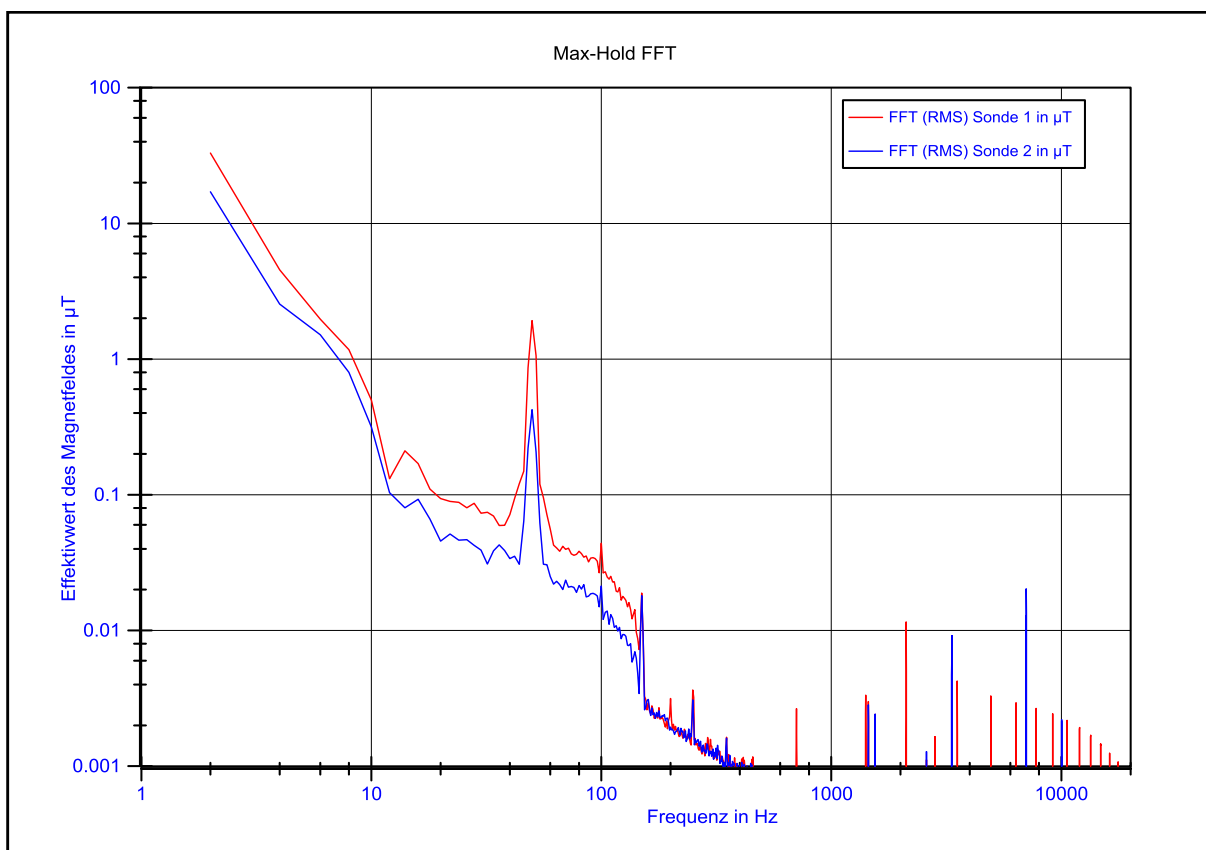


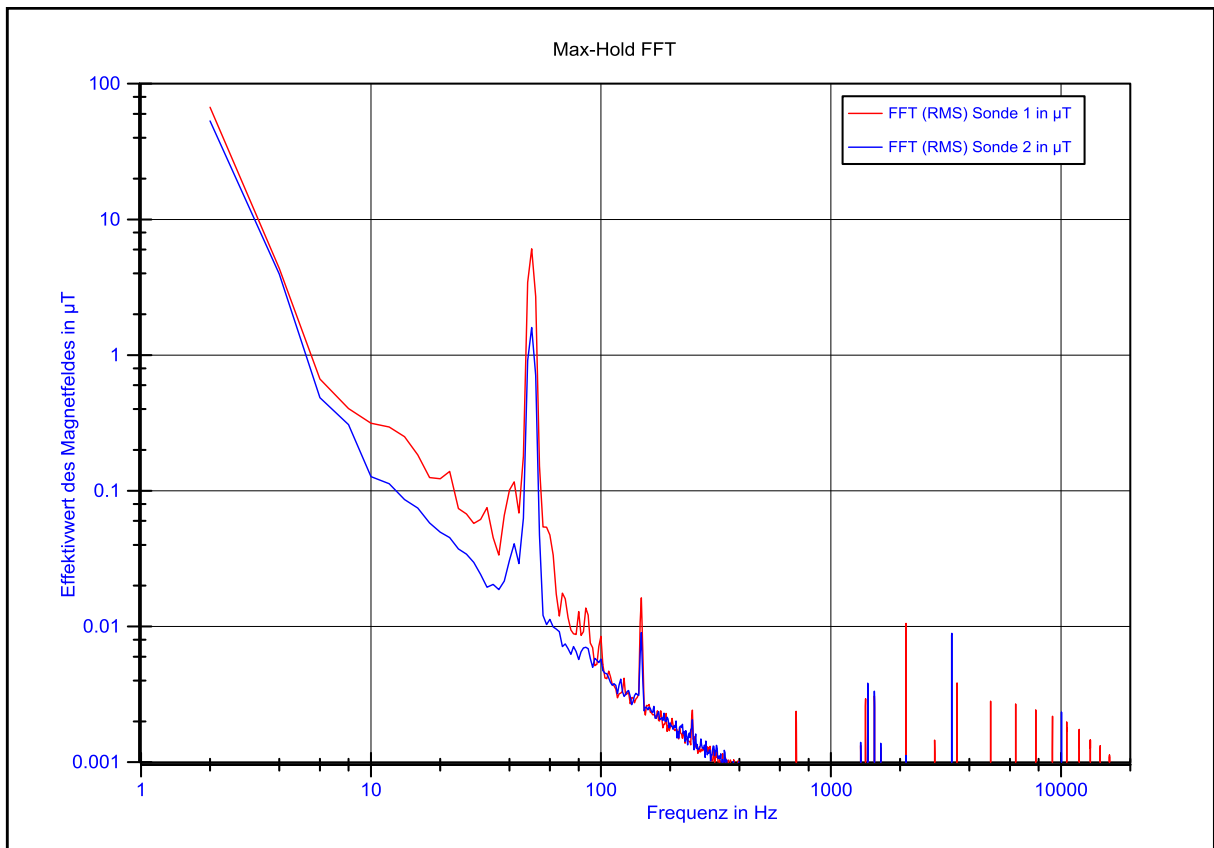
Abbildung 11-8: FFT-Messergebnis EMU, AC-Fahrzeug, Innenraum (Traktionscontainer), Messung nach EN 50500



### Traktionstransformator:

Es wurden 47 Messpunkte oberhalb des Traktionstransformators sowohl im Stillstand als auch im Fahrbetrieb aufgenommen. Die ICNIRP-Bewertung blieb dabei immer bei 0 %, was bedeutet, dass keine Harmonische im Frequenzbereich 10 % des ICNIRP-Grenzwertes überschritten hat. Die Abbildung 11-10, Abbildung 11-11 und Abbildung 11-12 zeigen die Markierungen und die Messungen im Innenraum oberhalb des Traktionstransformators.

