

# Entwicklung eines H-Feld-Messgerätes mit wechselbaren Sonden zur Messung von hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeldern an einer MFH-Anlage

Diplomarbeit

Okay Tosunoğlu

Matrikelnummer: 700411

Eingereicht am: 17.August 2004

Technische Fachhochschule Berlin

Fachbereich VII – Elektrotechnik – Kommunikationstechnik & Elektronik

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Kappen

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Goßner

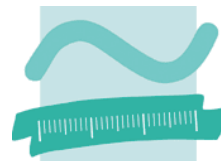
Berlin, den 17.August 2004

## REICHL

Elektromagnetische Verträglichkeit



FM Elektronik Peter Feucht



University of Applied Sciences

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen kenntlich gemacht habe.

Unterschrift

Berlin, den 17. August 2004

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	5
2	Grundlagen .....	7
2.1	Kurzdarstellung zur Entwicklung der EMV .....	7
2.2	Einführung in die elektromagnetischen Felder .....	9
2.3	EMV-Kopplungsmechanismen .....	19
2.3.1	Galvanische Kopplung .....	21
2.3.2	Kapazitive Kopplung .....	23
2.3.3	Induktive Kopplung .....	24
2.3.4	Elektromagnetische Leitungskopplung .....	25
2.4	Apparative Grundlagen zum Funktionsprinzip der MFH- Anlage .....	27
3	Prüfung von Messgeräten .....	29
3.1	Die Physikalisch Technische Bundesanstalt .....	30
3.2	Der deutsche Kalibrierdienst .....	30
4	Entwicklung des Feldstärkenmessgerätes .....	31
4.1	Vorüberlegungen und Anforderungen .....	31
4.2	Schematischer Aufbau einer Messeinrichtung .....	33
4.3	Messprinzip .....	35
4.4	Schaltungskonzept und Realisierung der einzelnen Funktionseinheiten .....	37
4.4.1	Gleichrichter-Einheit .....	38
4.4.2	Versorgungs-Einheit mit DC/DC- Wandler .....	43
4.4.3	LCD-Einheit .....	45
4.5	Fertigung des Messgerätes .....	49
4.5.1	Gehäuse für die Gleichrichtereinheit .....	49
4.5.2	Zusammensetzung der Gleichrichter-Einheit .....	50
4.5.3	Sondenadapter .....	51
4.5.4	Messgerätgehäuse .....	52
4.5.5	LCD-Einheit .....	52
4.5.6	Verteilung der Funktionsgruppen .....	53
4.5.7	Schnittstelle am Messgerät .....	54
4.5.8	Endmontiertes Messgerät .....	56
4.6	Funktionsprüfung des Messgerätes durch Feldsubstitution .....	57

5	Entwicklung der Feldsonden und Beschreibung des Messsystems.....	57
5.1	Vorüberlegungen (Anforderungen an die Feldsonde).....	58
5.2	Überblick über das Messverfahren und theoretischer Hintergrund.....	59
5.3	Fertigung der Sonden.....	66
5.3.1	Wickelkörper.....	66
5.3.2	Schnittstelle zum Sondenadapter.....	70
5.3.3	Fertig gestellte H-Feldsonde .....	71
6	Kalibriervorgang des Messgerätes.....	72
6.1	Vorbereitung der Messung und Ortung der maximalen Feldstärke .....	73
6.2	Messtechnische Ermittlung der homogenen Zone .....	76
6.3	Messfehlerbetrachtung .....	76
7	Feldmessungen am Hyperthermiesystem.....	81
7.1	Vorbereitung der Messung .....	82
7.2	Messergebnisse: Therapiezone .....	85
7.2.1	Auswertung: Therapiezone .....	89
7.3	Messergebnisse: Applikator-Umfeldmessung.....	90
7.3.1	Auswertung: Applikator-Umfeldmessung .....	91
7.4	Gesamtauswertung der Messung .....	93
8	Zusammenfassung und Ausblick .....	95
	Abbildungsverzeichnis .....	96
	Literaturverzeichnis .....	104
	Anhang .....	100

## 1 Einleitung

Der Fortschritt der ständig zunehmenden Elektronik in allen Lebensbereichen ist ein Grund für die Popularität des Begriffes „EMV“ – elektromagnetische Verträglichkeit.

Anwendungen in Privathaushalten, Industrie und Medizin sind nur einige Bereiche, in denen elektromagnetische Wellen nicht nur als eine unerwünschte Nebenerscheinung auftreten, sondern explizit die Aussendung von elektromagnetischen Wellen dazu verwendet wird um den Stand der Technik auch im mobilen Bereich zu nutzen. Viele dieser Anwendungen sind aus dem modernen Leben nicht mehr wegzudenken.

WLAN, Bluetooth oder UMTS sind nur einige Begriffe, die heutzutage den Fortschritt der mobilen Anwendungen für jedermann zugänglich machen.

Auch die Medizinelektronik befasst sich mit Heilungsverfahren durch Erzeugung elektromagnetischer Felder, darunter bildet die „interstitielle Hyperthermie“ eine spezielle Methode, Krebszellen zu töten.

Diese Art von Technologie nutzt die elektromagnetischen Wellen, um in der Krebstherapie durch lokale und regionale Applikation hochfrequente Energie in beschädigte Zellen bzw. Tumore einzukoppeln.

Dieses weite Spektrum der Anwendungsgebiete der elektromagnetischen Wellen darf trotz der ständigen Zunahme der Sender und Empfänger dem Menschen nicht schaden und andere technische Einrichtungen nicht stören.

Die hierzu veröffentlichten Verordnungen vom Gesetzgeber dienen dem Schutz und sollen Schädigungen vorbeugen (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26.BImSchV).

Seit 1996 gibt es in Europa für elektrotechnische Produkte rechtlich verbindliche Regelungen zur Einhaltung der Minimalanforderungen bezüglich elektromagnetischer Störfestigkeit und Störaussendung [EMV-Gesetz].

Diese Arbeit umfasst die Entwicklung, Fertigung und Anwendung eines messtechnischen Gerätes. Anschließend wird die Größenordnung einer möglichen elektromagnetischen Beeinflussung bzw. Störaussendung der Hyperthermie-Apparatur überdacht.

Bei der zu vermessenden Einrichtung handelt es sich um eine medizintechnische Anlage. Die biologischen Wirkungen sind hierbei nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Der Feldapplikator befindet sich im Virchow-Klinikum und ist vom Entwickler des neuen Krebstherapieverfahrens „MFH Hyperthermiesysteme GmbH“ und „MagForce Applications GmbH“ zur Verfügung gestellt worden. Für den Aufbau und die Instandhaltung der Anlage ist die Firma „FM-Elektronik“ verantwortlich.

Die Herstellung und die Entwicklung des Konzepts des Messgerätes erfolgten im EMV-Labor des Ingenieurbüros Günter Reichl.

Bisher sind an der oben genannten Apparatur nur grobe Messungen durchgeführt worden bzw. realistische Worst-Case-Abschätzungen sinnvoll angenommen worden, so dass erst nach einer speziell dafür entwickelten Messausrüstung aussagekräftige Ergebnisse geliefert werden können.

Die vorliegende Facharbeit enthält sowohl praktische als auch theoretische Teilbereiche. Die Konzipierung und Entwicklung der Hardware wurde eigenständig durchgeführt.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Entwicklung von 3-dimensionalen H-Feldsonden mit unterschiedlichen Empfindlichkeitsstufen ( $19.9\text{kA/m}$ ,  $1999\text{A/m}$  und  $199.9\text{A/m}$ ) und einem Feldstärkenmessgerät mit einer digitalen Anzeige.

Nach der Fertigung des Messgerätes erfolgt die Kalibrierung der Messeinrichtung. Anschließend werden Messungen durchgeführt und eine Auswertung der Messung erstellt.

Zusammenfassend sind die wichtigsten Aussagen aus den einzelnen Kapiteln mit einem Ausblick auf zukünftige Messmethoden und Verbesserungen der Messmethodik aufgeführt.

Für das Verständnis der möglichen EMV-Beeinträchtigungen sind grundlegende EMV-Kenntnisse in einem Kapitel zusammengefasst.

## 2 Grundlagen

Die Grundlagen beinhalten einen Einblick in die elektromagnetische Verträglichkeit und ihren Einfluss auf ihre Umgebung.

Anliegen dieses Kapitels ist die Vermittlung der Grundlagen der elektromagnetischen Wellen und der elektromagnetischen Kopplungsmechanismen.

Im Hinblick auf die möglichen Störaussendungen eines Feldapplikators umfassen diese theoretischen Grundlagen Wissensgebiete, die dazu ausreichen, um elektromagnetische Beeinträchtigungen auf ihre Ursachen zurückzuführen. Hierdurch wird das Verständnis einer Immunitäts- bzw. Störfestigkeitsprüfung elektronischer Geräte im Umfeld des Feldapplikators vereinfacht.

Im Anschluss daran wird die prinzipielle Funktions- und Anwendungsweise der MFH-Therapie beschrieben, um einen Bezug zum Messobjekt zu bekommen.

### 2.1 Kurzdarstellung zur Entwicklung der EMV

Die Thematik der EMV ist seit Bestehen der Elektrotechnik ein nicht zu vernachlässigender Begleiter. Deshalb ist es unumgänglich, einen Überblick über die möglichen Störfaktoren bei der Aussendung von elektromagnetischen Wellen zu erhalten.

„Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) ist Fähigkeit eines elektrischen Gerätes oder Systems, in seiner elektromagnetischen Umgebung bestimmungsgemäß zu funktionieren, ohne störend zu beeinflussen oder von ihr beeinflusst zu werden“ (EMVG).

Die elektromagnetische Verträglichkeit dient als wichtiges Qualitätsmerkmal eines Produkts. Für eine optimale EMV-Sicherung sind bereits während der Konzeptphase eines Produktes entsprechende Maßnahmen vorzusehen.

Die Definition der EMV ist in weitere Unterteilungen gegliedert, darunter die Störaussendung (EMI) und die Immunität bzw. Störfestigkeit (EMS).

Die Einhaltung von Maximalwerten für die Störaussendung und von Minimalwerten für die Störfestigkeit ist vom Gesetzesgeber festgelegt.

Der ständig wachsende Fortschritt in allen Lebensbereichen steigert die Anzahl der Störquellen und gleichzeitig der beeinflussbaren Funktionseinheiten (Störsenken).

In Industrie, Verkehr und Medizin steigern elektrisch betriebene Maschinen und Geräte die Wahrscheinlichkeit, eine Störung hervorzurufen.

In jedem Haushalt finden wir komfortable elektrische Maschinen, die uns Zeit und Kraft abnehmen. Im Prinzip ist eine elektrische Maschine eine Störquelle und Störsenke zugleich.

Typische Beispiele für Störsenke und Störquelle sind:

#### Störquellen:

- E-Motoren und Leistungselektronik (z.B. ICE)
- Schaltkontakte
- Leuchtstofflampen
- Sendeanlagen (z.B. UKW-Sender, Mobilfunktelefone, WLAN, Bluetooth)
- Portable Electronic Devices (tragbare CD-Player, Notebooks)
- Entladungen statischer Elektrizität (z.B. Gewitter-Blitze)

#### Störsenken:

- Consumer- Elektronik
- EDV-Anlagen
- Mess-, Steuer- und Regelungselektronik
- Funkempfänger (z.B. Fernseher, Radio)
- Sensoren (z.B. für Airbags)
- Herzschrittmacher sowie allgemeine Medizinelektronik

Die Problematik bei der Ermittlung der ausgesendeten magnetischen Feldstärken einer elektrischen Einrichtung setzt einige grundlegende Kenntnis im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) voraus.

Die notwendigen technischen Erläuterungen werden im nächsten Abschnitt behandelt. Aufgrund des komplexen Themengebiets werden nur einige Teilgebiete der EMV angesprochen.

## 2.2 Einführung in die elektromagnetischen Felder

Das elektromagnetische Feld ist durch gleichzeitige Wirkung von Magnetfeld und elektrisches Feld gekennzeichnet.

Die maxwellschen Gleichungen in der allgemeinsten Form bilden die Grundlage zur Behandlung elektromagnetischer Wellen. Die maxwellschen Gleichungen beschreiben die sehr enge Verknüpfung zwischen elektrischen und magnetischen Feldern.

Beide Felder „induzieren“ sich gegenseitig. Wenn dieser Vorgang nicht an einen Ort gebunden ist, sondern im Raum fortschreitet, liegt eine elektromagnetische Welle vor.

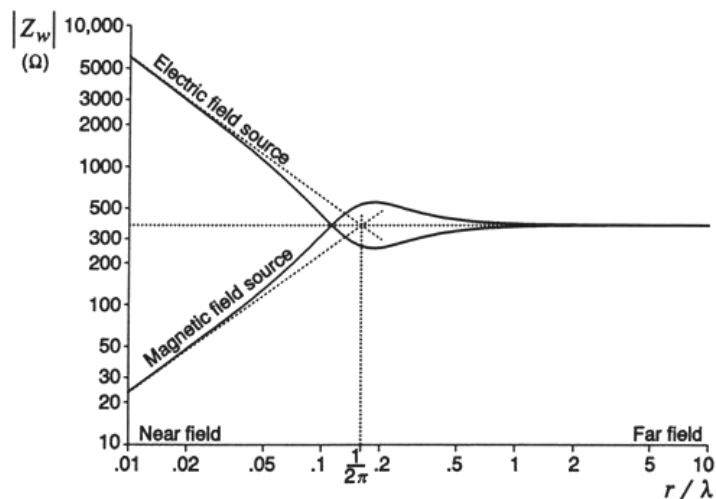
In den folgenden Abschnitten wird insbesondere die magnetische Komponente der elektromagnetischen Felder behandelt, da das Messgerät nur für die Erfassung der magnetischen Feldgröße vorgesehen ist.

Magnetische Felder entstehen, wenn Strom fließt. Als Magnetfeld wird der Zustand des Raumes beschrieben, der durch die Bewegung elektrischer Ladungen entsteht bzw. verändert wird. Die meisten Materialien werden ungehindert durchdrungen. Man kann Magnetfelder nicht abschirmen, sondern nur mittels magnetisch leitender Materialien um den zu schützenden Bereich herumführen. Die effektivste Art die magnetische Feldstärke zu reduzieren, sind die Maßnahmen an der Quelle selbst. Sie durchdringen auch den menschlichen Körper ungehindert und erzeugen im Körperinneren mit wachsender Frequenz zunehmend Wirbelströme.

Im hochfrequenten Bereich kann man elektrisches und magnetisches Feld nicht mehr ohne weiteres trennen (Abb. 2.2-1), da beide zumindest im Fernfeld über den Freiraumwellenwiderstand  $Z_0$  fest miteinander verknüpft sind. Hier gilt:

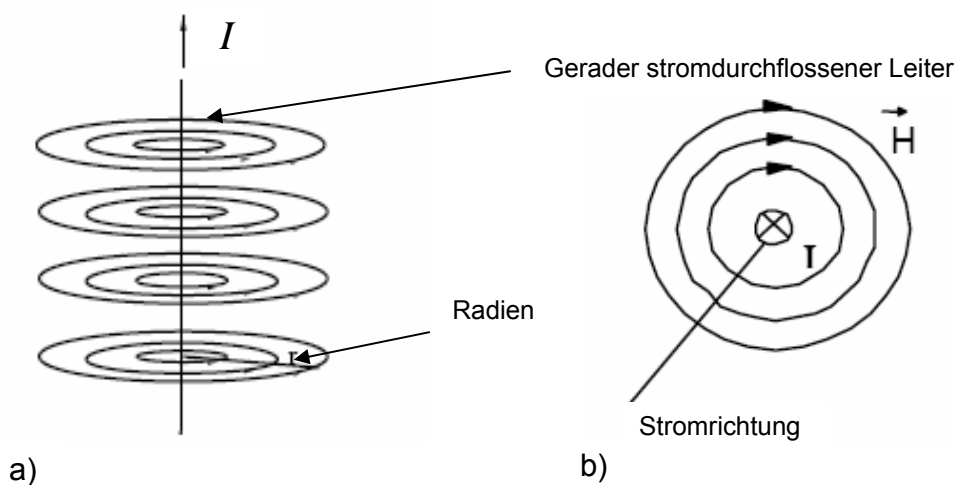
$$Z_0 = \frac{E}{H} = 120\pi\Omega \approx 377\Omega \quad (1)$$

Im Nahfeld, welches bis zum Abstand  $\frac{\lambda}{2\pi}$  von der Antenne reicht, hängt es von der Art der Antenne ab, ob das elektrische oder das magnetische Feld dominiert.



**Abb. 2.2-1:** Elektrische und magnetische Feldkomponente im Nah- und Fernfeld

Wie stark die einzelnen Komponenten sind, ist jedoch nur sehr schwierig zu errechnen. Die magnetischen Felder können anhand von (fiktiven) Feldlinien (Abb. 2.2-2a) charakterisiert werden.



**Abb. 2.2-2:** Magnetische Feldlinien

Dabei bilden die magnetischen Feldlinien konzentrische Kreise um einen geraden geschlossenen Leiter. Um das magnetische Feld zu beschreiben, wird die magnetische Feldstärke  $H$  eingeführt. Die quantitative Untersuchung eines geraden stromdurchflossenen Drahtes ergibt, dass die magnetische Feldstärke proportional der Stromstärke  $I$  und umgekehrt proportional dem Abstand vom Draht  $r$  ist:

Die Richtung des Stromes lässt sich mithilfe der Rechtschraubregel (Abb. 2.2-2b) erkennen.

$$H \sim I \quad (2)$$

$$H \sim \frac{1}{r} \quad (3)$$

Das Magnetfeld eines Stromes besitzt immer in sich geschlossene Feldlinien, d.h. es hat weder Quellen noch Senken. Magnetische Felder sind immer Wirbelfelder.

Eine direkte Beziehung der Magnetfeldstärke zum Leiterstrom kann über das Durchflutungsgesetz hergestellt werden.

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \Theta \quad (4)$$

Das Linienintegral der Magnetfeldstärke über jede geschlossene Kurve  $C$  ist gleich dem Gesamtstrom, der die von  $C$  umschlossene Fläche durchsetzt. Aus Symmetriegründen ist das Magnetfeld  $H$  überall auf dem Rand dieser Kreisfläche gleich.