Der 50 Hz Wert ist, aufgrund der Belastung im Fahrbetrieb, im Fahrzeuginneren höher als im Außenbereich. Ein Vergleich mit der Max-Hold-FFT im Außenbereich (Abbildung 11-14) zeigt die starke Dämpfung der höheren Harmonischen. Die Abbildung 11-9 zeigt beispielhaft die FFT eines Messpunktes oberhalb des Traktionstransformators.



**Abbildung 11-9: FFT-Messergebnis EMU, AC-Fahrzeug, Innenraum (Traktionstransformator), Messung nach EN 50500**



**Abbildung 11-10: EMU, AC-Fahrzeug, Markierung des Traktionstransformators**



**Abbildung 11-11: EMU, AC-Fahrzeug, Anordnung zur Messung nach Kundenforderung und zur Verifikation der Transformatorspezifikation(1)**



**Abbildung 11-12: EMU, AC-Fahrzeug, Anordnung zur Messung nach Kundenforderung und zur Verifikation der Transformatorspezifikation(2)**

### 11.2.5.2 Messung im Außenbereich

Im Prüffeld konnte nur eine 50 Hz Messung des Traktionstransformators durchgeführt werden. Während im Innenraum durch die Schirmung des Wagenkastens, vor allem bei höheren Frequenzen, keine erhöhten Magnetfelder zu erwarten sind, ist der Einfluss des Betriebes am 4QS (Vierquadrantensteller, Taktfrequenz 750 Hz) im Außenbereich interessant. Im Außenbereich wurde eine Worst Case Messung, was den Messabstand betrifft, durchgeführt (siehe Abbildung 11-13).

Es wurde an mehreren Positionen entlang des Traktionstransformators (im Stillstand) das Magnetfeld gemessen. Da der Rippelstrom, der durch den 4QS-Betrieb verursacht wird, nahezu belastungsunabhängig ist, sind vor allem die Werte bei einem Vielfachen der Schaltfrequenz interessant.



**Abbildung 11-13: EMU, AC-Fahrzeug, Anordnung zur Messung nach Kundenforderung und zur Verifikation der Transformatorspezifikation**

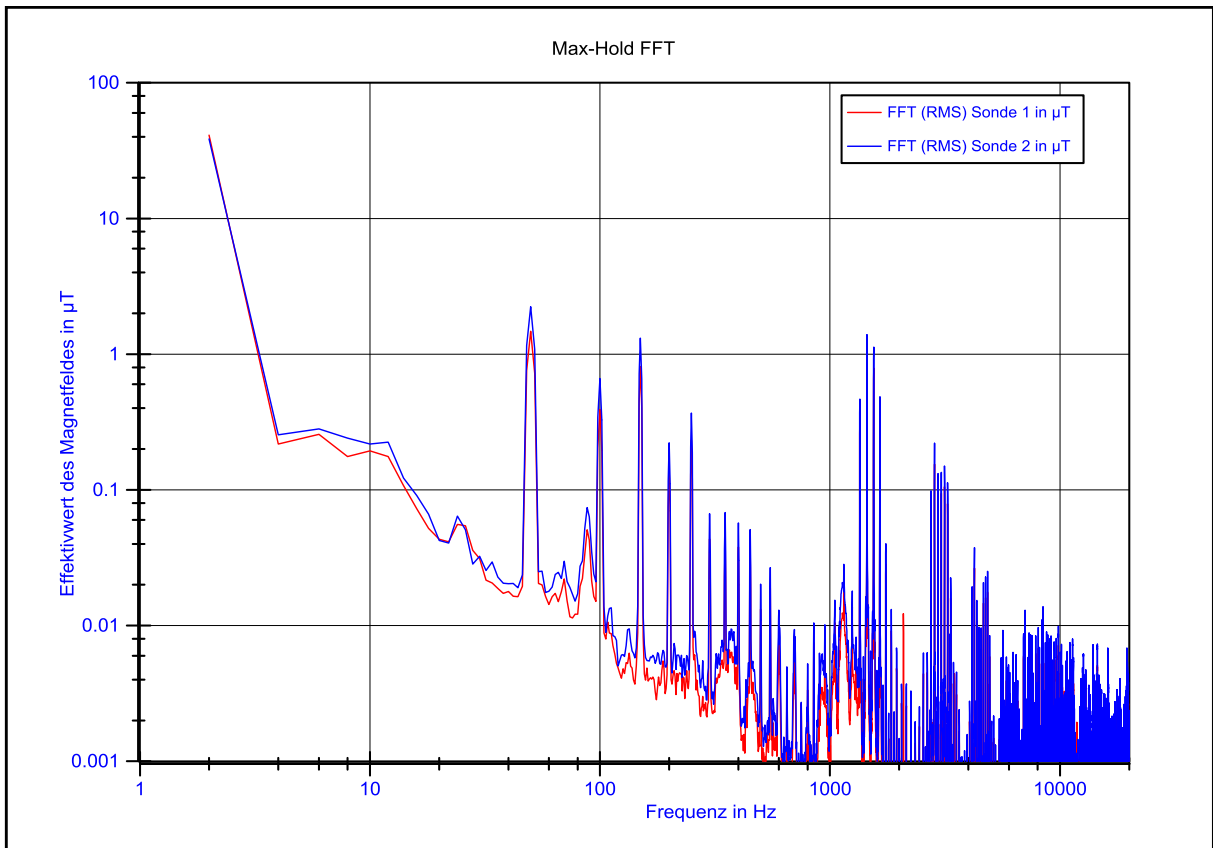


Abbildung 11-14: EMU, AC-Fahrzeug, FFT des Magnetfeldes an „Messposition 2“ (Außenbereich) - höchster Wert der ICNIRP-Bewertung

Wie die Abbildung 11-14 zeigt, sind die hohen Werte beim Doppelten der Schaltfrequenz (=1500 Hz) maßgeblich für den hohen ICNIRP-Wert verantwortlich.

Tabelle 11-7 zeigt die Messergebnisse. Die DC-Werte des Magnetfeldes sind der Vollständigkeit halber angegeben, liegen aber ungefähr bei dem Wert des Erdmagnetfeldes.

Außenbereich Traktionstransformator							
Messposition	1	2	3	4	5	6	7
DC-Wert S1	56,5µT	58,3µT	47,7µT	58,9µT	52,2µT	51,5µT	50,2µT
DC-Wert S2	52,4µT	54,6µT	41,8µT	72,9µ	64,5µT	62,2µT	58,1µT
ICNIRP S1	11,0%	28,3%	11,0%	0%	0	0%	0%
ICNIRP S2	26,4%	40,3%	29,9%	0%	22,7%	11,2%	11,0%

Tabelle 11-7: EMU, AC-Fahrzeug, Messergebnisse Außenbereich - Stillstand

### 11.2.6 Prüfergebnis

Sämtliche gemessenen Werte liegen weit unter den Grenzwerten der ICNIRP Richtlinie für die Allgemeinbevölkerung.

## 12. Zusammenfassung

Die Ergebnisse von zahlreichen Messungen in und außerhalb von Schienenfahrzeugen zeigen, dass bei entsprechender Planung die Einhaltung der Grenzwerte hinsichtlich des Personenschutzes kein großes Problem darstellt. Obwohl teilweise der zur Verfügung stehende Raum sehr begrenzt ist und die auftretenden Stromstärken sehr hoch sind, findet man eine technisch ausreichende und auch wirtschaftlich vertretbare Lösung.

Überraschenderweise weit sensibler stellt sich das Thema der Zugbeeinflussungssysteme dar, weil teilweise schon die geringsten Magnetfelder zu einer Beeinträchtigung dieser Systeme führen können. Die meisten Zugbeeinflussungssysteme sind eigensicher, wodurch das Auftreten einer gefährlichen Situation höchst unwahrscheinlich wird. Die vom Schienenfahrzeug produzierten Magnetfelder können aber zu einer unerwünschten Reduktion der Verfügbarkeit führen. Um dies zu verhindern, muss teilweise ein recht hoher Aufwand getrieben werden. Nicht zuletzt, weil die Anforderungen bei Projektbeginn oft nicht ausreichend zur Verfügung stehen.

### 13. Literaturverzeichnis

- [1] Elektromagnetische Felder im Alltag; Bayrisches Landesamt für Umwelt
- [2] Richtlinie 2004/40/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (elektromagnetische Felder) (18. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG)
- [3] ÖVE/ÖNORM E 8850; Elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz - Beschränkung der Exposition von Personen
- [4] DIN VDE 848-3-1; Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern; Teil 3-1: Schutz von Personen mit aktiven Körperhilfsmitteln im Frequenzbereich 0 Hz bis 300 GHz
- [5] ÖVE/ÖNORM EN 50413; Grundnorm zu Mess- und Berechnungsverfahren der Exposition von Personen in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz)
- [6] ÖVE/ÖNORM EN 62226-2-1; Sicherheit in elektrischen oder magnetischen Feldern im niedrigen und mittleren Frequenzbereich - Verfahren zur Berechnung der induzierten Körperstromdichte und des im menschlichen Körper induzierten elektrischen Feldes; Teil 2-1: Exposition gegenüber magnetischen Feldern - 2D-Modelle
- [7] Elektromagnetische Felder im Bereich elektrifizierter Bahnen und ihre gesundheitlichen Risiken; Schmutzner, Silny, Friedl, Fickert, Aigner, Gaun, Rechberger, Abart; Verlag der technischen Universität Graz
- [8] EN 50500; Messverfahren für magnetische Felder, die durch elektronische und elektrische Geräte in der Bahnumgebung erzeugt werden, hinsichtlich der Exposition von Personen.
- [9] ICNIRP-Statement; Guidance on determining compliance of exposure to pulsed fields and complex nonsinusoidal waveforms to pulsed fields and complex nonsinusoidal waveforms below 100 kHz with ICNIRP-Guidelines (Published in Health Physics 84(3): 383-387;2003)
- [10] ICNIRP-Guidelines 1998; International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (Up to 300 GHz)
- [11] ICNIRP-Guidelines 2010; International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (1 Hz to 100 kHz)
- [12] Richtlinie 2013/35/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Juni 2013 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (elektromagnetische Felder)
- [13] Wikipedia
- [14] DIN V VDE 848-4/A3; Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern; Schutz von Personen im Frequenzbereich 0 Hz bis 30 kHz. Änderung 3. Norm zurückgezogen.
- [15] Das elektromagnetische Feld, Theorie und grundlegende Anwendungen; H. Hofmann; dritte überarbeitete Auflage; Springer-Verlag
- [16] Begriffswelt der Feldtheorie; Adolf J. Schwab; Vierte, völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage; Springer-Verlag
- [17] Magnetfeldemissionen von Traktionsmaschinen; G. Lauber, H. Neudorfer, M. Schrödl; E&I 2009 126/4

## 14. Anhang

### 14.1 Geschichte

(vollständig zitiert aus [13])

*Ängste rund um mögliche schädliche Wirkungen von Hochspannungsleitungen und elektromagnetischer Felder auf die Umwelt und Menschen sind nicht neu und bestehen seit den Anfängen der technischen Nutzung Mitte des 19. Jahrhunderts, wie folgendes Beispiel aus dem Bereich der Anfänge der elektrischen Energietechnik darstellt:*

*Im Jahr 1890 war es Beamten der Königlichen Generaldirektion in Bayern verboten, an der Eröffnungsfeier des ersten deutschen Wechselspannungs-Kraftwerks, den Elektrizitäts-Werke Reichenhall, teilzunehmen oder den Maschinenraum zu betreten. Das erste öffentliche E-Werk in Bayern diente der öffentlichen Beleuchtung in Bad Reichenhall und als Grund für das Verbot wurde die für damalige Verhältnisse einmalige Hochspannung von 2 kV angegeben. Gleichwohl bestehen bei Arbeiten mit Hochspannung zur Vermeidung von Stromunfällen sehr wohl besondere Sicherheitsvorschriften, wie sie heute unter anderem in den „Fünf Sicherheitsregeln“ genormt und in der Regel wie Arbeiten unter Spannung festgelegt sind.*

*Auch Ängste zu den technischen Vorläufern der heute üblichen Basisstationen aus dem Bereich der Nachrichtentechnik gab es mit dem Aufkommen der ersten Funktelegrafie und deren Telegrafestationen. So wurde im April 1911 in der US-Zeitschrift „The Atlanta Constitution“ über die mögliche Gefahr der Wellen von Funktelegrafen berichtet, die neben Zahnausfall im Laufe der Zeit auch zu Haarausfall führen und Personen verrückt machen soll.*