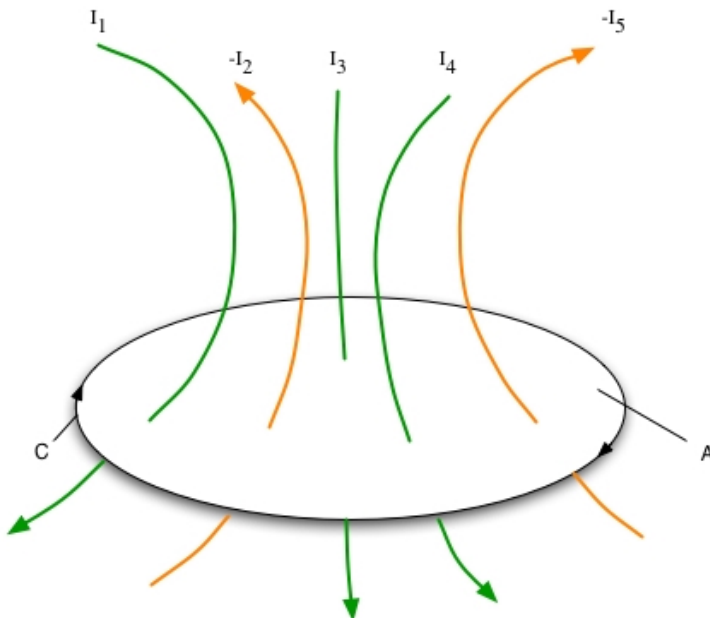
Aus Gleichung (4) ergibt sich demnach:

$$H = \frac{I}{2\pi r} = \frac{I \cdot N}{l} = \frac{\Theta}{l} \quad (5)$$

Aus dieser Beziehung folgt die Einheit für die magnetische Feldstärke:  $[A/m]$

Die nächste Abbildung (Abb. 2.2-3) dient der Veranschaulichung zur Durchflutung (Gl. 6).

$$\Theta = I_1 - I_2 + I_3 + I_4 - I_5 \quad (6)$$



**Abb. 2.2-3:** Durchflutung

Die Einzelströme lassen sich durch die Summation unter Berücksichtigung des Vorzeichens zusammenfassen. Dabei werden Ströme mit gleicher Richtung positiv gerechnet.

Ein von Wechselstrom durchflossener Leiter erzeugt ebenfalls magnetische Wechselfelder. Über das Induktionsgesetz lassen sich solche Wechselfelder mathematisch beschreiben. Eine Magnetfeldänderung in einer geschlossenen Drahtschlinge verursacht einen Strom, der während der Änderung fließt.

Wenn in einer geschlossenen Drahtschlinge das hindurchgreifende Magnetfeld sich ändert, dann wird in ihr ein Strom induziert. Allerdings ist die Folge der Magnetfeldänderung primär eine Spannungsinduktion, die nur dann einen Strom hervorruft, wenn die Drahtschlinge geschlossen ist. Diese Induktionserscheinungen sind nicht allein durch die magnetische Feldstärke  $H$  maßgeblich, sondern sind mit der Induktionsflussdichte  $B$  eng verknüpft. Die mathematische Beziehung dieser Vektorgröße beschreibt die zweite Maxwell-Gleichung (Gl. 6).

$$\oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (7)$$

Das Vektorfeld der magnetischen Flussdichte  $B$  entsteht durch magnetische Dipole. Bei der Integration über eine geschlossene Fläche summiert man die Feldliniendichte auf und stellt fest, dass genauso viele Feldlinien die geschlossene Fläche verlassen wie eintreten. Da es keine magnetischen Monopole gibt, ist das Integral immer Null. Die Einführung dieser magnetischen Feldgröße ist unter anderem deswegen erforderlich, weil Materialien, besonders Eisen, Einfluss auf das Verhalten des magnetischen Feldes haben (z.B. Einführen von Eisen in Luftspule).

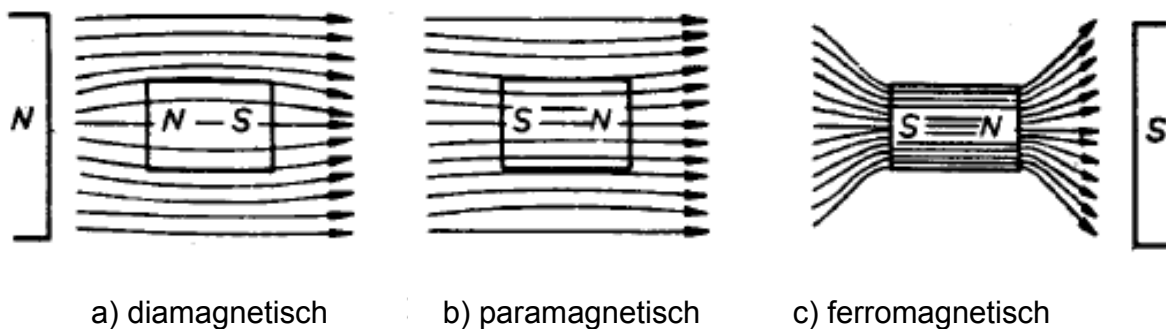
Der Zusammenhang dieser magnetischen Feldgrößen hängt in isotropen Materialien über die Beziehung (Gl. 8)

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} \quad (8)$$

zusammen, wobei  $\mu$  die Permeabilität ist,  $\mu_0$  die international festgelegte magnetische Feldkonstante (Gl. 9),

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am} \quad (9)$$

und  $\mu_r$  die materialabhängige relative Permeabilität oder Permeabilitätszahl.



**Abb. 2.2-4:** Permeabilität

Sie ist für diamagnetische Stoffe (Abb. 2.2-4a) wie z.B. Wasser ungefähr 1 ( $\mu_r < 1$ ), für paramagnetische Stoffe (Abb. 2.2-4b) wie z.B. Luft ebenfalls ungefähr 1 ( $\mu_r > 1$ ) und nimmt für ferromagnetische Stoffe (Abb. 2.2-4c) abhängig von der umgebenden Feldstärke sehr große Werte an ( $\mu_r \gg 1$ ).

Die Einheit der magnetischen Flussdichte ist Tesla [T] bzw. Gauß [G]=[1T=10<sup>4</sup>G].

$$[B] = \frac{Vs}{m^2} = T \quad (10)$$

Es ist mittlerweile üblich, dass häufig anstelle der magnetischen Feldstärke  $H$  die magnetische Flussdichte  $B$  als Maß für die Stärke eines Magnetfeldes benutzt wird. Eine grundlegende Eigenschaft der Flussdichte  $B$  ist ihre Quellenfreiheit.

Wird durch eine stromdurchflossene Spule ein magnetisches Feld erzeugt, das gleichzeitig mit einem Fluss  $\phi$  eine Leiterschleife durchsetzt, so wird mit einem an die Leiterschleife angeschlossenen Spannungsmessinstrument dann eine induzierte Spannung beobachtet, wenn der durch die Leiterschleife gehende magnetische Fluss  $\phi$  sich zeitlich ändert, etwa durch Änderung des Stromes in der felderzeugenden Spule oder durch Kippung des induzierenden Feldes gegen die Schleifenfläche, dann bezeichnet man diesen Zustand als Induktion.

Danach ergibt sich das Induktionsgesetz (Gl. 11)

$$U_i = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (11)$$

$$U_i = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(B \cdot A) \quad (12)$$

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{A} \quad [Vs] = [Wb] \quad (13)$$

wobei  $N$  die Zahl der Windungen der Leiterschleife ist.

Das Minuszeichen kennzeichnet, dass die Richtung der induzierten Spannung sich aus der Feldänderungsrichtung entgegengesetzt dem Rechtsschraubensinn ergibt.

Dieser Zusammenhang gilt unabhängig davon, auf welche Weise der magnetische Fluss in der Leiterschleife geändert wird, ob durch Änderung des Magnetfeldes  $B$  bei stationärer Leiterschleife oder durch Änderung der Schleifenfläche  $A$  bei konstantem Magnetfeld.

$$U_i = -\frac{d}{dt} \int_A \vec{B} d\vec{A} \quad (14)$$

Das Flächenintegral der Flussdichte ergibt den magnetischen Fluss. Die Zeitableitung des magnetischen Flusses ist die negative Induktionsspannung (Abb. 2.2-5).

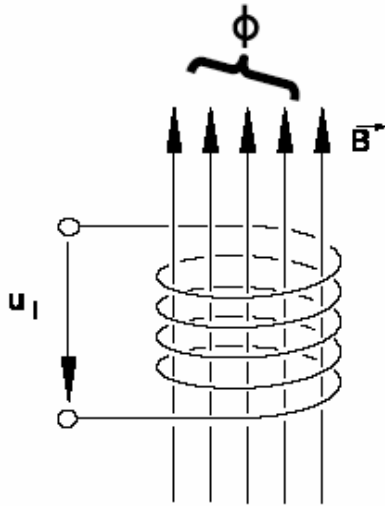


Abb. 2.2-5: Spannung in einer Leiterschleife

Zur Beschreibung der Stärke eines elektromagnetischen Feldes wird die Leistungsflussdichte verwendet. Sie gibt die Leistung (= Energie pro Zeiteinheit) in Watt (W) an, die senkrecht zur Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle auf eine Fläche ( $A$  in  $m^2$ ) trifft.

Sowohl die elektrische (Gl. 16) als auch die magnetische Feldstärke (Gl. 15) sind mit der Leistungsflussdichte im Fernfeld fest miteinander verknüpft und können daher ineinander umgerechnet werden:

$$S = \frac{(H \cdot Z_0)^2}{377\Omega} \quad (15)$$

mit  $H = \frac{E}{377\Omega}$  folgt  $S = \frac{E^2}{377\Omega} \quad (16)$

Die Einheit der Leistungsflussdichte ist Watt pro Quadratmeter (Gl. 17). Dabei gilt:

$$1 \frac{W}{m^2} = 1000 \frac{mW}{m^2} = 1000000 \frac{\mu W}{m^2} \quad (17)$$

Wie bereits erwähnt, ist die Beurteilung der Exposition zu unterscheiden, ob Nah- oder Fernfeldbedingungen vorliegen.

Das Fernfeld einer Strahlungsquelle ist dadurch gekennzeichnet, dass dort die Vektoren der elektrischen und magnetischen Feldstärke senkrecht aufeinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stehen und keine gegenseitigen Phasendifferenzen vorliegen. Durch den Feldwellenwiderstand (Gl. 1) sind die elektrische und die magnetische Feldstärke direkt miteinander verknüpft. Demnach genügt die Messung einer dieser beiden Größen. Die andere Größe kann durch die Beziehung aus Gleichung (1) berechnet werden.

Im Nahfeld gelten andere Bedingungen, denn die elektrischen und magnetischen Feldstärken haben im Allgemeinen verschiedene gegenseitige Phasendifferenzen.

Eine einfache Umrechnung zwischen den Feldgrößen ist nicht möglich. Im Nahfeld müssen daher die elektrische und magnetische Feldstärke bzw. magnetische Flussdichte einzeln gemessen und bewertet werden.

Die besten Ergebnisse bei Messungen bis 1GHz können durch getrennte Messungen ermittelt werden, d.h. die elektrische und magnetische Feldstärkenkomponente sollte mit einem dafür geeigneten Messwertaufnehmer ermittelt werden.

Elektrische und magnetische Felder, die sich über die Zeit nicht verändern, nennt man Gleichfelder oder statische Felder. Bei elektrischen Wechselfeldern ändert sich die Polarität (+/-) des Feldes mit der Zeit. Fließt ein Strom, d.h. werden elektrische Ladungen bewegt, entstehen zeitgleich magnetische Wechselfelder.

Umgekehrt erzeugen magnetische Wechselfelder elektrische Wirbelfelder und Ströme (Induktion).

Wechselfelder werden anhand ihrer zeitlichen Form (z.B. sinusförmig) und Frequenz  $f$  beschrieben.

Die elektrischen und magnetischen Felder stehen in engem Zusammenhang. Elektrische Felder bewegen elektrische Ladungen, bewegte elektrische Ladungen erzeugen magnetische Felder und magnetische Wechselfelder erzeugen (induzieren) elektrische Felder. Die wechselseitige enge Verknüpfung ist umso stärker, je schneller die Feldänderungen erfolgen, d.h. je höher die Frequenz ist. Bei hohen Frequenzen über 30kHz kann daher das elektrische Feld nicht mehr getrennt betrachtet werden. Man spricht von elektromagnetischen Feldern oder Wellen.

Elektromagnetische Felder können sich von der Quelle, z.B. einer Antenne, lösen und sich im Raum über große Entfernungen ausbreiten (Übertragungstechnik).

Im Vakuum und in guter Näherung in Luft ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen für alle Frequenzen gleich und entspricht der Lichtgeschwindigkeit  $c$ .

Daraus leitet sich folgender physikalischer Zusammenhang zwischen der Wellenlänge  $\lambda$ , der Frequenz  $f$  einer Welle sowie der Lichtgeschwindigkeit  $c$  ab (Gl. 18):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [m] \quad (18)$$

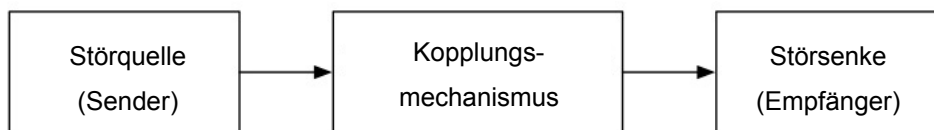
Der physikalische Begriff der elektromagnetischen Wellen bzw. Felder und Strahlen umfasst einen weiten Frequenzbereich. In einer groben Aufteilung wird der Bereich bis etwa 30kHz als Niederfrequenz und der Bereich von 100kHz bis 300GHz als Hochfrequenz bezeichnet. Das Frequenzband von 30kHz bis 300MHz wird oft als Radiofrequenz, zusammengesetzt aus Langwellen (LW), Mittelwellen (MW), Kurzwellen (KW) und Ultrakurzwellen (UKW), der Bereich von 300MHz bis 300GHz als Mikrowellen bezeichnet. Bei der Betrachtung des weiten Frequenzbereiches der elektromagnetischen Felder sind die nichtionisierenden Felder und Wellen von den ionisierenden Strahlen zu unterscheiden.

Die ionisierenden UV-, Röntgen- oder Gamma-Strahlen tragen eine hohe elementare Energie und können die Bindungen zwischen Atomen und Molekülen im Körper auflösen. Eine Schädigung durch solche Strahlen, die sich mit der Expositionszeit addieren, kann sogar Krebs auslösen.

Zur Erläuterung der unterschiedlichen Wirkungsweisen dieser Felder ist eine weitere Einteilung in Gleichfelder, niederfrequente elektrische und magnetische Wechselfelder sowie hochfrequente elektromagnetische Felder erforderlich, auf die in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen wird.

## 2.3 EMV-Kopplungsmechanismen

Die Art der Störbeeinflussung zu erkennen, ist wohl die schwierigste Aufgabe bei der Behandlung von EMV-Problemen. Die untere Abbildung (Abb.2.3-1) zeigt das grundsätzliche Modell, nach welchem die Störung erfolgt.

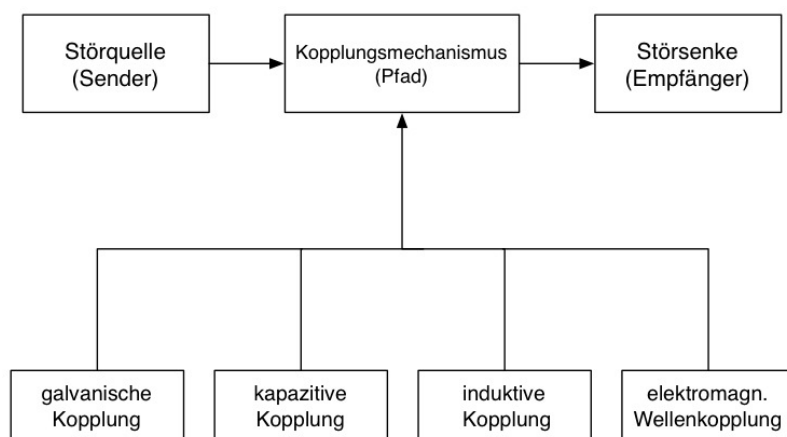


**Abb. 2.3-1:** EMV-Beeinflussungsmodell

Eine Störquelle (elektrisches oder elektronisches Gerät) wirkt als Sender und beeinflusst über einen Koppelmechanismus ein zweites Gerät, welches als Empfänger für das Störsignal funktioniert. Gehören Quelle und Senke verschiedenen Systemen an, wird der Vorgang als Intersystem-Beeinflussung bezeichnet. Im Gegensatz dazu spricht man von einer Intrasystem-Beeinflussung, wenn Sender und Empfänger im gleichen System eingebaut sind. Nachdem in der Praxis eine Störbeeinflussung zwischen zwei Geräten festgestellt werden konnte, muss zuerst der Koppelmechanismus gefunden werden.

In der nächsten Abbildung (Abb. 2.3-2) unterscheidet man vier verschiedene Koppelmechanismen, welche nachfolgend näher erläutert werden.

Für jeden dieser Koppelvorgänge gibt es geeignete Schutzmaßnahmen, mit denen der Störeinfluss verringert werden kann. Aus wirtschaftlichen Gründen und soweit technisch durchführbar, wird man jedoch zuerst eine möglichst hohe Verträglichkeit des Senders anstreben (Primärmaßnahmen) und die Härtung einer Vielzahl von Empfängern erst in zweiter Linie ins Auge fassen (Sekundärmaßnahmen).



**Abb. 2.3-2:** EMV-Kopplungsmechanismen

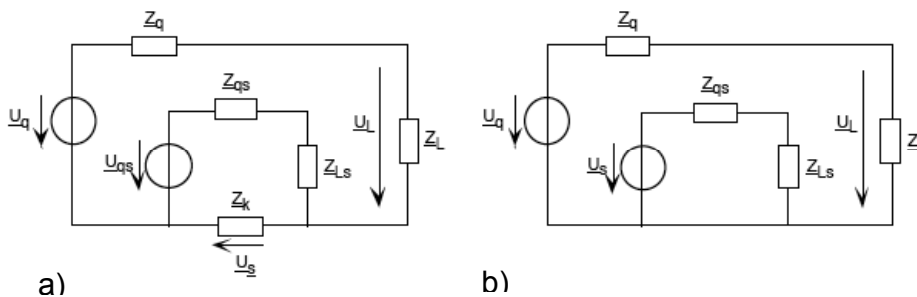
Es können hierbei vier verschiedene Kopplungsmechanismen beschrieben werden, die in der Praxis allerdings nur selten in reiner Form auftreten:

- Galvanische Kopplung
- Kapazitive Kopplung
- Induktive Kopplung
- Strahlungskopplung

Die Beeinflussungspfade sind häufig parasitärer Natur, welche der Entwickler einer Schaltung oder der Konstrukteur eines Gerätes zwar nicht vorgesehen, aber trotzdem eingebaut hat.

### 2.3.1 Galvanische Kopplung

Die galvanische Kopplung tritt dann auf, wenn zwei oder mehr Stromkreise einen gemeinsamen Leiter (gemeinsame Impedanz) besitzen (Abb. 2.3-3). In der Praxis kommt die galvanische Beeinflussung durch den gemeinsamen Widerstand von Netzteilen, durch gemeinsame Leiterzüge (z.B. Versorgungsleiter) und durch das Schutzleiter- bzw. Erdungssystem zustande.



**Abb. 2.3-3:** Galvanische Kopplung: a) Entstehung b) Eliminierung

Die Störquelle  $\underline{U}_{qs}$  erzeugt eine Störspannung  $\underline{U}_s$  über der gemeinsamen Impedanz  $\underline{Z}_k$ , welche für kleine Koppelimpedanzen mit nahezu gleichem Wert auch über  $\underline{Z}_q + \underline{Z}_L$  auftritt. In diesem Fall ist

$$\underline{U}_L \approx (\underline{U}_q - \underline{U}_s) \cdot \frac{\underline{Z}_L}{(\underline{Z}_q + \underline{Z}_L)}. \quad (19)$$

Eliminiert man die Koppelimpedanz ( $\underline{Z}_k = 0$ ), so verschwindet die Störspannung.

Die Störungen wirken sich besonders dann aus, wenn in einer Last plötzlich Laständerungen auftreten, welche zu einem raschen Anstieg oder Abfall des Speisestromes führen.