*„When the wireless age arrived – and wireless telephony will soon be added to wireless telegraphy – our air will be so charged with electricity that human beings will feel its influence in a hundred different ways. Already it seems to have attacked our teeth. Tomorrow we may find that our hair is dropping out from the same cause, and eventually it may deprive us of our senses and even our lives.“*

– Rolf Hensingmüller: The Atlanta Constitution, Seite C6, 30. April 1911

*Als Abhilfe wurde eine Schutzkleidung, welche wie ein Regenmantel aussieht, vorgeschlagen. Sie sollte den Träger gegen die schädlichen Auswirkungen der Wellen von Funktelegraphen schützen:*

*„Unless some process of insulation of this character is adopted, however, the only course for us to pursue will be to wear insulated garments to protect us. This garment will take the form of a rubber coat, with a helmet of the same material. The entire face will have to be kept covered, goggles being provided for the purpose of sight, and an air valve for breathing purposes.“*

– Rolf Hensingmüller: The Atlanta Constitution, Seite C6, 30. April 1911



## 14.2 Biologische Wirkung (siehe auch [1] und [7])

(vollständig zitiert aus [13])

*Ändert sich der magnetische Fluss um einen Leiter, dann wird eine Spannung induziert, die wiederum einen Stromfluss hervorrufen kann. Nervenbahnen arbeiten wie elektrische Leiter und können von äußeren Magnetfeldern beeinflusst werden. Dass Magnetfelder Wirkungen im menschlichen Körper zeigen, darauf beruht beispielsweise die Transkranielle Magnetstimulation (siehe unten). Strittig hingegen ist, ob die mehr oder minder schwachen Magnetfelder im Alltag zu Beeinträchtigungen führen.*

*Manche Tiere reagieren auf die Magnetfelder entlang von Hochspannungsleitungen (siehe unten: Magnetotaxis).*

*Als **Magnetotaxis** wird die Orientierung der Bewegungsrichtung von Lebewesen in einem Magnetfeld bezeichnet. Ökologisch bedeutend ist die Orientierung am Magnetfeld der Erde. Nach bisherigen Erkenntnissen spielen dabei sogenannte Magnetosomen eine Rolle. Magnetosomen besitzen einen Eigenmagnetismus und tendieren zu einer Ausrichtung in Magnetfeldern. Bisher wurde noch kein sensorisches System gefunden.*

*Die transkranielle **Magnetstimulation**, kurz TMS, ist eine Technologie, bei der mit Hilfe starker Magnetfelder Bereiche des Gehirns sowohl stimuliert als auch gehemmt werden können. Damit ist die TMS ein nützliches Werkzeug in der neurowissenschaftlichen Forschung. Darüber hinaus wird die transkranielle Magnetstimulation in beschränktem Umfang in der neurologischen Diagnostik eingesetzt oder für die Behandlung von neurologischen Erkrankungen wie des Tinnitus, Apoplexie, der Epilepsie oder der Parkinson-Krankheit vorgeschlagen, ebenso in der Psychiatrie für die Therapie affektiver Störungen, allen voran der Depression, aber auch von Schizophrenien. Aus ersten durchgeführten Studien lässt sich noch nicht erkennen, inwieweit die teilweise recht hohen klinischen Erwartungen an die transkranielle Magnetstimulation berechtigt sind.*

### 14.2.1 Subjektive Auswirkungen

(vollständig zitiert aus [13])

*Bei der subjektiven Festlegung, was Elektrosmog auslösen könnte, spielen nicht nur physikalische Zusammenhänge eine Rolle, sondern auch verschiedene Formen von Wissenschafts- und Technikangst. Die Diskussion um Auswirkungen von Elektrosmog wird häufig emotional, subjektiv und unwissenschaftlich geführt. In diesem Zusammenhang nicht ungewöhnlich sind diverse Warnungen in den Medien vor negativen Auswirkungen. Zu Studien werden gegenseitig Manipulierungsvorwürfe erhoben in Bezug auf die Art der Datenerhebung und die Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen.*

*Eine offene Diskussion wird oft mit ideologischer Härte unterbunden, um den Aufwand für eine ausgewogene Bewertung zu sparen oder weil unbequeme Ergebnisse befürchtet werden. Man wirft einander gegenseitig vor, Studien im eigenen Sinne zu manipulieren oder absichtlich falsche Schlüsse zu ziehen und konstruiert Verschwörungstheorien. Oft wird zudem ein genereller Nachweis für die Unschädlichkeit, auch für noch unbekannte, vermutete Wirkmodelle gefordert, der aus erkenntnistheoretischen Gründen nicht erfüllbar sein kann. Prinzipiell könnte nur eine bestimmte Schädlichkeit nachgewiesen werden.*

## 14.2.2 Grundlegende Stellungnahme

(vollständig zitiert aus [13])

*Die Landessanitätsdirektion des Landes Salzburg warnte (2003), ohne Nachweise anzuführen: Elektrosmog kann unter anderem das vegetative und zentrale Nervensystem, Hormone, Chromosomen und Zellen beeinflussen und stören. Eine zu starke und zu lange Elektrosmogbelastung kann darüber hinaus zu verschiedenen Krankheiten führen.*

*Die WHO beschreibt „Niederfrequente elektrische Felder beeinflussen den menschlichen Körper genauso, wie sie jedes andere aus geladenen Teilchen bestehende Material beeinflussen. Wenn elektrische Felder auf leitfähige Materialien treffen, beeinflussen sie die räumliche Verteilung von elektrischen Ladungen auf der Materialoberfläche. Sie bewirken einen Stromfluss durch den Körper hindurch zur Erde. Niederfrequente magnetische Felder induzieren im menschlichen Körper Ströme, die auf geschlossenen Kreiswegen fließen. Die Stärke dieser Ströme hängt von der Stärke des äußeren Magnetfeldes ab. Sind diese Ströme stark genug, dann können sie Nerven und Muskeln stimulieren oder andere biologische Vorgänge beeinflussen.“*

*Bei der Erkenntnis der WHO „die derzeitige Kenntnislage die Existenz irgendwelcher gesundheitlichen Folgen einer Exposition durch schwache elektromagnetische Felder nicht bestätigt. Allerdings gibt es noch einige Wissenslücken bei biologischen Effekten, was weitere Forschungen nötig macht.“ ist die Definition von „Gesundheit“ durch die WHO zu berücksichtigen „ein Zustand des vollständigen körperlichen, geistigen und sozialen Wohlergehens und nicht nur das Fehlen von Krankheit oder Gebrechen.“ („Health is a state of complete physical, mental and social well-being and not merely the absence of disease or infirmity.“)*