Über die Induktivität der gemeinsamen Zuleitung erzeugen diese eine induktive Spannung, welche ohne weiteres zu Störungen in einer der angeschlossenen Schaltungen führen kann.

Die Bemühungen  $\underline{Z}_K$  so klein wie möglich zu halten, sind nicht einfach zu realisieren, da eine ohmsche Betrachtung nur bis zu einer Frequenz von einigen Kilohertz zulässig ist. Bei höheren Frequenzen muss der Realität Rechnung getragen und die Kopplungsimpedanz als Serienschaltung eines ohmschen Widerstands und einer Induktivität betrachtet werden (Gl. 20):

$$\underline{Z}_K = R_K + j\omega L_k \quad (20)$$

Ist der Rückleiter als lose verlegter, dünner Draht von kreisförmigem Querschnitt ausgeführt, so kann man bei höheren Frequenzen für den induktiven Anteil von  $\underline{Z}_K$  etwa  $1\mu H/m$  ansetzen. Dies führt ab einer Frequenz von 100kHz und bei einer Leitungslänge von 1m zu einer Impedanzerhöhung auf ca.  $1\Omega$ .

Weiterhin entspricht der ohmsche Anteil  $R_K$  nur dann dem konstanten Wert des Gleichstromwiderstandes, solange der gesamte Leiterquerschnitt vom Strom durchflossen wird. Für höhere Frequenzen tritt eine Stromveränderung auf (Skineneffekt), die durch die äquivalente Leitschichtdicke  $\delta$  (Gl. 21) beschrieben wird.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \sigma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad (21)$$

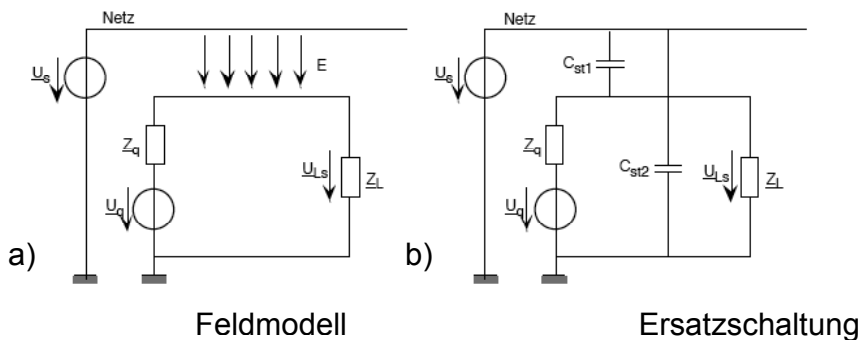
Aus der Formel (Gl. 21) ist ersichtlich, dass der Wechselstromwiderstand mit der Wurzel der Frequenz ansteigt, sobald die äquivalente Leitschichtdicke dünner wird als der halbe Leiterdurchmesser oder die halbe Leiterdicke bei rechteckigen Leitern. Entkopplung tritt also dann auf, wenn die Mantelstärke ein Mehrfaches der Eindringtiefe beträgt.

Dies gilt nur für Kabel mit einem massiven Außenleiter und nicht für solche mit einem Geflecht, bei welchem  $\underline{Z}_K$  nach einer anfänglichen Abnahme wieder ansteigt, da das magnetische Feld durch die Schlitze im Geflecht zunehmend hindurchdringt.

### 2.3.2 Kapazitive Kopplung

Voraussetzung für die Untersuchung der kapazitiven Kopplung ist, dass die zu betrachtenden Abmessungen klein gegenüber der Wellenlänge sind ( $l < \lambda/10$ ), weil andernfalls die Kopplung als gestrahlte Störbeeinflussung behandelt werden muss.

Mit der kapazitiven Kopplung wird die Signalübertragung von einem System auf ein zweites aufgrund des elektrischen Feldes beschrieben. Hierbei erfolgt die Einkopplung eines Störsignals über das relativ langsam ändernde elektrische Feld (quasistatisches Feld). Sehr häufig geschieht dies vom Netz her (Abb. 2.3-4).

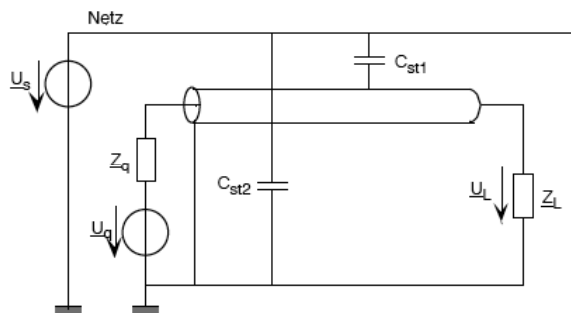


**Abb. 2.3-4:** Elektrische Kopplung zweier Stromkreise

Das Feldmodell aus der Abbildung 2.3-4a kann durch eine Ersatzschaltung mit den beiden Streukapazitäten  $C_{st1}$  und  $C_{st2}$  ersetzt werden.

Die eingekoppelte Störspannung an der Nutzlast ( $U_{Ls}$ ) ergibt sich aus einer Spannungsteilung zwischen der Reaktanz von  $C_{st1}$  und der Parallelschaltung von  $Z_q$  und  $Z_L$ . Sie ist dann besonders groß, wenn sowohl  $Z_q$  als auch  $Z_L$  hochohmig sind.

Mithilfe eines niederohmigen Nutzkreises können die kapazitiven Störeinflüsse stark verringert werden. Fast vollständig eliminieren kann man sie durch Abschirmung (Abb. 2.3-5) der Schaltung mit einem geerdetem Schirm (z.B. Koaxialkabel). Durch den Schirm werden die über die Streukapazität fließenden Störströme direkt nach Masse abgeleitet.



**Abb. 2.3-5:** Verringerung der kapazitiven Kopplung durch einen geerdeten Schirm

Meistens sind eine parallel verlaufende Verkabelung in Geräten bzw. Anlagen oder parallel laufende Leiterbahnen auf Leiterplatten für die kapazitive Kopplung verantwortlich. Die Kapazität zwischen den einzelnen Leitungen bestimmt den gegenseitigen Störeinfluss.

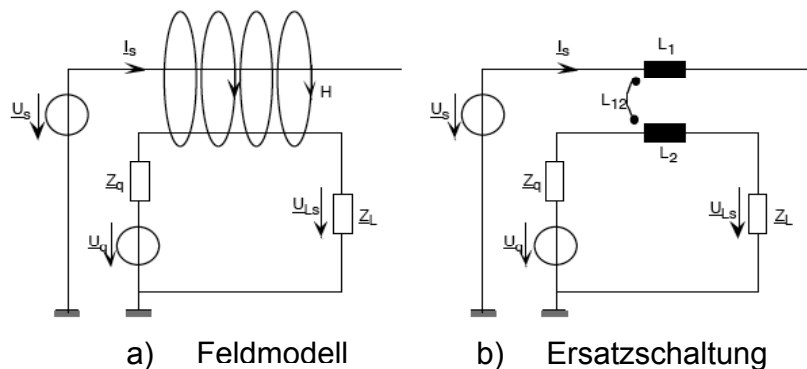
Sie ist längenproportional und wird üblicherweise in  $pF/m$  angegeben.

### 2.3.3 Induktive Kopplung

Erfolgt die Einkopplung von Störungen über das magnetische Feld, so spricht man von induktiven Störungen. Die induktive Kopplung kann mittels gekoppelter Spulen dargestellt werden (Abb. 2.3-6b).

Induktive Störungen können von großen Netzströmen verursacht werden.

Bei höheren Frequenzen können aber auch andere Quellen bei kleineren Strömen zu störenden Störspannungen führen.



**Abb. 2.3-6:** Beispiel für die magnetische Kopplung zweier Stromkreise

Genauso wie bei der kapazitiven Beeinflussung liegt nur dann eine rein induktive Störung vor, wenn die Abmessungen der Leiterschleife im Vergleich zu  $\lambda/4$  der Wellenlänge des anregenden Magnetfeldes klein sind.

Geeignete Gegenmaßnahmen gibt es hier in größerer Zahl.

Zunächst könnte die Schleife verkleinert werden (Drähte verdrillen). Dies ist die einfachste und meist sehr wirksame Gegenmaßnahme. In einigen Fällen kann durch eine Vergrößerung des Abstandes zwischen Störkreis und Nutzkreis der Störeinfluss reduziert werden. Eine geeignete orthogonale Anordnung der Schleifen kann die Kopplung wesentlich verkleinern. Die parallele Leitungsführung sollte möglichst kurz gehalten werden.

### 2.3.4 Elektromagnetische Leitungskopplung

Sind die Abmessungen des Gerätes oder die Verbindung zwischen Geräten, welche Störspannungen aufnehmen, nicht mehr klein gegenüber der Wellenlänge der Störquelle, so erfolgt die Kopplung nicht nur über das magnetische oder elektrische Feld, sondern es sind beide Felder an der Kopplung beteiligt. Man spricht dann von Strahlungskopplung, da man dann davon ausgehen kann, dass sich der gestörte Apparat im Fernfeld ( $l \gg \lambda/2\pi$ ) eines elektromagnetischen Strahlers befindet.

Das magnetische und das elektrische Feld sind im Fernfeld über den Wellenwiderstand des freien Raumes  $Z_0 = 377\Omega$  verknüpft. Im Nahfeld ( $l \ll \lambda/2\pi$ ) überwiegt das H-Feld, wenn  $I$  in der Quelle sehr groß und  $U$  sehr klein ist.

Das E-Feld überwiegt, wenn  $I$  sehr klein und  $U$  sehr groß ist. Leiterbahnen auf Platinen oder Verdrahtungen in Gehäusen können hierbei als Empfangsantenne wirken. Dargestellt werden diese Arten der Beeinflussung durch induktive bzw. kapazitive Kopplung. Je nach Länge der Leitung, der Ausrichtung zum Feld und ihrer Koppelwirkung bezüglich einer Feldkomponente kann die Störspannung höhere oder niedrigere Werte erreichen.

Maßnahmen zur Verbesserung der EMV können sowohl an Sender und Kopplungspfad als auch am Empfänger durchgeführt werden. Diese können durch Optimierung des Schaltungslayouts, Filterung oder Schirmung erreicht werden. Den besten Schutz gegen unerwünschte Abstrahlung als auch unerwünschte Beeinflussung durch Störeinstrahlung bietet ein metallisch dichtes, d.h. rundes geschlossenes Gehäuse. Hierbei ist zu beachten, dass die Abschirmung magnetischer Felder gesondert behandelt werden muss.

Das Erkennen von Kopplungsmechanismen verlangt ein physikalisches Verständnis der analogen Schaltungstechnik, der Wirkungsweise von Erd- und Masseverbindungen und der Wirkungsweise von Schirmen.

Der Sachverhalt bezogen auf geeignete Entstörkomponenten, um verschiedene Arten von Störungen bei Störsenken zu reduzieren oder weitgehend zu verhindern, ist ein Thema für sich und müsste ebenfalls gesondert behandelt werden.

Zahlreiche Aspekte der EMV sind nicht oder kaum erwähnt. Bei einer ausführlichen Behandlung des Themas müssten noch folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Untersuchung der häufigsten Störquellen und ihre Störspektren
- präzise Analyse der Kopplungsmechanismen, insbesondere Wirkung von Schirmen
- die umfangreiche EMV-Messtechnik, ohne die eine Bestätigung (oder eben auch nicht) der betroffenen Maßnahmen nicht zu erreichen ist
- eine Berücksichtigung der EMV-Normen

Das Gebiet der EMV ist ein sehr komplexes Fachgebiet, das Kenntnisse im Bereich der theoretischen Elektrotechnik fordert und zudem recht viel Erfahrung voraussetzt.

## 2.4 Apparative Grundlagen zum Funktionsprinzip der MFH-Anlage

Das Konzept des zu entwickelnden Messgerätes setzt einige grundlegende Kenntnisse über die zu vermessende Einrichtung voraus. Hierzu wird in diesem Abschnitt die prinzipielle Funktionsweise der Magnetfeld-Hyperthermie-Anwendung erläutert.

Ein magnetischer Feldapplikator (Hyperthermie-System) im Virchow-Klinikum soll auf Störfestigkeit geprüft werden, d.h. die Überlagerung von Emissionen verschiedener Quellen soll vermessen werden und gegebenenfalls dazu dienen, neue Grenzwertregelungen zu fordern.

Das Verfahren der Magnet-Flüssigkeits-Hyperthermie wird wie folgt kurz beschrieben.

Einige neue Technologien erfordern die Erzeugung starker elektromagnetischer Felder. In der Medizinelektronik werden so genannte Feldapplikatoren dazu verwendet, in der Krebstherapie mit lokalen und regionalen Kontakt-Applikatoren elektromagnetische Wellen einzukoppeln, um mit der dabei entstehenden Wärmebildung Tumore zu schädigen bzw. zu vernichten.

Die „Klinik für Strahlenheilkunde“ der Charité bietet Krebspatienten in klinischen Studien eine tumorspezifische Wärmetherapie an.

Die so genannte „Magnet-Flüssigkeits-Therapie“ bietet parallel zu der bisherigen Chemo- und Strahlentherapie lediglich eine begleitende Behandlung bei schwerwiegenden Erkrankungsfällen. Das Ziel ist in erster Linie eine Linderung der Symptome zu erreichen.

Da Tumorzellen eine schlechte Wärmeregulation besitzen, sind sie sehr hitzeempfindlich und werden bei höheren Temperaturen geschädigt.

Eine eisenoxydhaltige Lösung im Ausmaß von Nanometern wird so präpariert, dass sie in Flüssigkeit gelöst werden kann. Dadurch ist es möglich in präziser und vorher individuell nach Tumorgröße abgestimmter Dosis die Partikel unter Narkose per Katheter interstitiell direkt in den Tumor zu injizieren.

Hierdurch ist es möglich, im Tumor millionenfach in die Zellen einzudringen und sich auch zwischen den Zellen zu verteilen.

Eine regionale Überwärmung im Tumorgewebe führt zu einer vermehrten Durchblutung und Nährstoffverarmung.

Diese Nährstoffverarmung und der daraus folgende Sauerstoffmangel führen zur Entwicklung eines sauren Zellmilieus, sodass sich die Enzyme und Proteine im Tumor verändern und dadurch ihr Reparaturmechanismus gehemmt wird. Die Folge ist eine geschädigte Tumorzelle, die durch ihren verlorenen Schutzmechanismus leichter zu bekämpfen ist.

Mithilfe eines Magnet-Wechselfeld-Therapiegeräts wird berührungslos ein Magnetfeld bei 100kHz mit notwendiger Feldstärke aufgebaut ( $H_{\max} = 18\text{kA/m}$ ), wodurch die Eisenoxydteilchen in der Tumorzelle auf konstante 45 Grad Celsius, potenziell auch höher, erhitzt werden können. Die Arbeitsfrequenz des Applikators beträgt 100kHz, da der menschliche Körper bei dieser Frequenz einen äußerst geringen Leitwert aufweist. Die mit Eisenteilchen befallenen Krebszellen werden ausreichend beschädigt bzw. empfindlicher gegenüber einer begleitenden Strahlen- oder Chemotherapie.

Das gesunde Gewebe, das die Krebszellen umgibt und keine Eisenpartikel enthält, bleibt weitgehend unberührt von der Wärmeentwicklung.

Bei Tumoren, die nicht größer als 50mm im Durchmesser sind, könnte die Magnetische-Flüssigkeits-Hyperthermie auch als sogenannte Thermoablation wirken und den Tumor zerstören.

Mithilfe von Lichtwellenleitern werden während der gesamten Behandlungsdauer die Temperatur des Tumors und die des Patienten überwacht. Anhand einer speziell beschichteten Oberfläche am Ende des Lichtwellenleiters ändert sich bei Temperaturänderung der Reflexionsgrad der Beschichtung. Dadurch ist es möglich exakte Temperaturenverläufe über die gesamte Behandlungsdauer aufzuzeichnen.

Ein Computer übernimmt hierbei die Regelung der gewünschten Temperatur.

Die Dauer einer Behandlung kann bis zu 45 Minuten betragen.

Diese neuartige Tumorbekämpfung ist bereits bei Tierversuchen erfolgreich gewesen. Tumor befallene Ratten zeigten bei der nanotechnologischen Hyperthermie-Behandlung eine viermal längere Überlebensrate als unbehandelte Tiere.

Im Rahmen klinischer Studien werden mittlerweile erste Patienten behandelt.

Die Therapie umfasst eine kombinierte Anwendung mit der Strahlentherapie (Afterloading-Verfahren), um Glioblastome und Gehirnmetastasen anderer Primärtumore (bösartige Tumore), die trotz Behandlung weiter gewachsen sind, zu bekämpfen.

Die kombinierte Anwendung mit einer Strahlentherapie soll unter anderem die Effektivität und Verträglichkeit bei bereits behandelten Patienten ermitteln.

Trotz der viel versprechenden Ergebnisse der bisherigen Errungenschaft in der Magnetfeld-Hyperthermie-Anwendung muss erwähnt werden, dass diese Art von Behandlung lediglich eine begleitende Therapie ist.

Neben den Leistungsmerkmalen des Feldapplikators sind die Ausmaße der Einrichtung ebenso von Bedeutung, die bei der Konstruktion der Feldsonden berücksichtigt werden müssen.

Die Bauweise des großen Feldapplikators in der Charité ähnelt einer Kernspintomographie-Anlage und ist in einem speziell dafür ausgelegten Labor fest installiert worden. Wohingegen der kleine Applikator im Neu-Westend Klinikum die Ausmaße einer transportablen Apparatur besitzt.

### 3 Prüfung von Messgeräten

Messgeräte zur Beurteilung von elektromagnetischen Feldern müssen je nach Frequenzbereich so eingerichtet sein, dass sie die elektrische Feldstärke  $E$ , die magnetische Feldstärke  $H$ , die magnetische Flussdichte  $B$  oder die Leistungsdichte  $S$  messen. Die gesamte Messunsicherheit sollte  $\pm 20\%$  nicht überschreiten.

### 3.1 Die Physikalisch–Technische Bundesanstalt

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig und Berlin dient als Oberbehörde für das Messwesen und Teile der physikalischen Sicherheitstechnik.

Die Darstellung der Einheiten auf höchstem Niveau ist das Fundament des Messwesens und eine Grundaufgabe der PTB. Sie führt Überprüfungen und Untersuchungen auf dem Gebiet des physikalisch-technischen Messwesens durch.

Die PTB wirkt bei Konformitätsbewertungsverfahren mit und prüft messtechnische Erzeugniskenngrößen, wie elektromagnetische Verträglichkeit oder Störfestigkeit.

Die europäischen Richtlinien erlauben es, das Messgerät vom Hersteller selbst oder von einem beauftragten EMV- Dienstleister (EMV-Testhaus, TÜV, VDE-Prüf- und Zertifizierungsinstitut etc.) gemäß den einschlägigen Normen zu prüfen. Nach einer erfolgreich bestandenen Typprüfung stellt der Hersteller eine formlose Konformitätserklärung (CE-Kennzeichnung) gemäß des EMVG aus, in der er bestätigt, dass das Erzeugnis und alle nach den gleichen Fertigungsunterlagen hergestellten Geräte den Schutzanforderungen der Schutzziele der EU-Richtlinien genügen.