*In einer Stellungnahme des deutschen Bundesamt für Strahlenschutz zu verschiedenen öffentlich diskutierten Studien, welche auf mögliche Schäden durch elektromagnetische Strahlung hinweisen, werden ausnahmslos alle Studien wegen verschiedener methodischer Fehler oder mangelnder Wiederholbarkeit der angeblichen Ergebnisse bemängelt. Gleichzeitig warnt das Bundesamt für Strahlenschutz, dass nichtionisierende Strahlung gesundheitliche Folgen haben könnte: Um möglichen gesundheitlichen Risiken vorzubeugen, empfiehlt das BfS, die persönliche Strahlenbelastung durch eigene Initiative zu minimieren.*

## 14.3 Pressemitteilung der EU-Kommission zur Aussetzung der Umsetzungsfrist

*Kommission ändert Richtlinie zu Elektromagnetischen Feldern um MRT zu schützen*

*Die Europäische Kommission hat heute vorgeschlagen, die Frist für die Einführung von Rechtsvorschriften über die Exposition von Arbeitnehmern gegenüber elektromagnetischen Feldern um vier Jahre – d. h. bis 30. April 2012 – zu verlängern; diese Vorschriften hätten sich auf den Einsatz von Technologien wie etwa der Magnetresonanztomographie (MRT) auswirken können. Damit bleibt genug Zeit für eine inhaltliche Änderung der Richtlinie, um den jüngsten Forschungsergebnissen zu den möglichen Auswirkungen der Expositionsgrenzwerte auf die MRT Rechnung zu tragen.*

*„Die Kommission ist nach wie vor dem Schutz von Gesundheit und Sicherheit der Arbeitnehmer verpflichtet. Es war jedoch niemals beabsichtigt, mit dieser Richtlinie den Einsatz der MRT zu behindern. Die Kommission erachtet die MRT eindeutig als eine für Patienten sehr nützliche Technologie und wird die MRT-Forschung auch weiterhin finanziell fördern“, so Vladimír Špidla, EU-Kommissar für Beschäftigung, Soziales und Chancengleichheit. Weiter sagte er: „Die Fristverlängerung für die Umsetzung ermöglicht die Überarbeitung der geltenden Richtlinie und die Änderung derjenigen Bestimmungen, die sich angesichts der neuesten wissenschaftlichen*

*Studien als problematisch erwiesen haben. Die Kommission empfiehlt den Mitgliedstaaten, die Umsetzung der geltenden Richtlinie bis zum Abschluss dieser Überprüfung auszusetzen.“*

*In ihrem Vorschlag erklärt die Kommission, dass die Frist mit dem Ziel verlängert wird, die Richtlinie inhaltlich zu ändern. Durch diese Änderung soll sichergestellt werden, dass die Grenzwerte – unter Gewährleistung eines ausreichenden Schutzes für das Personal – keine negative Auswirkung auf den Einsatz der MRT haben. Darüber hinaus ist geplant, die Situation in allen Sektoren zu überprüfen, in denen die Beschäftigten bei der Arbeit elektromagnetischen Feldern ausgesetzt sind.*

*Die vorgeschlagene Fristverlängerung bietet zudem ausreichend Zeit, neue Empfehlungen einschlägiger internationaler Gremien zu berücksichtigen. Die Internationale Kommission zum Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung (ICNIRP) überprüft derzeit ihre Empfehlungen zu den Grenzwerten für die berufsbedingte Belastung durch statische und niederfrequente elektromagnetische Felder (z. B. in der MRT-Diagnostik), und auch die Weltgesundheitsorganisation nimmt gerade eine Überprüfung ihrer Umweltkriterien für elektromagnetische Felder vor. Von diesen Überprüfungen werden bis Ende 2008 Ergebnisse in Form neuer Empfehlungen für weniger strikte Grenzwerte für die Gefährdung am Arbeitsplatz erwartet.*

#### *Hintergrund:*

*Die Richtlinie 2004/40/EG wurde von Parlament und Rat im April 2004 erlassen und sollte im April 2008 in Kraft treten. Sie basierte inhaltlich auf dem aktuellen Stand der Wissenschaft, wie er zum damaligen Zeitpunkt von der Internationalen Kommission zum Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung (ICNIRP) vertreten wurde.*

*Im Jahr 2006 äußerten Interessenträger gegenüber der Kommission Bedenken, dass die Durchführung der Richtlinie Probleme verursachen könnte. Kommissar Špidla traf daraufhin unverzüglich mit den wichtigsten Interessenträgern zusammen und versicherte ihnen, dass die Kommission nicht zögern werde, bereits erlassene Rechtsvorschriften wieder zu ändern, falls diese nachweislich negative Auswirkungen auf den Einsatz der MRT hätten. Anschließend gab die Kommission eine Studie in Auftrag, in der untersucht werden sollte, welche Folgen die in der Richtlinie festgelegten Expositionsgrenzwerte für die MRT im Einzelnen nach sich ziehen würden; außerdem sollten mögliche Probleme ermittelt werden. Die Studie wird zurzeit in vier europäischen Einrichtungen (in Deutschland, Frankreich, Belgien und im Vereinigten Königreich) durchgeführt. Die Ergebnisse dürften bis Ende Januar 2008 vorliegen.*

*Im Interesse der Transparenz schrieb die Kommission im Februar 2007 alle Mitgliedstaaten an und informierte sie über ihre Absicht, die Frage anzugehen und die nötigen Schlüsse aus den laufenden Studien zu ziehen. Darüber hinaus hat die Kommission mehrere Sitzungen mit Experten für die praktische Anwendung der MRT und mit Industrievertretern abgehalten, um mögliche Schwierigkeiten bei der Umsetzung der Richtlinie hinsichtlich Grenzwerten mit Relevanz für die MRT sowie möglicher Auswirkungen auf andere Sektoren zu diskutieren. Britische Stellen veröffentlichten im Juni 2007 eine Studie, aus der hervorging, dass die Anwendung von MRT-Verfahren tatsächlich beeinträchtigt werden könnte. Anlässlich der Veröffentlichung dieser Studie gab Kommissar Špidla vor Mitgliedern des Europäischen Parlaments und Interessenträgern eine öffentliche Erklärung darüber ab, dass die bereits erlassenen Rechtsvorschriften aus diesem Grund zu ändern seien.*

*Die MRT ist die derzeit führende Technologie zur Diagnose von Hirntumoren und zahlreicher weiterer schwerer Erkrankungen. Sie ermöglicht es den Medizinern, jährlich 8 Millionen Patienten zu helfen; der Europäischen Kommission – und ebenso dem Rat – ist der weitreichende Nutzen der Magnetresonanztomographie und ihr unschätzbare Wert für die öffentliche Gesundheit sehr wohl bewusst. Darüber hinaus fördert die EU intensiv die Forschung auf diesem Gebiet. Im Rahmen ihres 7. Rahmenprogramms für Forschung investiert sie im Jahr 2007 rund 6 000 000 EUR in Projekte zur Entwicklung von Hybrid-Bildgebungsverfahren wie MRI/PET und MRI/Ultraschall.*