### 3.2 Der deutsche Kalibrierdienst

Die nächste Stufe dieser Hierarchie bildet der Deutsche Kalibrierdienst – DKD.

Hier erfolgt die Weitergabe der Einheiten nach erfolgreicher Kalibrierung an Wirtschaft und Wissenschaft.

„Das Kalibrieren ist die Tätigkeit, den Zusammenhang zwischen den ausgegebenen Werten eines Messgerätes oder von einem Referenzmaterial dargestellten Werten und den zugehörigen, durch Normale festgelegten Werten einer Messgröße zu ermitteln.“

Dieses Verfahren sichert nach der Kalibrierung die Rückführung des angezeigten Messwertes auf die entsprechende nationale Normgröße.

Hierzu sind zusätzliche Toleranzforderungen einzuhalten, sodass die Messunsicherheit nach vereinbarten Methoden berechnet und angegeben werden kann.

Die Einhaltung von Fehlergrenzen ist im Gegensatz zum Eichvorgang nicht der primäre Aspekt einer Kalibrierung.

Allein der Benutzer entscheidet über die Beurteilung, ob die Genauigkeit eines Messgerätes für die vorgesehene Messaufgabe ausreicht.

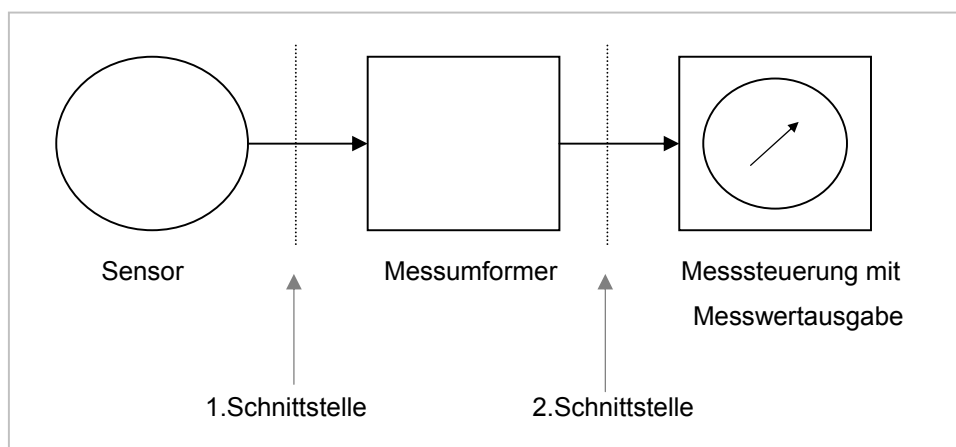
Abschließend hierzu ist zu erwähnen, dass der Staat kein messtechnisches Niveau vorschreibt. Die Kalibrierlaboratorien können in eigener Verantwortung bedarfs- und kundenorientiert operieren, wobei die kleinste angebbare Messunsicherheit ein wichtiges Auswahlkriterium für Kunden darstellt.

## 4 Entwicklung des Feldstärkenmessgerätes

In diesem Kapitel werden grundlegend das Konzept und der Aufbau des Messgerätes behandelt. Dazu ist es notwendig, zunächst durch Vorüberlegungen, unter Berücksichtigung der Messfehlerproblematik, eine geeignete Messmethode zu wählen. Anschließend wird das Schaltungskonzept entworfen und schematisch dargestellt. Im Anschluss daran werden die theoretischen Vorüberlegungen in der Fertigung realisiert und mithilfe einer Feldsubstitution die Funktion des Messgerätes überprüft.

### 4.1 Vorüberlegungen und Anforderungen

Das Messgerät besteht aus drei Funktionseinheiten und den Schnittstellen zwischen den Einheiten (Abb. 4.1-1).



**Abb. 4.1-1:** Schematische Darstellung einer allgemeinen Messkette

Ein Messempfänger (Sensor) soll die aufgenommen Wechselfelder an einen Gleichrichter (Messumformer) übergeben, der wiederum die gleichgerichtete Größe an einem Handgerät in digitaler Form anzeigen soll (Messwertausgabe).

Der Messempfänger ist hierbei das Koppelglied zwischen leitungsgebundenen und freien Wellen im Raum.

Bei der Messung elektromagnetischer Felder wird man mit komplizierten physikalischen Gegebenheiten konfrontiert.

Erste Vorüberlegungen bezüglich des Aufbaus und der Anordnung der Sonden haben ergeben, dass die Materialauswahl und die Konstruktion eine entscheidende Rolle bei der Messungsgenauigkeit spielen.

Eine Grundproblematik bei der Messung von elektromagnetischen Feldern stellen Feldverzerrungen durch alle elektrisch leitfähigen Materialien, die sich im Feld befinden, dar. An den leitfähigen Oberflächen können Ströme induziert werden, die wiederum eine Streuwelle abstrahlen könnten und die Überlagerung mit dem primären Feld würde zu Messunsicherheiten führen.

Die Rückwirkung des Messgerätgehäuses auf das einfallende Feld würde bei geringem Abstand zwischen Sensor und Gehäuse zu großen Messfehlern führen.

Herkömmliche Messsonden können ohne Bedenken aus metallischen Komponenten bestehen und dicht am Messgerät angebracht werden. So kann bei geringen Feldstärken die Ausführung des Messgerätes als unkritisch betrachtet werden.

Bei dem zu vermessenen Prüfling handelt es sich um eine spezielle Apparatur einer medizinischen Einrichtung, die sich noch in der Studienphase der Entwicklung befindet.

Das zu entwickelnde Gerät ist als Messgerät eingestuft, deswegen wird die Produktnorm EN 61326 angewandt.

Die genaue Bestimmung elektromagnetischer Felder dient sowohl der Notwendigkeit bei Messungen der Störstrahlungsfestigkeit von technischen Geräten als auch dem Personenschutz.

Die vom Prüfling maximal erzeugte magnetische Feldstärke kann bis zu 18kA/m betragen. Diese hohen Feldstärken setzen besondere Materialeigenschaften voraus und fordern eine räumlich ausreichend entkoppelte Positionierung der Messeinrichtung.

In der Praxis hat sich die Methode der festen Positionierung der Sonde zum Grundgerät (Gleichrichter) als sinnvoll erwiesen.

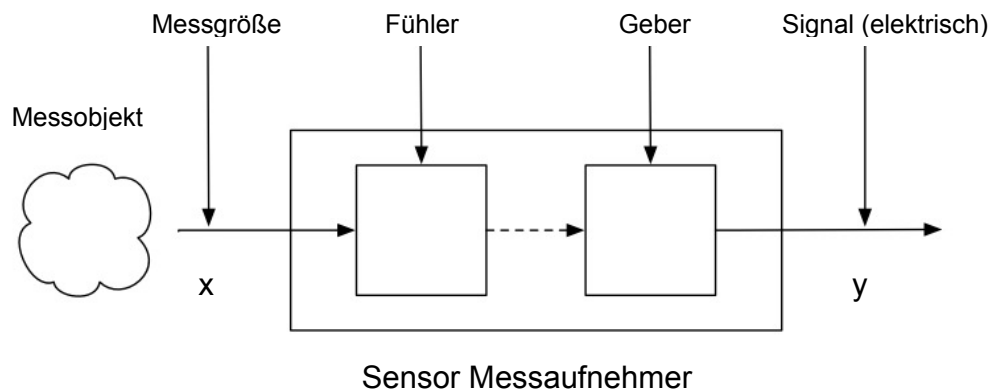
## 4.2 Schematischer Aufbau einer Messeinrichtung

Die gerätespezifische Unterteilung erfolgt in drei Funktionseinheiten (Abb. 4.2-1).

In der ersten Einheit wird die gesuchte Größe zunächst als eine physikalische Größe aufgenommen. Diese Aufgabe wird von einem Messaufnehmer übernommen.

Als Messaufnehmer bezeichnet man das erste Glied einer Messkette, das eine nichtelektrische Messgröße oder eine elektrische Feldgröße in ein elektrisches Signal umformt. Sie haben die Aufgabe, die zu untersuchenden Zustände der Umwelt zu erfassen und einer elektrischen Auswertung zugänglich zu machen.

Diese Funktionseinheit wird auch als Sensor bezeichnet (Abb. 4.2-1).



**Abb. 4.2-1:** Sensor als erstes Glied einer Messkette

Der die Messgröße aufnehmende Teil des Sensors, der mit dem Messobjekt in unmittelbarem Kontakt steht, wird als Fühler oder Sonde bezeichnet.

Jeder Fühler basiert auf einem physikalischen Effekt, bei dem die Ausgangsgröße eine Funktion der Messgröße ist. Ein passiver Sensor dient dazu, ohne externe Energiequelle, ein Spannungssignal zu erzeugen und dabei Leistung an das nachfolgende Messglied abzugeben. Durch die Leistungsabnahme vom Messobjekt entsteht eine Rückwirkung auf das Messobjekt, die einen systematischen Fehler zur Folge hat. Dieser Fehler wird später bei der Fehlerbetrachtung berücksichtigt und näher erläutert.

Der das elektrische Ausgangssignal erzeugende Teil ist der Geber. Dieser benötigt im Gegensatz zum Sensor eine Hilfsenergie und zeigt daher keine energetische Rückwirkung auf das Messobjekt. Die Messfühler werden wiederum unterschieden in direkte und indirekte Messfühler. Der hier zum Einsatz kommende direkte Messfühler kann die zu ermittelnde Größe unmittelbar in ein entsprechendes Ausgangssignal umwandeln, sodass zur Ermittlung der Messgröße keine physikalischen, mathematischen oder mechanischen Zusammenhänge herangezogen werden müssen. Sensoren sollen möglichst geringe Einfluss- und Störgrößen aufweisen.

Durch geeignete Maßnahmen können die Einflussgrößen konstant gehalten werden oder aber der Einfluss wird in der Auswertung korrigiert. Außerdem können sich noch mechanische Erschütterungen und Schwingungen als Störgrößen auswirken.

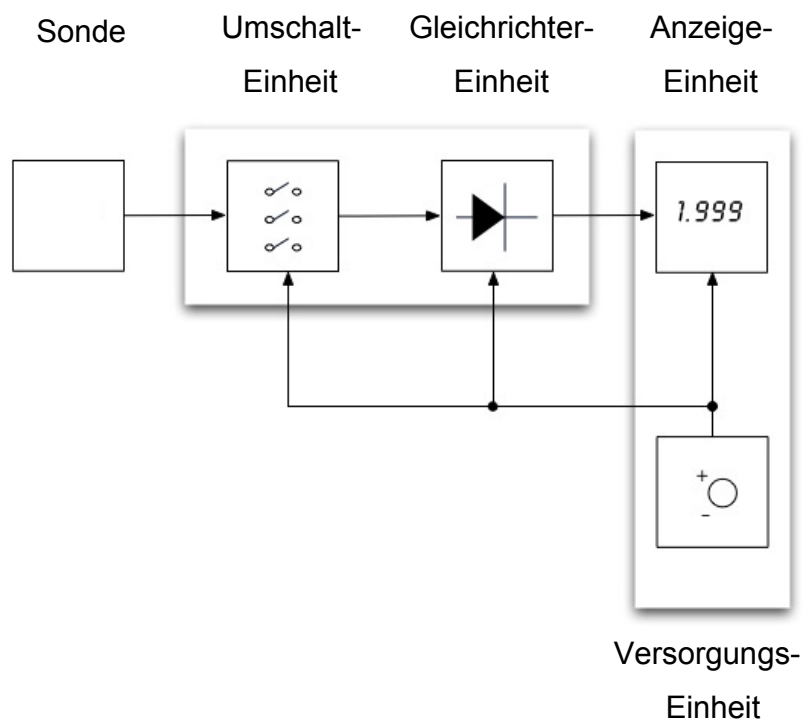
Der nächste Funktionsblock übernimmt eine ganze Reihe von Funktionen.

Zunächst kann bei der Übertragung in Richtung Senke unter Umständen die Notwendigkeit bestehen, das Signal an bestimmte Betriebs- und Übertragungsbedingungen anpassen zu müssen. Bei der Signalumformung wird durch das entsprechende Glied der Messkette das Eingangssignal  $x$  in ein Ausgangssignal  $y$  mit anderen Signalcharakteristiken umgewandelt. Die zu übermittelnde Information muss dabei vom Eingangs- auf das Ausgangssignal unverändert übertragen werden.

Adaptiv dazu kann je nach Bedarf eine Korrekturfunktion integriert werden, um mögliche Einflussgrößen, mit denen der Fühler behaftet sein kann, zu umgehen.

Für die Verwertung der gemessenen Größe folgt die dritte Funktionseinheit, die es ermöglicht durch eine geeignete Darstellung (z.B. digitale Anzeige) die Information auszugeben.

In der unten abgebildeten Grafik (Abb. 4.2-2) ist die strukturelle Zugehörigkeit der einzelnen Komponenten dargestellt.



**Abb. 4.2-2:** Schematischer Aufbau des Messgerätes

Bei der Überlegung einer geeigneten Schnittstelle zwischen den Einheiten wurde nach Verfügbarkeit entschieden. Die Signalführungen erfolgen über 9-polige SUB-D-Buchsenleisten.

### 4.3 Messprinzip

Die Wahl der richtigen Messmethode hängt von mehreren Faktoren ab.

Die Feldstärke, die Homogenität des Feldes und die erforderliche Genauigkeit sind nur einige wichtige Entscheidungskriterien das richtige Messprinzip anzuwenden.

Nach den bisher erwähnten Anforderungen ergeben sich zwei mögliche Varianten, die als Nächstes erläutert werden.

Erstens: Messung der Leerlaufspannung einer offenen Luftspule

Messprinzip:  $U_0 \sim A$        $U_0 \sim f$        $U_0 \sim H$       ( 22 )

Zweitens: Messung des Kurzschlussstromes einer geschlossenen Luftspule

Messprinzip:  $I_0 \sim A$        $I_0 \sim H$       (*Umfang*  $\ll \lambda$ )      ( 23 )

Der Entscheidungsgrund für das erste Messprinzip liegt darin, dass bei einer kurzgeschlossenen Luftspule die hohen induzierten Ströme die Spule zerstören.

Die kurzgeschlossene Variante eignet sich insbesondere für Messgeräte, die für ein breites Frequenzspektrum vorgesehen sind.

Der zu vermessene Feldapplikator arbeitet mit 100kHz, sodass die Frequenz in Gleichung (22) als konstant betrachtet werden kann.

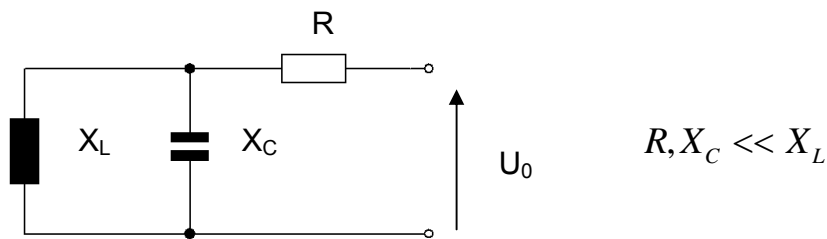
Die Aufnahme der magnetischen Komponente des Feldes erfolgt durch eine Spule, die als Sensor dient. Hierbei wird die Proportionalität der Leerlaufspannung zu Fläche, Frequenz und Feldstärke genutzt. Dort werden die Feldkomponenten in eine Wechselspannung umgewandelt. Weitere Einzelheiten zum Messprinzip sind dem Kapitel 5.2 zu entnehmen.

Ein Präzisionsgleichrichter erzeugt daraus eine dem Feld proportionale Gleichspannung. Danach ist die Rahmengröße der Feldsonden für die zu vermessende Feldstärkegrößenordnung zu bemessen.

Eine präzise Messung wird dadurch ermöglicht, dass die Sonde sowohl vom Wandler als auch vom Messgerät abgesetzt angeordnet ist.

Die Sonden sind steckbar und der Sondenkopf etwa 30cm vom Wandler bzw. 80cm vom Messgerät abgesetzt. Aufgrund dessen, dass die Feldquelle (Applikator) mit konstanter Frequenz (100kHz) arbeitet, ist ein frequenzselektives Messsystem geeignet.

Das Ersatzschaltbild des Messempfängers besteht im Grunde aus einer LCR-Schaltung (Abb. 4.3-1), wobei die Spule als Empfänger für die Feldlinien dient und der Leitungswiderstand (R) mit der Leitungskapazität (C) vernachlässigt werden kann.



**Abb. 4.3-1:** ESB des Messempfängers

#### 4.4 Schaltungskonzept und Realisierung der einzelnen Funktionseinheiten

In den nächsten Abschnitten wird die schaltungstechnische Realisierung der Funktionseinheiten beschrieben. Bei den Platzierungen der Bauelemente ist darauf geachtet worden, dass möglichst kurze Leiterbahnen entstanden.

Als Platine wurde eine Laborkarte (160 x 100mm) mit einem Punktraster von 2,54mm verwendet. Bevor der endgültige Schaltungsaufbau realisiert werden konnte, musste zunächst die prinzipielle Funktion überprüft werden. Erst nach einer erfolgreichen Überprüfung konnte anschließend der Aufbau mit den vorgesehenen Bauelementen umgesetzt werden.

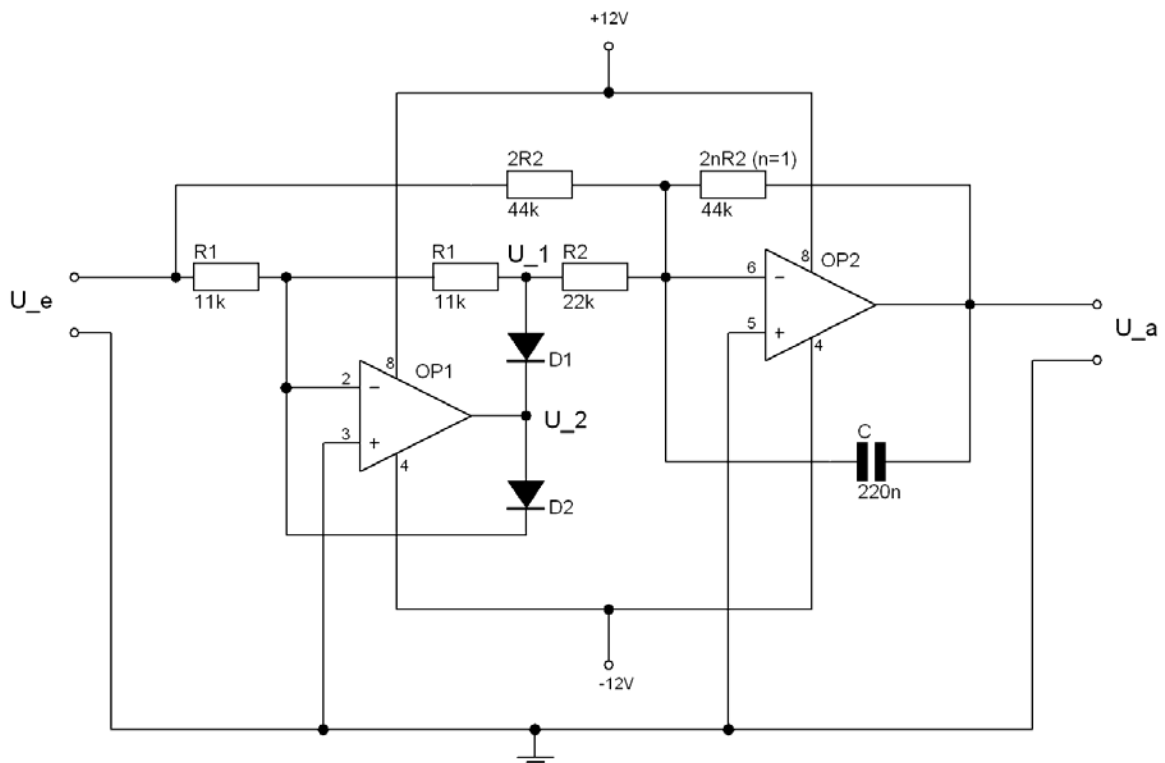
Eine Bestückungsliste der verwendeten Bauelemente ist im Anhang C beigelegt.