## 15. Abkürzungen

AC	<b>A</b> lternating <b>C</b> urrent (Wechselstrom)
ATP	<b>A</b> utomatic <b>T</b> rain <b>P</b> rotection
DAQ	<b>D</b> ata <b>A</b> cquisition
DC	<b>D</b> irect <b>C</b> urrent (Gleichstrom)
DIN	<b>D</b> eutsches <b>I</b> nstitut für <b>N</b> ormung,
EMF	<b>E</b> lektromagnetisches <b>F</b> eld
EMV	<b>E</b> lektromagnetische <b>V</b> erträglichkeit
EN	<b>E</b> uropäische <b>N</b> orm
ETR	<b>E</b> lin <b>E</b> BG <b>T</b> raction
EU	<b>E</b> uropäische <b>U</b> nion
FFT	<b>F</b> ast <b>F</b> ourier <b>T</b> ransformation
HBU	<b>H</b> ilfsbetriebe- <b>U</b> mrichter
ICNIRP	<b>I</b> nternational <b>C</b> ommission on <b>N</b> on- <b>I</b> onizing <b>R</b> adiation <b>P</b> rotection
MRI	<b>M</b> agnetic <b>R</b> esonance <b>I</b> maging
MRT	<b>M</b> agnetresonanztomographie
ÖNORM	<b>Ö</b> sterreichische <b>N</b> orm
PCI	<b>P</b> eripheral <b>C</b> omponent <b>I</b> nterconnect, ist ein Bus-Standard zur Verbindung von Peripheriegeräten mit dem Personal-Computer.
PET	<b>P</b> ositronen- <b>E</b> missions- <b>T</b> omographie
PXI	<b>P</b> CI <b>e</b> Xtensions for <b>I</b> nstrumentation, ist eine Weiterentwicklung des Standards PCI
TS	<b>T</b> echnische <b>S</b> pezifikation
VDE	<b>V</b> erband <b>d</b> er <b>E</b> lektrotechnik, <b>E</b> lektronik und <b>I</b> nformationstechnik
WHO	<b>W</b> orld <b>H</b> ealth <b>O</b> rganization

## 16. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: ICNIRP 1998 Grenzwert & Bewertung .....	3
Abbildung 2-2: Vergleich ÖNORM S1119 – ICNIRP 1998 – VDE 848-3-1 (Kategorie 1).....	4
Abbildung 2-3: Vergleich ICNIRP 1998 – ICNIRP 2010.....	5
Abbildung 3-1: Funktion ATP-System .....	7
Abbildung 5-1: Aufbau AC-Erfassung.....	18
Abbildung 5-2: DC-Erfassung .....	19
Abbildung 5-3: NI-PXI 4472B.....	20
Abbildung 5-4: PXI-Chassis mit DAQ-Karten .....	21
Abbildung 5-5: Bedienoberfläche Messsoftware .....	22
Abbildung 5-6: AC- und DC-Erfassung.....	26
Abbildung 5-7: Datenrekorder .....	27
Abbildung 5-8: Synchronisierung .....	28
Abbildung 5-9: Kalibrierfaktoren inkl. Aufbereitung.....	29
Abbildung 5-10: Erstellen der Grenzkurven (z. B.: ICNIRP Public).....	30
Abbildung 5-11: Datenpufferung und Speichern der Rohdaten .....	30
Abbildung 5-12: FFT-Bewertung mit Max-Hold-Funktionen.....	31
Abbildung 5-13: Transferfunktion nach EN 62233.....	32
Abbildung 5-14: Zeitliche Bewertung (ICNIRP) .....	33
Abbildung 5-15: Einzelfrequenz (Filter-BB 2xFFT Frequenzabstand) .....	33
Abbildung 5-16: Datenspeicherung der Online-Auswertung .....	36
Abbildung 6-1: DC-Magnetfeld der Netzdrossel bei I=1570 A. ....	41
Abbildung 6-2: DC-Magnetfeld der Netzdrossel bei I=1570 A. ....	41
Abbildung 6-3: DC-Magnetfeld der Netzdrossel bei I=1570 A. ....	42
Abbildung 6-4: DC-Magnetfeld der Netzdrossel bei I=1570 A. ....	42
Abbildung 6-5: DC-Magnetfeld der Netzdrossel bei I=1570 A. ....	43
Abbildung 6-6: DC-Magnetfeld der Netzdrossel bei I=1570 A. ....	43
Abbildung 7-1: Übersicht Messanordnung - Traktionsmotor.....	53
Abbildung 7-2: Messanordnung – Traktionsmotor, generell.....	53
Abbildung 7-3: Messanordnung - Traktionsmotor (Herzschrittmachergrenzwert mit Alu – Schirmplatte).....	54
Abbildung 7-4: Messpunkte - Traktionsmotor .....	55
Abbildung 9-1: Teststrahlen(1).....	60
Abbildung 9-2: Teststrahlen(2).....	60
Abbildung 9-3: Testsignal 1 .....	61
Abbildung 9-4: Testsignal 2.....	61
Abbildung 9-5: Testsignal 3.....	62
Abbildung 9-6: 50 Hz Signal .....	62
Abbildung 9-7: 100 Hz Signal .....	63
Abbildung 9-8: 200 Hz Signal .....	63
Abbildung 9-9: 500 Hz Signal .....	64
Abbildung 10-1: Messanordnung Traktionsmotor DC im Freigelände des Prüffeldes .....	71
Abbildung 10-2: Magnetfeldmessung Traktionsmotor DC .....	71
Abbildung 10-3: Magnetfeldmessung Traktionsmotor DC an möglichen Positionen der ATP-Antenne .....	72
Abbildung 10-4: Messanordnung Traktionsmotor DC, gesamt.....	73
Abbildung 10-5: Messpunkte Traktionsmotor DC .....	74
Abbildung 10-6: Messanordnung Traktionsmotor AC, gesamt.....	95
Abbildung 10-7: Messequipment, Traktionsmotor AC .....	96
Abbildung 10-8: Messanordnung Traktionsmotor AC, generell .....	96
Abbildung 10-9: Messanordnung – Traktionsmotor AC (Herzschrittmachergrenzwert mit Alu – Schirmplatte).....	97
Abbildung 10-10: Messpunkte Traktionsmotor AC .....	98
Abbildung 10-11: Magnetfeldmessung DC, Traktionsmotor AC(1) .....	100
Abbildung 10-12: Magnetfeldmessung DC, Traktionsmotor AC(2) .....	101
Abbildung 10-13: Magnetfeldmessung AC, Traktionsmotor AC.....	102
Abbildung 10-14: Magnetfeldmessung AC, Traktionsmotor AC mit Alu-Schirmblech.....	103
Abbildung 10-15: Netzdrossel, Messschaltung DC-Magnetfeld .....	120
Abbildung 10-16: Netzdrossel, Messschaltung AC-Magnetfeld .....	121
Abbildung 10-17: Netzdrossel, Messaufbau 1 .....	121
Abbildung 10-18: Netzdrossel, Messaufbau 2 .....	122
Abbildung 10-19: Netzdrossel, Messaufbau 3 .....	123
Abbildung 10-20: Netzdrossel, Messpunkte .....	124
Abbildung 10-21: ICNIRP 1998, Grenzwerte.....	125
Abbildung 10-22: Netzdrossel 2mH, AC-Magnetfeld.....	126
Abbildung 10-23: Netzdrossel 3mH, DC-Magnetfeld(1) .....	128
Abbildung 10-24: Netzdrossel 3mH, DC-Magnetfeld(2).....	129
Abbildung 10-25: Netzdrossel 3mH, DC-Magnetfeld(3).....	131
Abbildung 10-26: Netzdrossel 3mH, AC-Magnetfeld.....	133
Abbildung 10-27: Traktionsstromrichter, Prüfaufbau – schematisch .....	137
Abbildung 10-28: Traktionsstromrichter, Messanordnung.....	138
Abbildung 10-29: Traktionsstromrichter, Prüfaufbau .....	139
Abbildung 10-30: Traktionsstromrichter, DC-Magnetfeld-Sonde am Messaufbau, Schirmblech und Alu-Blech mit Messpunkt-Markierungen .....	140
Abbildung 10-31: Traktionsstromrichter, Messergebnis – Maximaler Netzstrom – 30 cm Messhöhe .....	141
Abbildung 10-32: Traktionsstromrichter, Messergebnis – Maximaler Netzstrom – 10 cm Messhöhe .....	142
Abbildung 10-33: Traktionsstromrichter, Messergebnis – Fahrspiel – 30 cm Messhöhe .....	143
Abbildung 10-34: Prinzipschaltung für die Transformormessung.....	145
Abbildung 10-35: Transformormessung im PF ohne Schirmung .....	145
Abbildung 10-36: Messraster.....	146