#### 4.4.1 Gleichrichter-Einheit

Bei der Messgröße handelt es sich um eine Wechselgröße. Diese muss zunächst mithilfe eines Gleichrichters in eine darstellbare Gleichgröße umgewandelt werden. Hierzu gibt es je nach Aufgabenstellung unterschiedliche Gleichrichterschaltungen. Für den vorgesehenen Messvorgang ist ein Messgleichrichter gesucht, der durch eine präzise Gleichrichtung bzw. hohe Linearität gekennzeichnet ist. Dazu eignet sich eine Präzisionsgleichrichterschaltung. Im Gegensatz zu einfachen Gleichrichterschaltungen wird bei Präzisionsgleichrichtern vermieden, dass sich die im Anfangsbereich stark nichtlineare Diodenkennlinie direkt in der Gleichrichterkennlinie niederschlägt.

##### Funktion des Präzisionsgleichrichters:

Das Prinzip des Gleichrichters beruht darauf, dass durch zwei Operationsverstärker das Eingangssignal zunächst zweifach verstärkt wird (Abb. 4.4-1).



**Abb. 4.4-1:** Präzisions-Vollweg-Gleichrichter mit geerdetem Ausgang

Der Operationsverstärker besteht aus zwei getrennten Funktionseinheiten.

In der ersten Funktionseinheit wird das Signal zweifach verstärkt und mit dem in der zweiten Funktionseinheit einweggleichgerichtetem Signal überlagert (addiert).

Dadurch wird eine der Halbwellen subtrahiert, die andere wird erhalten.

Es resultiert eine pulsierende Gleichspannung, die mithilfe eines Kondensators geglättet wird und proportional der Eingangsspannung ist.

Ausgangsspannung: 
$$U_a = n \cdot \overline{|u_e|} \quad (24)$$

Für sinusförmige Wechselspannung: 
$$U_a = \frac{2 \cdot n}{\pi} \cdot \hat{U}_e = \frac{2 \cdot n \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{e\_eff} \quad (25)$$

Während herkömmliche Gleichrichterschaltungen nur eine Spannung an einen erdfreien Verbraucher (Messwerk) liefern, lassen sich hier Ausgangsspannungen gegen Masse abnehmen.

#### Wirkungsweise OP1:

Bei positiven Eingangsspannungen wirkt OP1 als Umkehrverstärker mit der Verstärkung 1. Daraus folgt, dass  $u_2$  negativ wird. Die Diode  $D_1$  ist leitend, und  $D_2$  sperrt. Es wird  $u_1 = -u_e$ . Bei negativen Eingangsspannungen wird  $u_2 > 0$ .

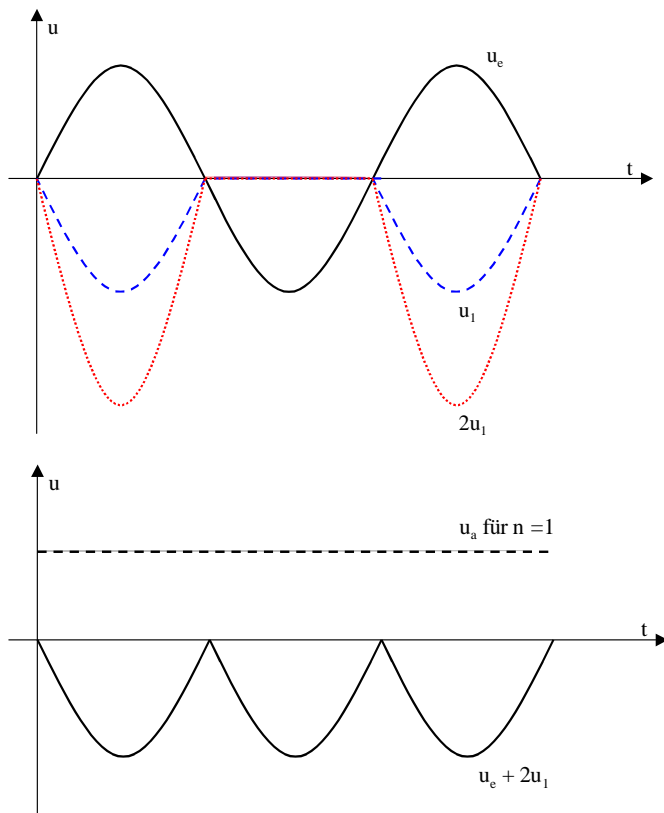
$D_1$  sperrt in diesem Fall;  $D_2$  wird leitend und koppelt den Verstärker gegen.

Hierdurch wird verhindert, dass OP1 übersteuert wird; daher bleibt der Summationspunkt auf Nullpotenzial. Da  $D_1$  sperrt, wird  $u_1 = 0$  (Spannung am Summationspunkt).

$u_1$  hat demnach folgenden Verlauf:

$$u_1 = \begin{cases} -u_e & \text{für } u_e \geq 0 \\ 0 & \text{für } u_e \leq 0. \end{cases} \quad (26)$$

Die Abbildung (Abb. 4.4-2) zeigt den Verlauf für eine sinusförmige Eingangsspannung.



**Abb. 4.4-2:** Spannungsverlauf bei sinusförmiger Eingangsspannung

→Funktion OP1: Einweggleichrichter

Wirkungsweise OP2:

Ohne den Kondensator  $C$  ist der OP2 ein Additionsverstärker.

Er bildet den Ausdruck:

$$-u_a = n \cdot (u_e + 2u_1). \quad (27)$$

Durch Einsetzen von  $u_1$  folgt::

$$\frac{1}{n} \cdot u_a = \begin{cases} u_e & \text{für } u_e \geq 0 \\ -u_e & \text{für } -u_e \leq 0. \end{cases} \quad (28)$$

Dies entspricht der Gleichung des idealen Vollweggleichrichters.

Der Kondensator  $C$  bildet zusammen mit  $2 \cdot n \cdot R_2$  einen Tiefpassfilter. Daher ist die Ausgangsspannung gleich dem arithmetischen Mittelwert der vollweggleichgerichteten Eingangsspannung. Bedingung für Gültigkeit der Ausgangsspannung  $U_a$  in Gleichung (24) ist, dass die Filterzeitkonstante groß ist gegenüber der Schwingungsdauer von  $u_e$ .

Der Verstärker OP1 muss eine Bandbreite besitzen, die gegenüber der Frequenz der Eingangsspannung groß ist, da beim Gleichrichten viele Oberwellen entstehen.

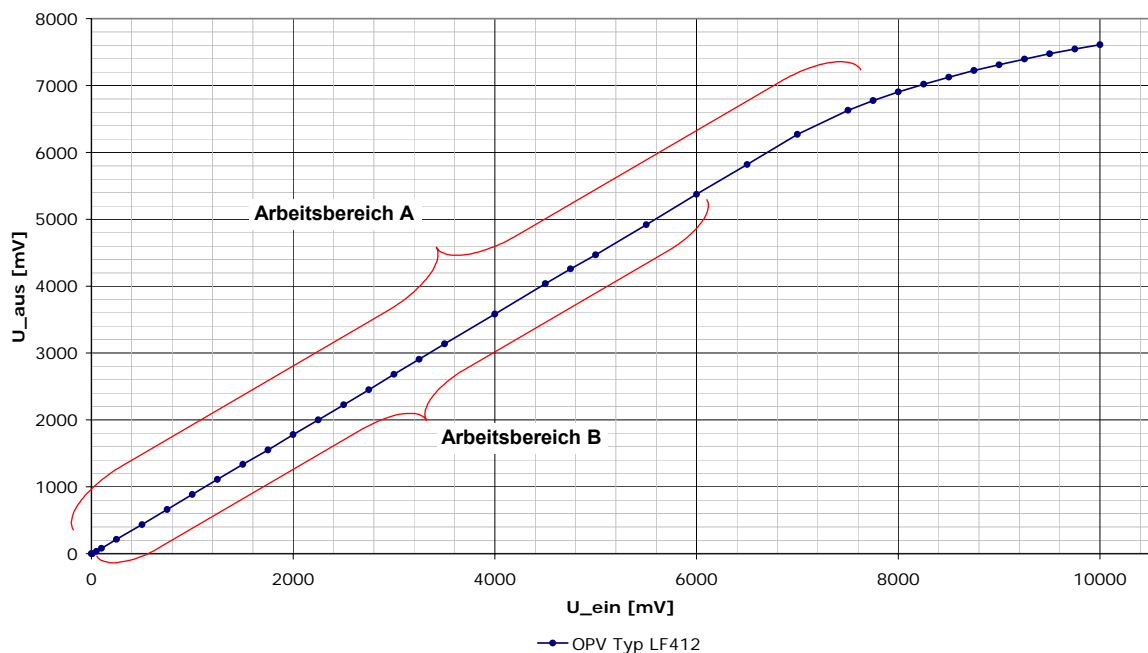
Das Ergebnis ist die gewünschte lineare Abhängigkeit zwischen Aus- und Eingangsgröße. Neben der Abnahme der Nichtlinearität verringert sich beim Präzisionsgleichrichter zusätzlich die Durchlassspannung und die Temperaturabhängigkeit der Dioden. Es entstehen hierdurch wesentlich schärfere Begrenzungskennlinien. Vor der Auswahl eines geeigneten Diodentyps für die Präzisionsschaltung wurden unterschiedliche Linearitätskurven drei verschiedener Dioden (Ge, Si und Schottky) bei Eingangsspannungen zwischen  $1mV - 10V$  aufgenommen. Die Auswertung hat gezeigt, dass der Einsatz von Silizium-Dioden bei Präzisionsgleichrichtern das gewünschte Linearitätsverhalten aufweist. Die Überprüfung kleiner Abweichungen ist als Toleranzdiagramm aufgezeichnet worden und bestätigt durch einen nahezu horizontalen Verlauf die Gleichmäßigkeit der Wandlung.

Diese ist durch eine Abweichung von  $< 1,5\%$  vom Sollwert gekennzeichnet (siehe Anhang D2). Die Auswertung erfolgte grafisch mithilfe von Excel.

In der Regel ist ein Messgleichrichter erwünscht, bei dem die Gleichspannung in einem weiten Frequenzbereich der Wechselfspannung proportional ist. Hierzu werden Operationsverstärker verwendet, die eine gleichmäßig große Verstärkungs-Bandbreite (*Unity-Gain Bandwidth*) und eine kurze Anstiegszeit aufweisen (*Slew Rate*).

Für den vorgesehenen Messvorgang ist eine große Bandbreite nicht von Bedeutung, da der Applikator mit einer konstanten Arbeitsfrequenz ( $f = 100\text{kHz}$ ) betrieben wird.

Was die Anstiegszeit angeht, wurde bei einem Testablauf das Übertragungsverhalten des relativ günstigen und gängigen Operationsverstärkers vom Typ LF412 überprüft. Das Übertragungsverhalten zeigt (Abb. 4.3-2), dass unter der Berücksichtigung des festgelegten Arbeitsbereiches A ( $0..7V$ ), ein für die vorgesehene Anwendung ausreichendes Ergebnis.

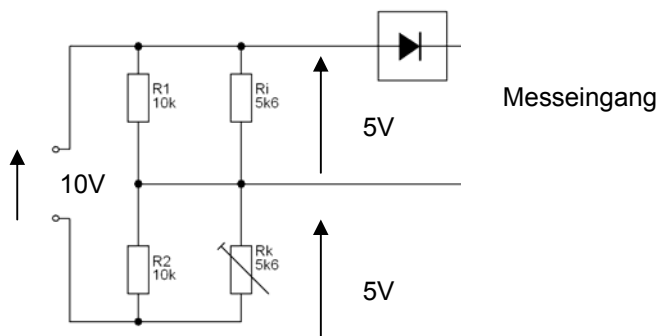


**Abb. 4.4-3:** Übertragungskennlinie des OPV : LF412

Der Arbeitsbereiches A umfasst etwa  $\frac{3}{4}$  des linearen Bereiches der Übertragungskennlinie.

Dieser Bereich sichert die bestimmungsgemäße Funktion des Gleichrichters.

Das Übersetzungsverhältnis zwischen der maximal messbaren Leerlaufspannung von 10V und der gleichgerichteten Spannung für die Ausgabe-Einheit (digitale Anzeige) ist aus dimensionstechnischen Gründen auf 5V reduziert worden. Auch dieser Arbeitsbereich (Arbeitsbereich B) sichert eine zufrieden stellende und sichere Funktion des Gleichrichters. Zum anderen wurde mit dieser Überlegung eine Zwangssymmetrisierung am Spannungsteiler des Messeingangs der Sonde umgesetzt.



**Abb. 4.4-4:** Zwangssymmetrisierung am Messeingang

Aus der obigen Schaltung (Abb. 4.4-4) ist zu erkennen, dass durch eine zusätzliche Belastung mit  $R_K = 5,6k$  am Messeingang der Innenwiderstand des Gleichrichters nachgebildet werden konnte, sodass dadurch eine Halbierung der Messspannung zu Stande kam.

#### 4.4.2 Versorgungs-Einheit mit DC/DC-Wandler

Bei der Überlegung, ein Messgerät für den mobilen Einsatz zu konzipieren, gehört die Versorgungseinheit zu den nicht zu vernachlässigenden Schwierigkeiten. Je nachdem, was für Bauelemente benötigt werden, kann es vorkommen, dass man gezwungen wird, ein völlig neues Schaltungskonzept zu entwerfen.

Die zur Auswahl einer ausreichenden Batterieversorgung zu berücksichtigenden Baugruppen sind wie folgt beschrieben:

Die zum Einsatz kommenden Operationsverstärker benötigen zum Betrieb  $\pm 12V$ . Hierbei ist zu erwähnen, dass der Betrieb der Operationsverstärker mit 9V Versorgung nicht die gewünschte Linearität erreicht hat.

Hinzu kommt die Versorgung der digitalen Anzeige, die alternativ zu 9V mit 5V betrieben werden soll. Die Steuerung der Sonden-Achsenumschaltung ist mit drei getrennten Relais vorgesehen. Diese benötigen laut Datenblatt zum Umschalten eine Ansprechspannung von mind. 17V (siehe Anhang: Datenblatt-3).

Bei der Verwendung von Sammlerzellen würden die mechanischen Abmessungen von 2 x 12V Akkumulatoren das Volumen des vorgesehenen Messgerätegehäuses erheblich überschreiten.

Deshalb empfiehlt sich der Einsatz eines DC/DC-Wandlers.

Durch den DC/DC-Wandler wird eine Gleichspannung in eine andere umgewandelt. Dazu wird die Versorgungsspannung hochfrequent zerhackt, über HF-Transformatoren auf den gewünschten Sekundärspannungsbetrag gebracht, gleichgerichtet und durch Ta-Kondensatoren ( $C=10\mu F$ ) gesiebt. Der hier verwendete DC/DC-Wandler ist vom Typ SIM 2-0512D-SIL7 und liefert bei einer Versorgung von 5VDC mindestens die benötigten  $\pm 12V$ . Seine Leistungsübertragung beträgt 2W bei 82mA Stromaufnahme. Die Ansteuerung des DC/DC-Wandlers kann im Datenblatt-1 nachgeschlagen werden.

Für die Betriebsspannung des Messgerätes wurden letztendlich vier in Reihe geschaltete 1,5V AA Batterien verwendet. Der Betrieb von wiederaufladbaren Zellen ist aus platztechnischen Gründen nicht geeignet, da die nötige Spannung erst bei einer Zusammenschaltung von fünf Akkus ( $5 \times 1,2V$ ) erreicht wird. Die Nutzung aus einer Kombination von Zellen unterschiedlicher Beschaffenheit ist ebenfalls nicht ratsam.

Unter Einhaltung der angegebenen Toleranzgrenze der Versorgungsspannung des DC/DC-Wandlers von  $\pm 10\%$ , ist durch eine in Durchlassrichtung vorgeschaltete Si-Diode (siehe Anhang H1) die Betriebsspannung von 6V auf 5,3V reduziert worden.

Es wurde eine Reihe von Messungen durchgeführt, um die minimale Betriebsspannung für einen hinlänglich linearen Betrieb zu ermitteln. Die Messungen haben gezeigt, dass die DC/DC-Versorgungsspannung mindestens 4,5V betragen muss, andernfalls ist kein korrektes Messergebnis zu erwarten. Zur Signalisierung einer Unterspannung ist eine Batteriekontrollleuchte eingebaut worden.

In der Schaltung ist die Umsetzung dieser Kontrollfunktion durch einen Komparator realisiert worden, der seine Ansprechschwelle bei 5,2V hat.

#### 4.4.3 LCD-Einheit

Bei der Auswahl einer geeigneten Anzeigemöglichkeit wurden vorerst notwendige Kriterien zwischen einer digitalen und analogen Darstellung verglichen.

Die Vorteile einer digital arbeitenden Messausgabe sind unter anderem die Vermeidung von Ablesefehlern, eine hohe Genauigkeit der Ausgabe und die Ermöglichung einer direkten Weiterführung zur Datenverarbeitung.

In der digitalen Messtechnik erfolgt die Umsetzung der Messgröße in den Zahlenwert im Messgerät. Bei der analogen Messtechnik muss dagegen der Ablesende die Umsetzung der Skalanzeige in einen Zahlenwert selbst vornehmen, was wiederum mit mehr Zeitaufwand verbunden ist.

Der zu ermittelnde Feldvektor setzt eine leichte Reproduzierbarkeit voraus, sodass mit möglichst geringer Fehlerwahrscheinlichkeit die Weiterverarbeitung der ausgegebenen Werte fortgesetzt werden kann.

Die letztendlich ausgesuchte LCD-Einheit ist vom Typ HED281/DPM951 der Firma FALCON.

Die genauen Spezifikationen und Abmessungen sind im Anhang aus dem Datenblatt des Herstellers zu entnehmen (siehe Anhang Datenblatt-2).

Die verwendete Anzeige-Einheit eignet sich durch die geringen Maße und durch den geringen Stromverbrauch von 2mA für den Einsatz in mobilen Handgeräten.

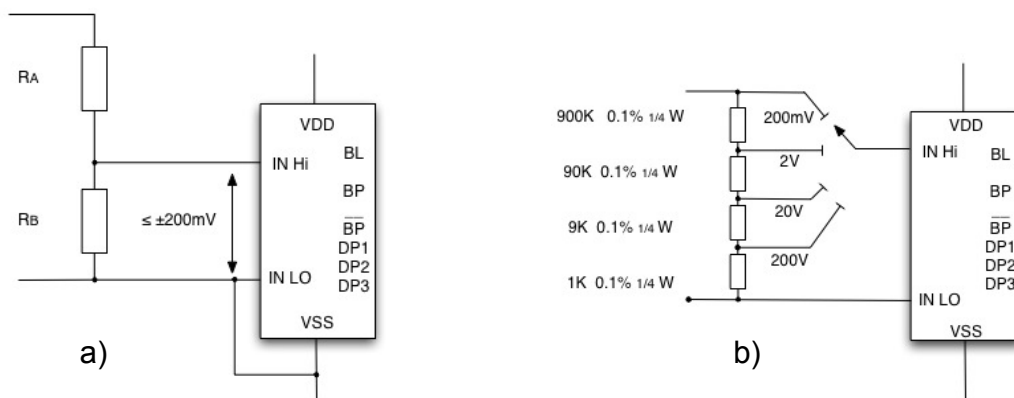
Als Darstellung dient eine 4 x 7 Segmentanzeige mit Dezimaltrennzeichen und ein Sonderfeld mit gängigen Maßeinheiten.

Die Anzeige kann wahlweise mit 5V oder 9V betrieben werden.

Der Skalenendwert beträgt 200mV und ist dementsprechend schaltungstechnisch berücksichtigt worden. Die Genauigkeit der verwendeten Anzeige beträgt typisch 0,05% und maximal 0,1%.

Aus dem Datenblatt des Herstellers geht hervor, dass dieses Modell eine LED-Hintergrundbeleuchtung enthält, die bei ungünstigen Lichtverhältnissen weiterhin eine gute Lesbarkeit ermöglicht. Aus versorgungstechnischen Gründen wurde allerdings darauf verzichtet.

Die prinzipielle Ansteuerung der LCD-Einheit ist aus der nächsten Abbildung (Abb. 4.4-5) zu entnehmen. Anschließend folgt der Belegungsplan (Abb. 4.4-6).



**Abb. 4.4-5:** Ansteuerung der LCD-Messeingänge; a) Voltmeter, b) Multi-Voltmeter

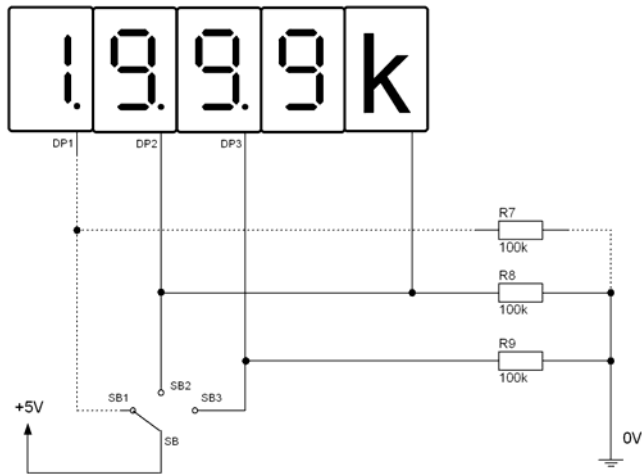
Pin	Name	Funktion
1	IN HI(+)	Positiver Messeingang
2	IN LO	Negativer Messeingang
3	VDD(+5V)	Positive DC-Versorgung +5V oder +9V
4	VSS	Negative DC-Versorgung 0V
5	COMMON	Analoger Eingang (Common)
6	BACKLIGHT (+)	Versorgung für Hintergrundbeleuchtung mit +5V oder wahlweise mit 9V mit externem Widerstand
7	REF LO	Negativer Spannungs-Referenzeingang
8	REF HI	Positiver Spannungs-Referenzeingang
9	ANNUNCIATOR ON (BP)	Pin zum Aktivieren des Dezimalpunktes (verbinden mit 12, 13 oder 14)
10	ANNUNCIATOR OFF (-BP)	Pin zum Belegen der nicht genutzten Dezimalpunkte
11	NOT USED	Nicht belegt
12	DP3	Dezimalpunkt 1.999
13	DP2	Dezimalpunkt 19.99
14	DP1	Dezimalpunkt 199.9

**Abb. 4.4-6:** PIN-Belegung der LCD-Einheit (Typ HED281/DPM951)

Da die Anzeige-Einheit in drei verschiedenen Einheitsbereichen erfolgen soll, muss eine Ansteuerung der Dezimalpunkte berücksichtigt werden. Die Aktivierung des Dezimalpunktes erfolgt durch einen High-Pegel (Abb. 4.4-7).

Hinzu kommt, dass nur im größten Messbereich (19,99kA/m) das Sonderzeichen „k“ für Kilo aktiviert werden muss, das ebenfalls durch einen High-Pegel gesetzt wird.

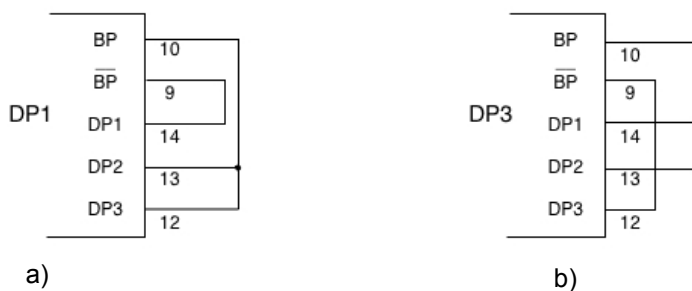
Der kleinste darstellbare Messbereich für die vorgesehene Anwendung beträgt „199,9“ A/m. Demnach muss bei der Umschaltung in den kleinsten Messbereich der Dezimalpunkt an die dritte Stelle von links (DP1) nachgerückt werden.



**Abb. 4.4-7:** Schaltung der Dezimalpunktsteuerung

Beim mittleren Messbereich, bei „1999“ A/m, wird kein Dezimalpunkt benötigt, d.h. die Pins 12, 13 und 14 müssen auf low geschaltet sein.

Zwei Schaltungsbeispiele in den beiden nächsten Abbildungen (Abb. 4.4-8) dienen der Veranschaulichung bei der Umsetzung der Pinbeschaltung.



**Abb. 4.4-8:** Beispiele für die Dezimalpunktsteuerung: a) 199,9 ; b) 1,999

## 4.5 Fertigung des Messgerätes

In diesem Kapitel wird die Fertigungsarbeit der Messgerät-Entwicklungsschritte fotodokumentierend veranschaulicht.

Das Feldstärkenmessgerät besteht aus einem kompakten Kunststoffgehäuse im handlichen Format.

Die Dimensionen des Gehäuses ermöglichen mit einer Hand die Umschaltung der Sonden, während mit der zweiten Hand die Justierung der Feldsonden durchgeführt werden kann. Bei der Anordnung der Bedienelemente wurde insbesondere auf eine leicht verständliche Übersicht und eine intuitive Nutzung geachtet.

### 4.5.1 Gehäuse für die Gleichrichter-Einheit

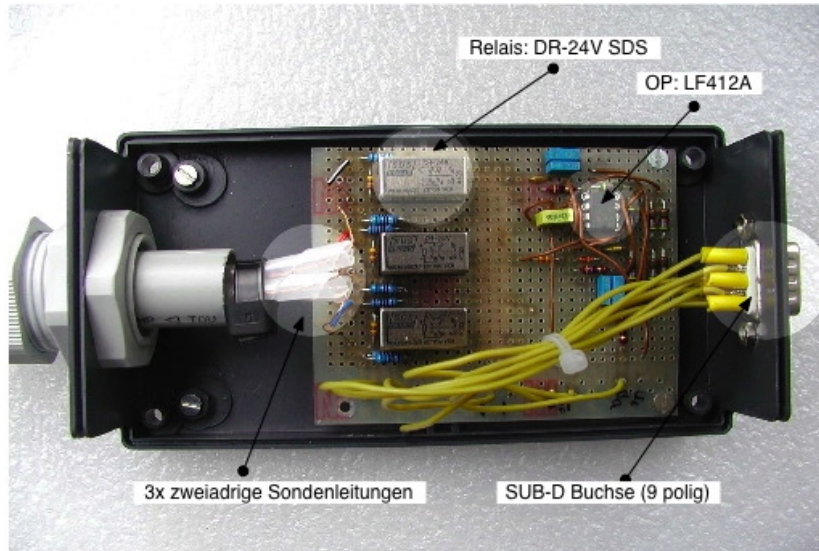


**Abb. 4.5-1:** Gleichrichtergehäuse

Die Gleichrichter-Einheit (Abb. 4.5-1) besteht aus einem zweiteiligen PVC-Gehäuse. Das Gehäuse ist durch vier seitlich angebrachte M3-Gewindebuchsen für die Befestigung einer Leiterplatte geeignet.

Für die Befestigung eines PVC-Rohrs, das als Abstandhalter zu den Sonden dient, ist ein 28mm Loch vorgebohrt worden.

#### 4.5.2 Zusammensetzung der Gleichrichter-Einheit

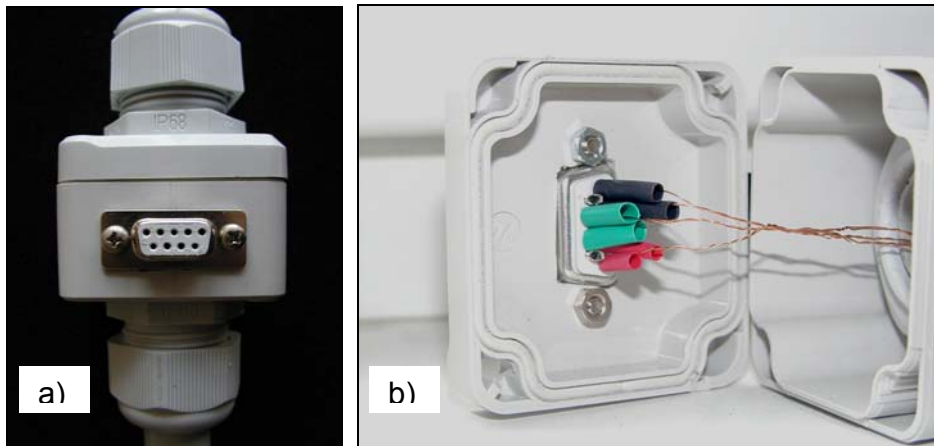


**Abb. 4.5-2:** Gleichrichter-Einheit

Die Gleichrichter-Einheit ist wie aus der Abbildung (Abb. 4.5-2) zu erkennen aus folgenden Baugruppen zusammengesetzt worden:

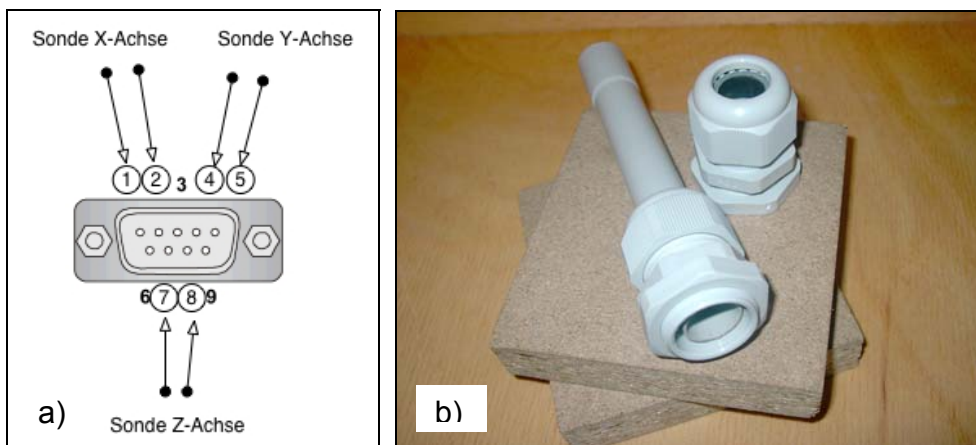
- Präzisionsgleichrichter, bestehend aus einem OP vom Typ: LF412A
- 3x Relais vom Typ DR-24V
- 3x zweiadrige Sondenleitungen, die über die Relais angeschaltet werden
- SUB-D-Buchse zum Ausführen der Signale zum Messgerät

### 4.5.3 Sondenadapter



**Abb. 4.5-3:** a) Sondenadapter, b) SUB-D-Schnittstelle am Sondenadapter

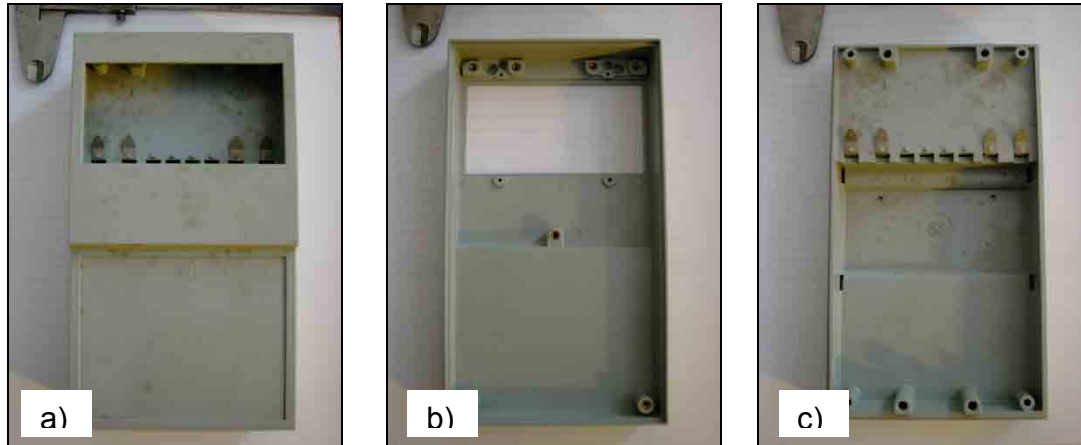
Die Adaptervorrichtung ermöglicht, durch eine 9-polige SUB-D-Kupplung (Abb. 4.5-3a) und einer modifizierten PG-Kupplung den Anschluss von drei verschiedenen Sonden. Die isolierten Kupferleitungen sind für drei vorgesehene Sondenanschlüsse an die Pins der SUB-D-Kupplung (Abb. 4.5-3b) gelötet und mit Schrumpfschläuchen isoliert worden.



**Abb. 4.5-4:** a) SUB-D-Pinbelegung, b) PG-Kabelverschraubungen

Das PVC-Rohr für die Führung der Signalleitungen der Sonden wurde mit PG-Kabelverschraubungen (Abb. 4.5-4b) fixiert. Die Pin-Belegung des SUB-D-Steckers am Sondenadapter ist aus der Abbildung (Abb. 4.5-4a) zu entnehmen.

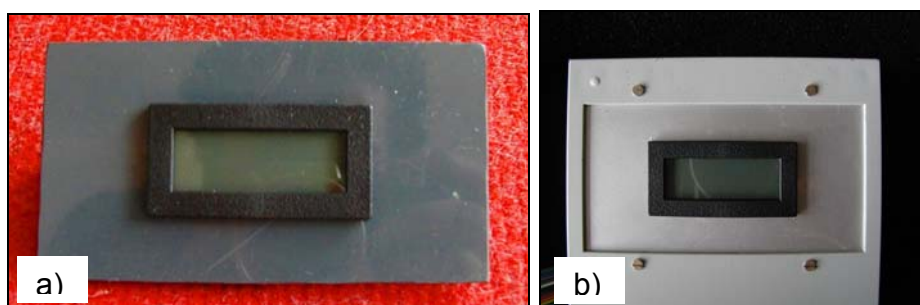
#### 4.5.4 Messgerätgehäuse



**Abb. 4.5-5:** Gehäuse: a) Frontansicht, außen; b) Frontansicht, innen; c) Rückansicht, innen

Das Gehäuse für das Messgerät besteht aus zwei Teilen. Die Frontseite (Abb. 4.5-5a) bietet ausreichend Platz für die vorgesehenen Bedienelemente. Die Unterseite (Abb. 4.5-5c) ist mit einem schließbaren Fach versehen, das für vier Batterien vom Typ 1.5V AA genutzt wird. Die Tiefe des Gehäuses reicht aus, um an der Unterseite des Gehäuses eine SUB-D-Buchse seitlich für die Signalführungen anzubringen.

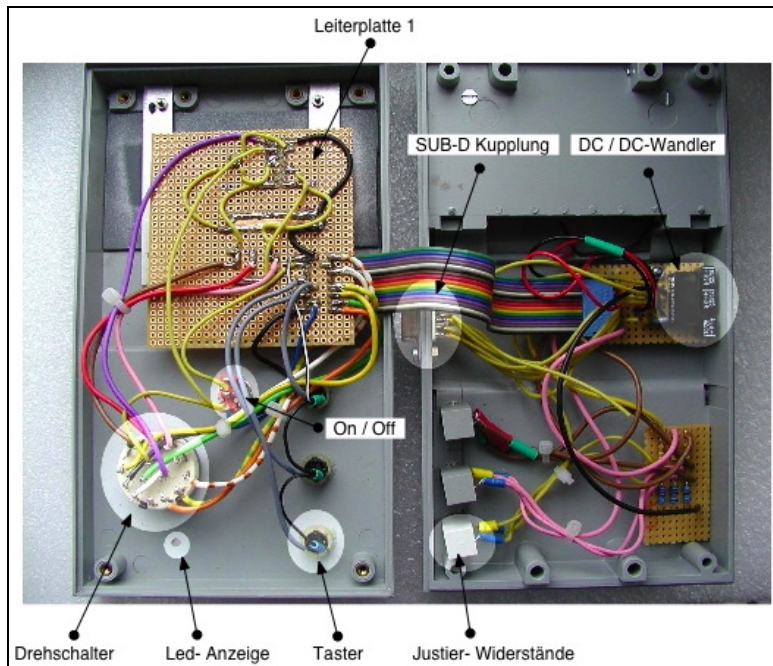
#### 4.5.5 LCD-Einheit



**Abb. 4.5-6:** LCD-Einheit: a) LCD-Gehäusebefestigung b) Silber besprüht und verschraubt

Die LCD-Einheit (Abb. 4.5-6), vom Typ HED281 / DPM951 von Falcon, besteht aus einer  $3\frac{1}{2}$  Digitalanzeige mit zusätzlichen Anzeigefeldern für gängige Maßeinheiten und Dezimaltrennzeichen.

## 4.5.6 Verteilung der Funktionsgruppen



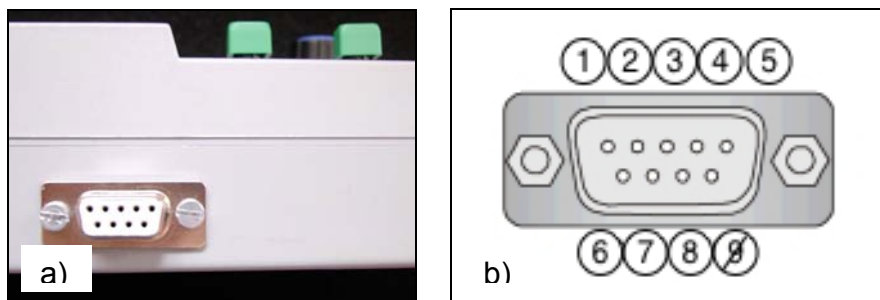
**Abb. 4.5-7:** Zusammengesetztes Messgerät (Innenansicht)

Die Zusammensetzung des Messgerätes (Abb. 4.5-7) erfolgte aus folgenden Komponenten:

- Ein DC/DC-Wandler dient zur Spannungsversorgung des OPs und der Relais.
- Drei Justier-Widerstände auf der Rückseite des Gehäuses ermöglichen den Abgleich der LCD-Einheit. Die Justier-Widerstände sind auf der Rückseite des Gehäuses unter einem Schutzdeckel angeordnet und sind mit den drei Messbereichen gekennzeichnet.
- Ein Drehschalter mit drei Schaltstellungen und drei Ebenen dient der Messbereichsumschaltung.

- Drei senkrecht angeordnete Taster (X, Y, Z) aktivieren die Sonden.
- Eine rote LED-Anzeige signalisiert eine niedrige Batteriespannung.
- Das Messgerät wird durch einen Kippschalter eingeschaltet.
- Eine seitlich angebrachte SUB-D-Kupplung dient als Schnittstelle zur Gleichrichter-Einheit.
- Alle mechanischen und elektronischen Bauelemente sind auf der Leiterplatine 1 zusammengeführt. Die Ansteuerung der LCD-Anzeige erfolgt ebenfalls auf dieser Leiterplatte. Als gemeinsames Massebezugspotenzial ist ein Kupferstreifen mit ca. 10 x 40mm in der Mitte der Platine angebracht. Der Übergang von der Frontseite des Gehäuses zur unteren Abdeckung erfolgt über ein 16-poliges Flachbandkabel

#### 4.5.7 Schnittstelle am Messgerät



**Abb. 4.5-8:** SUB-D-Schnittstelle: a) SUB- D-Kupplung, b) Pin-Nummerierung der Schnittstelle

Die Schnittstelle am Messgerät ist durch eine 9-polige SUB-D-Schnittstelle (Abb. 4.5-8) realisiert worden.

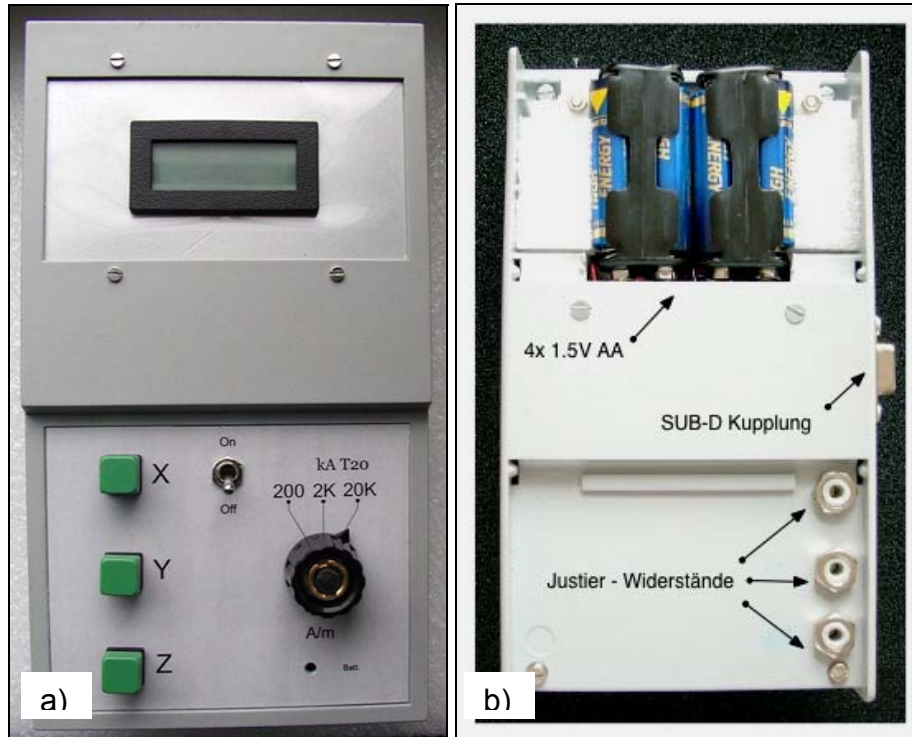
Die Pin-Belegung (Abb. 4.5-8) ist aus der folgenden Tabelle (Abb. 4.5-9) zu entnehmen:

Pin	Belegung
1	Taster X1 (+)
2	Taster Y1 (+)
3	Taster Z1 (+)
4	DC/DC-Wandler (+12V)
5	DC/DC-Wandler (-12V)
6	DC/DC-Wandler (Common)
7	Drehschalter (Ebene S1)
8	Gemeinsames Massebezugspotenzial
9	Nicht belegt

**Abb. 4.5-9:** Pin-Belegungsplan an der Messgerätschnittstelle

Die Länge der Verbindungsleitung zwischen dem Messgerät und der Gleichrichter-Einheit beträgt 1,8m. Eine Gesamtübersicht über die Pin-Belegungen aller Schnittstellen liegt im Anhang I bei.

#### 4.5.8 Endmontiertes Messgerät



**Abb. 4.5-10:** Ansicht des Messgerätes: a) Messgerät Frontansicht b) M. Rückansicht

Auf der Frontansicht (Abb. 4.5-10a) ist die bereits in Abb. 4.5-7 beschriebene Anordnung der Bedienelemente im fertigen Zustand zu sehen.

Die Rückansicht (Abb. 4.5-10b) zeigt den geöffneten Zustand des Batteriefaches, das für 4x 1.5V Batterien vorgesehen ist. Drei gekennzeichnete Justier-Widerstände für die Messbereicheinstellungen sind ebenfalls unter einem Deckel auf der Rückseite angebracht.

## 4.6 Funktionsprüfung des Messgerätes durch Feldsubstitution

Nachdem bereits das Messgerät bzw. die Gleichrichter-Einheit unabhängig voneinander überprüft worden sind, musste anschließend die Gesamtfunktion beider Einheiten geprüft werden.

Die Feldsubstitution wurde von einem Funktionsgenerator übernommen, der konstant bei einer Frequenz mit 100kHz und einer Leerlaufspannung ( $U_0$ ) von 10V betrieben wurde. Die Generatorimpedanz ( $R_i$ ) des Funktionsgenerators betrug während Prüfung 50 $\Omega$ . Die 100kHz- Wechselfspannung wurde nacheinander auf die Pins 1/2, 4/5 und 7/8 des SUB-D-Anschlusses am Sondenadapter eingekoppelt, sodass die Anzeige-Einheit am Messgerät die angelegte Spannung anzeigen konnte.

Der durch die Einfügung der Generatorimpedanz entstehende Fehler ist kleiner als 0,7% und kann daher vernachlässigt werden.

Bei der Bedienung des Messgerätes ist darauf zu achten, dass die Messbereiche nur in Verbindung mit der dazugehörigen Sonde ein korrektes Ergebnis liefern. Während der Messwertaufnahme darf nur eine der drei Achsenumschalter (X, Y, Z) gedrückt werden, da ansonsten kein korrekter Messwert angezeigt wird.

## 5 Entwicklung der Feldsonden und Beschreibung des Messsystems

In diesem Abschnitt werden unter anderem die Kriterien erläutert, die bei der Entwicklung von Feldsonden zu beachten sind. Ein Überblick zum Messprinzip zeigt das Verfahren der Feldlinienaufnahme. Als Nächstes werden theoretische Hintergründe behandelt, die als Grundlage bei der Fertigung dienen.

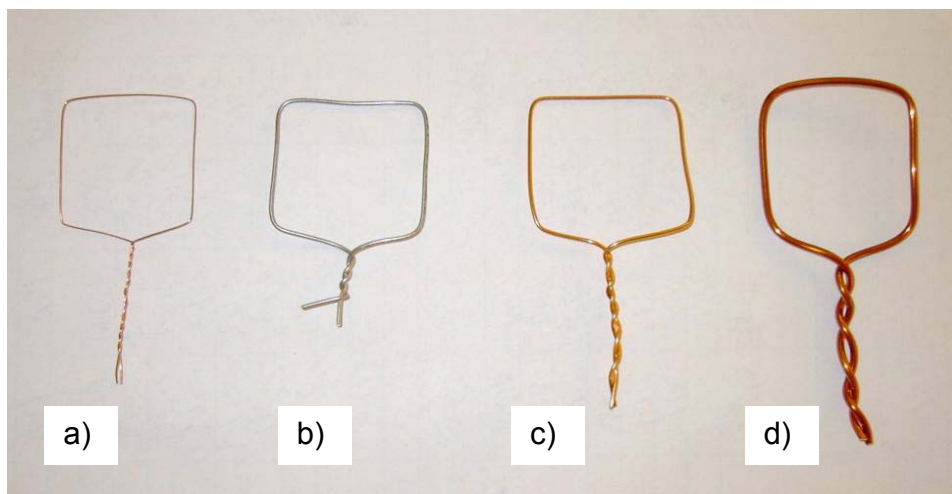
Im letzten Kapitel wird der mechanische Aufbau der Sonde dokumentiert und mit Fotos veranschaulicht.

Als Anmerkung ist zu erwähnen, dass beim Konzept zur Herstellung der Feldsonden die Materialauswahl und insbesondere die Konstruktion nach notwendigen Bedingungen und nach Verfügbarkeit erfolgte.

Zum Schluss wurden die Sonden mithilfe einer Kalibrierung mit den zu erwartenden Messergebnissen verglichen, um gegebenenfalls Korrekturen vorzunehmen.

## 5.1 Vorüberlegungen (Anforderungen an die Feldsonde)

Nach den Vorüberlegungen aus Kapitel 4.1 wurden vor der Festlegung des Leiterquerschnitts der Feldsonden zunächst Untersuchungen im Neu-Westend-Klinikum bezüglich der Materialbelastbarkeit durchgeführt. Der Feldapplikator wurde mit maximaler Leistung betrieben, d.h. dass bei einer Spalthöhe von 300mm etwa 10 Sekunden lang eine magnetische Feldstärke von bis zu 18kA/m erzeugt wurde.



**Abb. 5.1-1:** Materialbelastungstest mit vier Prüflingen

Der Materialbelastungstest wurde mit folgenden Prüflingen (Abb. 5.1-1) durchgeführt:

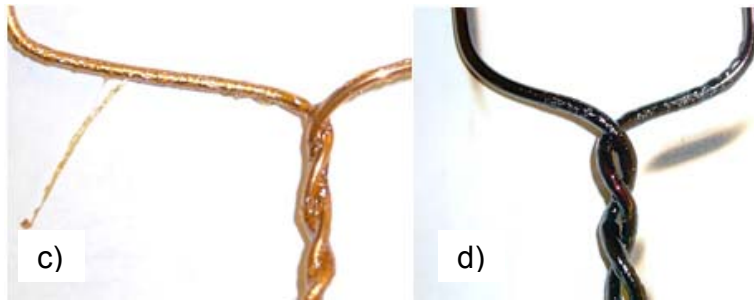
Abb. 5.1-1a) Isolierter Kupferdraht ( $\varnothing$  0,22mm)

Abb. 5.1-1b) Isolierter Kupferdraht, versilbert ( $\varnothing$  1,0mm)

Abb. 5.1-1c) Isolierter Kupferdraht ( $\varnothing$  0,35mm)

Abb. 5.1-1d) Isolierter Kupferdraht ( $\varnothing$  1,8mm)

Nach dem Belastungstest war zu erkennen, dass während einer Exposition im Feld von bis zu 18kA/m je nach Material und Querschnitt (Abb. 5.1-1) unterschiedliche thermische Belastungen auftraten.



**Abb. 5.1-2:** Bildausschnitt: Erkennbare Materialabnutzung durch thermische Belastung

Die Prüflinge c) und d) zeigten deutliche Materialabnutzungen aufgrund thermischer Belastungen. Die Isolierung, die bei einer verdrehten Leitung einen Kurzschluss verhindern soll, wurde regelrecht verbrannt. Der versilberte Kupferdraht zeigte zwar keine äußerlichen Veränderungen, dennoch konnte nach der Expositionszeit durch nähere Betrachtung eine leichte Abnutzung der Isolierung beobachtet werden. Zudem kam noch die erhöhte Temperatur des Prüflings hinzu, die bei längerer Feldaussetzung eine unnötige Belastung für das Messgerät wäre.

Demnach ist ein lackisolierter Kupferdraht mit 0,22mm Durchmesser ohne Bedenken für diesen Anwendungsfall verwendbar (Abb. 5.1-1a).

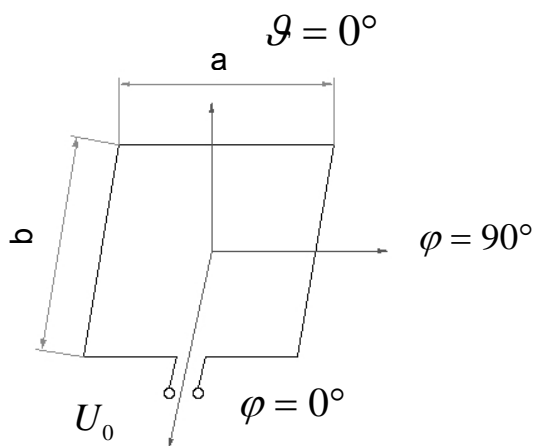
## 5.2 Überblick über das Messverfahren und theoretischer Hintergrund

Bei einer Empfangsantenne wird einer sich im Raum ausbreitenden elektromagnetischen Welle Energie entnommen und in einer Leiterschleife weitergeführt. Die Grundidee einer Empfangsantenne ist es, aus einer ankommenden ebenen Welle auf der Basis des Durchflutungs- und des Induktionsgesetzes einen Teil der Leistung auf die Anschlussleitung zu bringen.

Beim vorgesehenen Messvorgang ist nur die magnetische Komponente des elektromagnetischen Feldes interessant, deswegen werden überwiegend die Eigenschaften magnetischer Antennen behandelt.

Für die Aufnahme von magnetischen Feldlinien eignen sich so genannte Rahmenantennen (Abb. 5.2-1), die im Prinzip eine flache Spule darstellen.

Ihr Aufbau weist meist einen kreisförmigen oder quadratischen Querschnitt auf.



**Abb. 5.2-1:** Rahmenantennen aus vier kurzen Leiterstücken (prinzipieller Aufbau)

Die Abbildung (Abb. 5.2-2) veranschaulicht schematisch die Entwicklung einer Ring- bzw. Rahmenantenne.

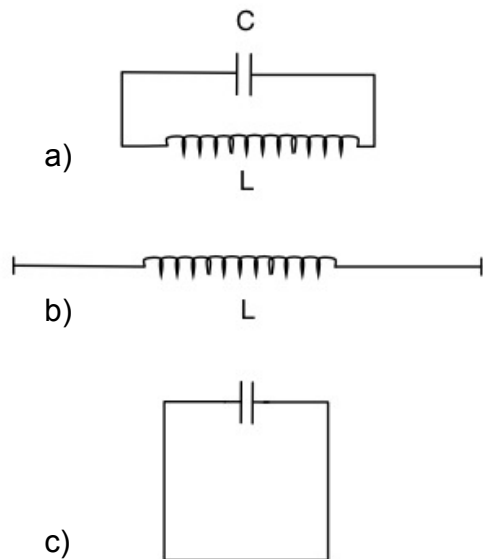
Die Abb. 5.2-2a zeigt einen Parallelschwingkreis. Im Fall, dass der Schwingkreis mit seiner Resonanzfrequenz erregt wird, pendelt die elektrische Energie zwischen dem Kondensator (elektrisches Feld) und der Spule (magnetisches Feld) hin und her.

Beide Feldarten können durch das in sich geschlossene System nicht nennenswert nach außen gelangen.

Im nächsten Bild (Abb. 5.2-2b) sind die Kondensatorplatten auseinander gezogen, sodass der Schwingkreis nun ein offenes System darstellt. Die relative Nähe der beiden Kondensatorplatten bildet vorwiegend ein elektrisches Nahfeld aus. Hierbei spricht man von einer elektrischen Antenne, denn die Ausbreitung der elektrischen Felder geschieht nun mehr in den Außenraum.

Belässt man nun die Position des Kondensators und zieht den Spulendraht so weit auseinander, dass er zu einem Rahmen (bzw. Ring) geformt werden kann, dann entsteht dabei die magnetische Rahmenantenne (bzw. Ringantenne) (Abb. 5.2-2c).

Diesmal kann ein ausgedehntes Magnetfeld aus der Rahmenschleife austreten, während sich das elektrische Feld in unmittelbarer Nähe des Kondensators konzentriert.



**Abb. 5.2-2:** Entwicklung einer magnetischen Rahmenantenne

- a- geschlossener Schwingkreis
- b- Schwingkreis geöffnet durch Auseinanderziehen der Kapazität
- c- Schwingkreis geöffnet durch Auseinanderziehen der Spule zur Rahmenform

In allgemeiner Betrachtung ist jede Antenne durch ihren Strahlungswiderstand  $R_r$  gekennzeichnet. Dieser nimmt mit kürzer werdender Antennenlänge, bezogen auf die Wellenlänge  $\lambda$ , ab. Die Näherungsformel aus Gleichung (29) bestätigt, dass der Strahlungswiderstand bei magnetischen Antennen, aufgrund der kurzen Bauweise,  $\ll 1\Omega$  beträgt.

$$R_{r/\Omega} \approx 197 \cdot n^2 \cdot \left(\frac{U_{\text{Rahmen}}}{\lambda}\right)^4 \quad [\Omega] \quad (29)$$

Rahmenantennen werden in der Regel mit sehr kleinen Rahmenabmessungen gegenüber der Betriebswellenlänge gebaut ( $l_r \ll \lambda$ ). Ihr Antennenwiderstand ist klein, vor allem dann, wenn die Fläche der Spule im Vergleich zu  $\lambda^2$  klein ist. Sie wird vorwiegend für Empfangszwecke verwendet, da sie als Sendeantenne einen sehr schlechten Wirkungsgrad aufweist.

Nach dem faradayschen Induktionsgesetz ist die in der Leiterschleife induzierte Spannung proportional zur Flussänderung in der Spule.

Wenn die Spule einem magnetischen Wechselfeld ausgesetzt wird, dann wird in ihr eine EMK induziert, die im Leerlauf an den Rahmenklemmen eine gleichgroße Leerlaufspannung  $U_0$  (Gl. 30) hervorruft. Die maximale Leerlaufspannung an den Rahmenklemmen tritt dann auf, wenn die Rahmenebene in die Richtung  $\varphi = 0^\circ$  fällt (Abb. 5.2-1). Bei  $\varphi = \pm 90^\circ$  fällt an den Rahmenklemmen keine Spannung ab, da die Spule in diesem Fall nicht mit dem magnetischen Wechselfeld verkettet ist.

Mit der Rahmenfläche  $F$  in  $\text{m}^2$ , der Frequenz  $f$  in Hz und der Rahmenwindungszahl  $n$  ergibt sich bei der Rahmenantenne die Leerlaufspannung

$$U_0 = \frac{H_\varphi \cdot 120\pi\Omega \cdot A \cdot n \cdot 2\pi f}{3 \cdot 10^8} \cdot \cos\varphi \quad [\text{V}] , \quad (30)$$

wobei bei optimaler Ausrichtung  $\cos\varphi = 1$  wird.