Abbildung 10-37: Transformormessung im PF mit „Ersatz-Fahrzeugsboden“ .....	147
Abbildung 10-38: Transformator mit ALU-Schirmblech .....	149
Abbildung 11-1: NFSB, Prüfling in der Remise .....	150
Abbildung 11-2: ICNIRP 1998, Grenzwerte .....	153
Abbildung 11-3: NFSB, DC-Fahrzeug, Messpunkte .....	154
Abbildung 11-4: NFSB, DC-Fahrzeug, Innenraum, Messung nach EN 50500 .....	156
Abbildung 11-5: NFSB, DC-Fahrzeug, Außenbereich, Messung nach EN 50500 .....	160
Abbildung 11-6: EMU, AC-Fahrzeug, Prüfling auf der Strecke .....	162
Abbildung 11-7: ICNIRP 1998, Grenzwerte .....	165
Abbildung 11-8: FFT-Messergebnis EMU, AC-Fahrzeug, Innenraum (Traktionscontainer), Messung nach EN 50500 .....	166
Abbildung 11-9: FFT-Messergebnis EMU, AC-Fahrzeug, Innenraum (Traktionstransformator), Messung nach EN 50500 .....	167
Abbildung 11-10: EMU, AC-Fahrzeug, Markierung des Traktionstransformators .....	168
Abbildung 11-11: EMU, AC-Fahrzeug, Anordnung zur Messung nach Kundenforderung und zur Verifikation der Transformatorspezifikation(1) ...	168
Abbildung 11-12: EMU, AC-Fahrzeug, Anordnung zur Messung nach Kundenforderung und zur Verifikation der Transformatorspezifikation(2) ...	169
Abbildung 11-13: EMU, AC-Fahrzeug, Anordnung zur Messung nach Kundenforderung und zur Verifikation der Transformatorspezifikation .....	170
Abbildung 11-14: EMU, AC-Fahrzeug, FFT des Magnetfeldes an „Messposition 2“ (Außenbereich) - höchster Wert der ICNIRP-Bewertung .....	171