Die Ermittlung der magnetischen Feldstärke lässt sich in zwei weitere Messmethoden unterteilen:

1. Geschlossene Luftspule (*geschlossenes System*)
2. Offene Luftspule (*offenes System*)

Bei Vorversuchen hat sich ergeben, dass aufgrund des hohen Leistungsumsatzes ein geschlossenes Ringsystem durch thermische Überlastung sofort zerstört wird. Zur Ermittlung der magnetischen Feldstärke wird die Leerlaufspannung der offenen Spule herangezogen.

Diese hängt von der magnetischen Feldstärke, der umspannten Fläche, der Frequenz und der Windungszahl (Gl. 30) ab. Aus diesen abhängigen Faktoren konnte die umspannte Fläche der Sonden so gewählt werden, dass sich bei 20kA/m eine Leerlaufspannung von 10V (Abb. 5.2-3) ergibt (dekadischer Zusammenhang). Bei der Wahl einer geeigneten Rahmengröße musste sichergestellt werden, dass die kleinste Sonde mit ihren Abmessungen in dem Maximum der Feldexposition ausgesetzt werden konnte.

Die anderen beiden Sonden sind aus den Dimensionen der kleinen Sonde abgeleitet worden und sind für die Feldmessung unmittelbar um den Prüfling vorgesehen.

Sonde [Empfindlichkeit]	Kantenlänge	Windungen	Rahmenfläche
$20kA / m$	$l = 25mm$	$n = 1$	$0,625 \cdot 10^{-3} m^2$
$2kA / m$	$l \approx 81mm$	$n = 1$	$6,33 \cdot 10^{-3} m^2$
$200A / m$	$l \approx 89mm$	$n = 8$	$7,915 \cdot 10^{-3} m^2$

**Abb. 5.2-3:** Berechnung der Rahmenlänge bei  $U_0 = 10V$

Die in der Tabelle errechneten Kantenlängen sind bei der Fertigung berücksichtigt worden.

Bei der Überlegung einer geeigneten Messwertaufnahme kommen zwei Alternativen zur Auswahl:

1. Feldsonde mit isotroper Empfangscharakteristik
2. Feldsonde mit Richtcharakteristik

Feldsonden mit isotroper Empfangscharakteristik, die durch eine orthogonale Anordnung von drei Messwertaufnehmer/Detektorkombinationen im Sondenkopf erzielt wird, liefern einen von Einfallsrichtung und Polarisierung des zu messenden Feldes weitgehend unabhängigen Messwert.

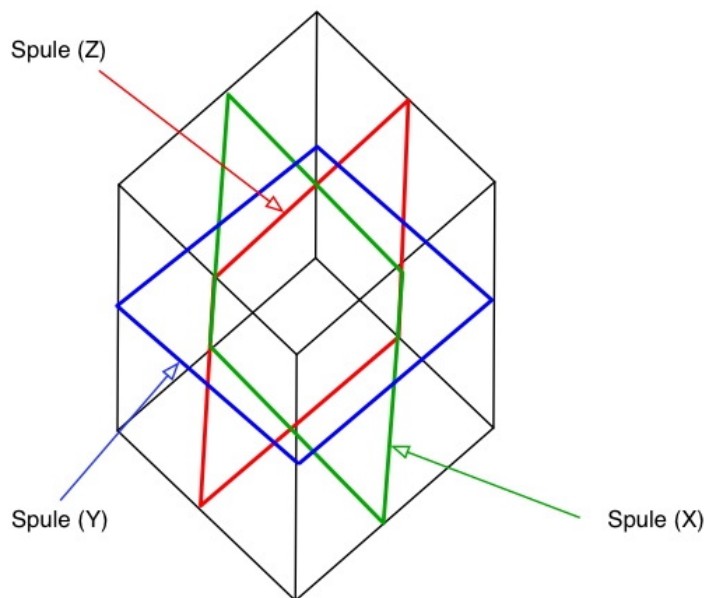
Diese Anordnung hat den Vorteil, dass der Sensor lageunabhängig immer den gleichen Wert der Feldstärke (Ersatzfeldstärke) liefert.

Ist dies der Fall, spricht man von idealer Isotropie des Sensors. Im Gegensatz dazu weisen Feldsonden mit nur einer Messwertaufnehmer/Detektorkombination oder Messantennen eine Richtcharakteristik auf und erfordern eine Orientierung der Sonde bzw. Antenne im Feld auf Maximumanzeige am Messgerät.

Eine dreikanalige Auswertung ist daher die bessere Wahl. Diese Methode liefert nicht nur exakte Feldstärken, sie spart auch Zeit, andernfalls müsste die Sonde nacheinander in x-, y- und z-Richtung ausgerichtet werden um aus den Einzelmesswerten die resultierende Feldstärke zu berechnen.

Die Dreikanal-Messung erfolgt in alle Richtungen mit gleicher Empfindlichkeit. Die Detektorkombination besteht aus drei Spulen, die senkrecht im Raum zueinander angeordnet sind und einen gemeinsamen Mittelpunkt besitzen (Abb. 5.2-4).

Um die geometrische Anordnung der drei Spulen beizubehalten, werden sie um einen Würfel aus Polyurethan gewickelt und zusätzlich zum Schutz in einer Acrylkugel gelagert. Nähere Beschreibungen dazu sind im nächsten Kapitel dokumentiert.



**Abb. 5.2-4:** Sonde mit orthogonaler Spulenanordnung

Die Achsenbezeichnung der Spulen erfolgte willkürlich, da die magnetische Feldstärke aus der Berechnung der drei Koordinaten resultiert und die Ausrichtung der Spulen mit  $\varphi$  berücksichtigt wird.

Die drei aufgenommenen SONDENSspannungen werden getrennt zum Gleichrichter geleitet. Für die Feldstärkenaufnahme wird jede der drei Achsen (Luftspulen) mit Tastern versehen.

Das magnetische Feld ist ein Vektorfeld, d.h., an jedem Punkt des Raumes herrscht eine gewisse Stärke und Richtung.

Um Feldstärken an einem Ort unabhängig von der Einfallsrichtung und Polarisation der elektromagnetischen Strahlung miteinander vergleichen zu können, hat sich der Begriff Ersatzfeldstärke eingebürgert.

Die Ersatzfeldstärke (Gl. 31) wird aus dem geometrischen Mittel der räumlichen Feldstärkekomponenten  $H_x, H_y, H_z$  (Abb. 5.2-5) gebildet, wobei die Phasendifferenzen der drei Komponenten unberücksichtigt bleiben.

$$H_E = \sqrt{(H_x^2 + H_y^2 + H_z^2)} \quad [A / m] \quad (31)$$

Die Spitze des Feldvektors beschreibt eine Ellipse im Raum.

→ elliptisch polarisiertes Feld

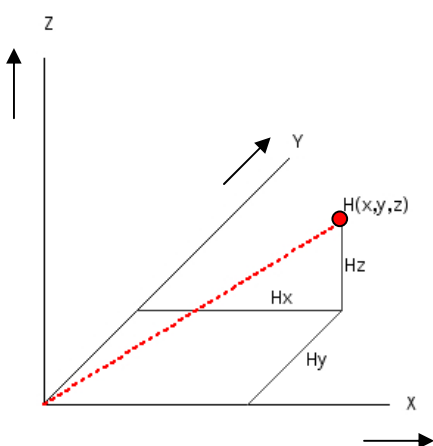
Falls der Feldstärkenvektor seine Richtung nicht ändert (Feldkomponenten sind dann phasengleich), spricht man von

→ linearer Polarisation

In diesem Fall ist die Ersatzfeldstärke  $H_E$  gleich dem Betrag der Feldstärke  $H$ .

Somit ist die Lage der Sonde in einem linear polarisiertem Feld nicht von Bedeutung, wenn diese das Feld korrekt in seine drei orthogonalen Komponenten zerlegt. Hierdurch wird immer die richtige Feldstärke gemessen.

Die Ermittlung der magnetischen Ersatzfeldstärke erfolgte durch manuelle Berechnung.



**Abb. 5.2-5:** Vektorkomponenten der magnetischen Ersatzfeldstärke

## 5.3 Fertigung der Sonden

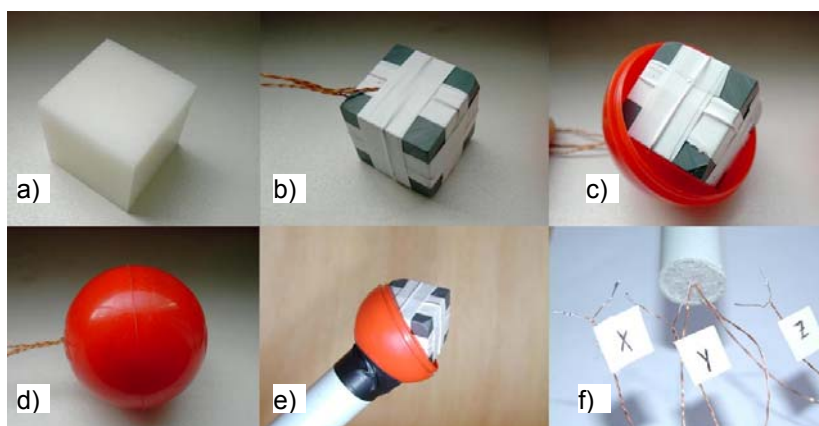
Im folgenden Kapitel werden die Fertigungsarbeiten der Sonden dokumentiert und mit Fotos veranschaulicht. Der Aufbau der drei Sonden erfolgte in drei Arbeitsschritten. Die Umsetzung der theoretischen Überlegungen in die Praxis musste zunächst an einer Testsonde im Applikator im Neu-Westend-Klinikum überprüft werden. Der Aufbau erforderte insbesondere bei der Wicklung der Sonden eine präzise Einhaltung der errechneten Werte.

### 5.3.1 Wickelkörper

Die Einhaltung der errechneten Kantenlängen der Sonden konnte durch einen Wickelkörper vereinfacht werden (Abb. 5.3-1a). Dieser hat die Form eines Würfels und besteht bei der kleinen Sonde aus dem nichtleitfähigen Material Teflon.

Diese abgebildete Sonde ist die Erprobungs-Sonde, die mit einem isolierten Cu-Draht aus 0,22mm Durchmesser einmal um den Körper gewickelt wurde (Abb. 5.3-1b). Die einzelnen Spulen wurden mittig um die Wickelkörper gelegt, um sicherzustellen, dass alle drei Wicklungen senkrecht zueinander angeordnet sind.

Um die Anordnung der drei Wicklungen beizubehalten, wurden sie zusätzlich mit Teflonband fixiert (Abb. 5.3-1b). Zum Schutz gegen Stöße und Unreinheiten wurde die Sonde in einem durchsichtigen, kugelförmigen Hohlkörper untergebracht (Abb. 5.3-1d).



**Abb. 5.3-1:** Herstellung der Sonde

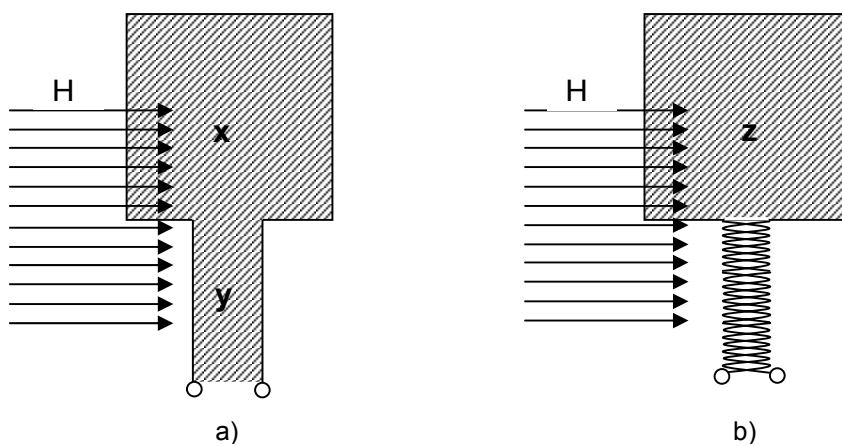
- a) Teflon-Würfel, b) gewickelte Sonde, c) Schutzgehäuse (offen), d) Schutzgehäuse (geschlossen),  
e) Sondenbefestigung, f) Leitungsende

Die Drahtenden wurden an einer Ecke des Würfels zusammengeführt und paarweise gleichsinnig verdrillt. Die Verdrillung der Leitung ist eine Vorsichtsmaßnahme, um der Durchflutung nur die gespannte Fläche des Drahtes um den Würfel zu exponieren (Abb. 5.3-1b) und nicht zusätzlich eine Angriffsfläche anzubieten, die zwischen zwei parallel geführten Leitungen gespannt wird (Abb. 5.3-1a).

Demnach ergibt sich für

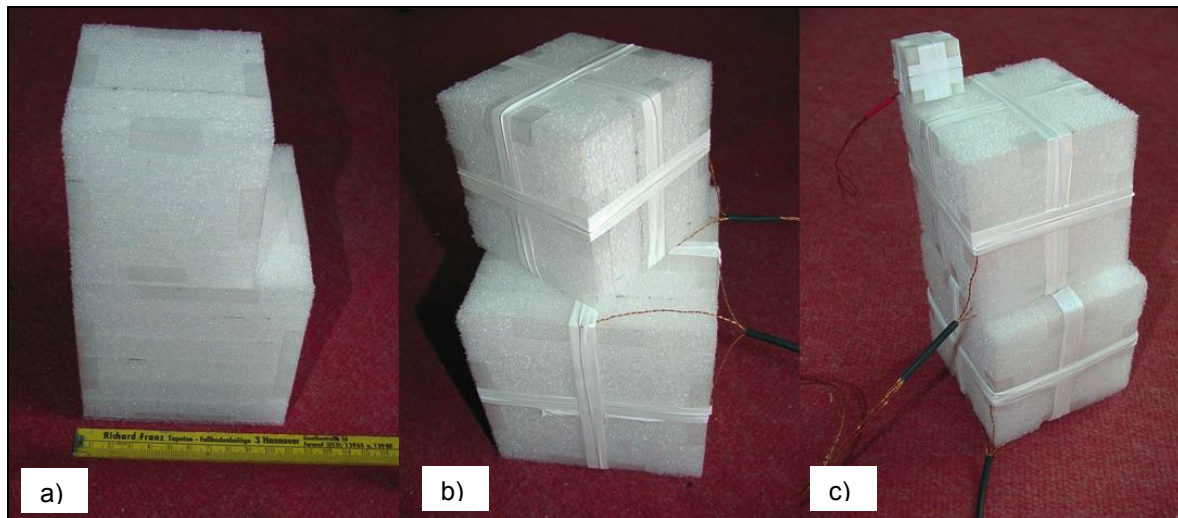
$$A_1 = x + y \text{ und } A_2 = z \text{ daraus folgt } A_2 > A_1 .$$

Dadurch wird eine berechenbare Homogenität erreicht, die bei der Genauigkeit der gemessenen Feldstärke entscheidend ist.



**Abb. 5.3-2:** Durchflutungsfäche a) parallele Leitung b) verdrillte Leitung

Am Leitungsende (Abb. 5.3-1f) wurde der Isolierlack der Kupferdrähte in ausreichender Länge entfernt, der blanke Draht verzinkt, um die Anbindung an die Sondenstecker zu ermöglichen.



**Abb. 5.3-3:** a) Wickelkörper aus Polyurethan b) gewickelte Sonden c) Sondenvergleich

Der Aufbau bzw. das Wickelprinzip der beiden Sonden (Abb. 5.3-3a), die für 200A/m und 2kA/m vorgesehen sind, entspricht bis auf zwei Einzelheiten dem der kleinen Sonde.

Zum einen besteht der Wickelkörper aus dem leichteren Polyurethan. Zum anderen sind alle Kanten der Würfel durch Kunststoffkanten (Abb. 5.3-4) verstärkt, da der Draht ansonsten in den Wickelkörper eindringen würde und somit die Geometrie verändert wäre.

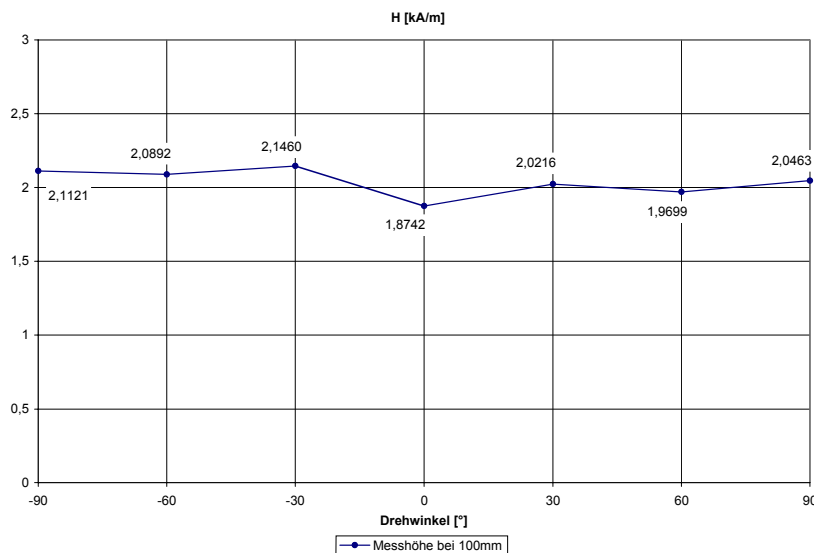


**Abb. 5.3-4:** Verstärkte Würfelkante

Die mechanische Fertigung der Sonden erforderte insbesondere bei der Wicklung Präzisionsarbeit, denn kleinste Veränderungen der Abstände resultieren in

Messungenauigkeiten. Die Überprüfung der Messungenauigkeit erfolgte bei einer Isotropiemessung.

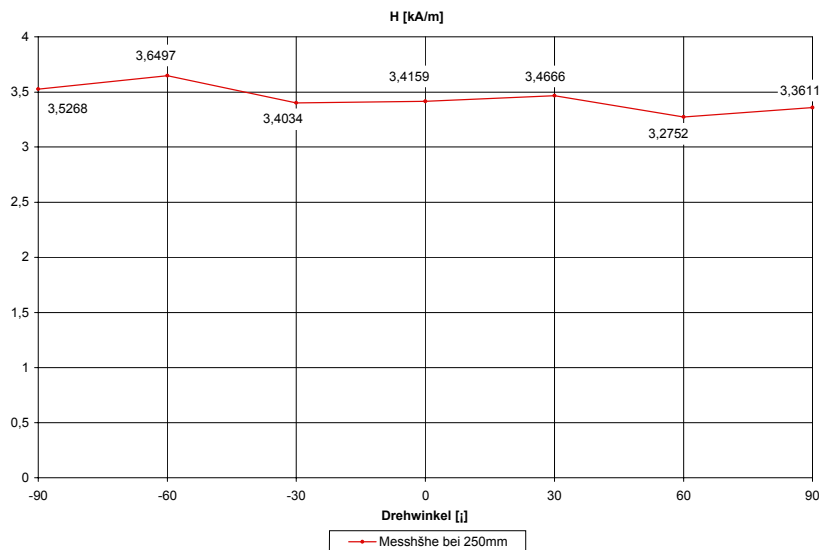
Im unteren Diagramm (Abb. 5.3-5) ist der Verlauf der magnetischen Ersatzfeldstärke der drei Feldkomponenten dargestellt, der sich über den Winkel betrachtet kaum ändert.



**Abb. 5.3-5:** Isotropiemessung (Sonde in Horizontalstellung), Aussteuerung bei  $I = 110A$

Die