## 17. Tabellenverzeichnis

Tabelle 7-1: Dämpfungsfaktoren Magnetfeldschirmung.....	46
Tabelle 7-2: Aufstellung der Messkomponenten.....	48
Tabelle 7-3: Frequenzbänder der Signalantennen .....	50
Tabelle 7-4: Betriebspunkte .....	51
Tabelle 9-1: Testsignal 1.....	59
Tabelle 9-2: Testsignal 2.....	59
Tabelle 9-3: Testsignal 3.....	59
Tabelle 9-4: Ergebnisse der Testsignale.....	64
Tabelle 9-5: Phasen-Einzelvariation Testsignal 2 .....	66
Tabelle 9-6: Phasen-Multivariation Testsignal 2.....	66
Tabelle 9-7: Phasen-Einzelvariation Testsignal 3 .....	66
Tabelle 10-1: Frequenzbänder des ATP-Systems.....	69
Tabelle 10-2: Betriebspunkte Traktionsmotor DC .....	70
Tabelle 10-3: Messergebnisse AC-Magnetfeld, Traktionsmotor DC, 100% Motorfluss .....	75
Tabelle 10-4: Messergebnisse AC-Magnetfeld, Traktionsmotor DC, 110% Motorfluss .....	76
Tabelle 10-5: Messergebnisse DC-Magnetfeld, Traktionsmotor DC, 100% Motorfluss .....	76
Tabelle 10-6: Messergebnisse DC-Magnetfeld, Traktionsmotor DC, 110% Motorfluss .....	77
Tabelle 10-7: Messergebnisse ATP-Bänder, f=10Hz, Traktionsmotor DC, 100% Motorfluss .....	84
Tabelle 10-8: Messergebnisse ATP-Bänder, f=56Hz, Traktionsmotor DC, 100% Motorfluss .....	84
Tabelle 10-9: Messergebnisse ATP-Bänder, f=96Hz, Traktionsmotor DC, 100% Motorfluss .....	85
Tabelle 10-10: Messergebnisse ATP-Bänder, f=110Hz, Traktionsmotor DC, 100% Motorfluss .....	85
Tabelle 10-11: Messergebnisse ATP-Bänder, f=128Hz, Traktionsmotor DC, 100% Motorfluss .....	86
Tabelle 10-12: Messergebnisse ATP-Bänder, f=10Hz, Traktionsmotor DC, 110% Motorfluss .....	90
Tabelle 10-13: Messergebnisse ATP-Bänder, f=56Hz, Traktionsmotor DC, 110% Motorfluss .....	90
Tabelle 10-14: Motorströme und -Spannungen, Traktionsmotor DC .....	91
Tabelle 10-15: Frequenzbänder der Signalantennen .....	95
Tabelle 10-16: Messpunkte AC-Magnetfeld, Traktionsmotor AC, 100% Motorfluss .....	103
Tabelle 10-17: Messergebnisse MP1, AC- und DC-Magnetfeld, Traktionsmotor AC, 100% Motorfluss .....	104
Tabelle 10-18: Messergebnisse MP3, AC- und DC-Magnetfeld, Traktionsmotor AC, 100% Motorfluss .....	104
Tabelle 10-19: Überblick über die durchgeführten Messungen.....	115
Tabelle 10-20: ATP-Frequenzen, Traktionsmotor AC .....	115
Tabelle 10-21: Messergebnisse MP11 (Gesamtfeld), ATP-Frequenzen, Traktionsmotor AC .....	116
Tabelle 10-22: Messergebnisse MP12 (Gesamtfeld), ATP-Frequenzen, Traktionsmotor AC .....	116
Tabelle 10-23: Messergebnisse MP13 (Gesamtfeld), ATP-Frequenzen, Traktionsmotor AC .....	116
Tabelle 10-24: Messergebnisse MP11(y-Komponente), ATP-Frequenzen, Traktionsmotor AC .....	117
Tabelle 10-25: Messergebnisse MP12(y-Komponente), ATP-Frequenzen, Traktionsmotor AC .....	117
Tabelle 10-26: Messergebnisse MP13(y-Komponente), ATP-Frequenzen, Traktionsmotor AC .....	117
Tabelle 10-27: ICNIRP 1998 Magnetfeldgrenzwerte (300 Hz bis 20 kHz).....	125
Tabelle 10-28: Netzdrossel 2mH, Messergebnisse AC-Magnetfeld .....	126
Tabelle 10-29: Netzdrossel 2mH, Messergebnisse AC-Magnetfeld (Netzharmonische) .....	127
Tabelle 10-30: Netzdrossel 3mH, Messergebnisse DC-Magnetfeld(1) .....	128
Tabelle 10-31: Netzdrossel 3mH, Messergebnisse DC-Magnetfeld(2) .....	129
Tabelle 10-32: Netzdrossel 3mH, Messergebnisse DC-Magnetfeld(3) .....	130
Tabelle 10-33: Netzdrossel 3mH, Messergebnisse AC-Magnetfeld .....	132
Tabelle 10-34: Netzdrossel 3mH, Messergebnisse AC-Magnetfeld (Netzharmonische).....	134
Tabelle 10-35: Messergebnisse, 50Hz-Trafomessung, KS-Messung, ohne Fzg-Boden .....	147
Tabelle 10-36: Messergebnisse, 50Hz-Trafomessung, KS-Messung, mit Fzg-Boden.....	148
Tabelle 10-37: Magnetfeld-Dämpfungswerte, 50 Hz, Alu-Fzg-Boden .....	148
Tabelle 10-38: Messergebnisse, 50Hz-Trafomessung, Leerlauf-Messung, ohne Fzg-Boden .....	148
Tabelle 11-1: NFSB, DC-Fahrzeug, Messergebnisse Innenraum - Stillstand .....	157
Tabelle 11-2: NFSB, DC-Fahrzeug, Messergebnisse Innenraum - Fahrbetrieb.....	158
Tabelle 11-3: NFSB, DC-Fahrzeug, Messergebnisse Fahrersitz - Stillstand .....	159
Tabelle 11-4: NFSB, DC-Fahrzeug, Messergebnisse Fahrersitz - Fahrbetrieb .....	159
Tabelle 11-5: NFSB, DC-Fahrzeug, Messergebnisse Außenbereich - Stillstand .....	161
Tabelle 11-6: NFSB, DC-Fahrzeug, Messergebnisse Außenbereich - Stillstand mit Moment gegen die Bremse .....	161
Tabelle 11-7: EMU, AC-Fahrzeug, Messergebnisse Außenbereich - Stillstand.....	171

## 18. Lebenslauf

**Persönliches:**

Name:	Raimund Allesch
Anschrift:	Wopfing 357, 2754 Waldegg
Tel.-Nr.	+43 681 20915605
E-Mail:	raimund.allesch@cnet.at
geboren am:	15. Juni 1967 in Wiener Neustadt
Staatsbürgerschaft:	Österreich
Familienstand:	verheiratet, 1 Kind

**Schulbildung:**

4 Klassen Volksschule  
 4 Klassen AHS  
 1981 - 1986 HTL Elektrotechnik  
 1986 - 1991 Studium der Elektrotechnik (Energietechnik)

**Bundesheer:** 8 Monate Präsenzdienst vom 1.7.1991 - 28.2.1992

**Beruf:**

- Seit 1 Oktober 2013 bei Voith Turbo  
Verantwortlich für die Elektromagnetische Verträglichkeit und Personenschutz hinsichtlich magnetischer Felder und Berührspannung bei Schienenfahrzeugen.
- Von Juli 2003 bis August 2013 bei ELIN EBG Traction bzw. nach Übernahme durch Siemens, ab 1.10.2011, bei Siemens AG Österreich.  
Verantwortlich für die Elektromagnetische Verträglichkeit. Entwicklung von Messsystemen. Mitarbeit bei fehlersicheren Systemen.
- Februar 2001 bis Juni 2003 bei VA-Tech Hydro: Elektrische Berechnung von Synchronmaschinen (hauptsächlich Wasserkraftgeneratoren).
- April 1997 bis Ende Jänner 2001 bei Trafomodern: Produktplanung und Entwicklung aller Komponenten 'rund um den Stromrichter' (Netzfilter, Sinusfilter usw.); Sonderprodukte (Magnetverstärker, Konstantstromquelle), Planung und Ausführung von automatischen Prüfplätzen für die Serienprüfung.
- Mitte Mai 1992 bis Ende März 1997 bei ELIN Antriebstechnik (ELIN EBG Traction): Entwicklungstechniker (GTO und IGBT-Stromrichter), Elektromagnetische Verträglichkeit.
- Mitte März bis Mitte April 1992: ELIN Leitungsbau.

**Besondere Kenntnisse:**

ICAP (Simulationsprogramm für die Schaltungssimulation)  
 LabView (Graphische Programmiersprache für die Mess-, Steuer- und Regeltechnik)  
 Multiphysics (FEM-Programm)

**Hobbys:**

MTB, Skifahren, Tourenski

Wopfing, 08.11.2014

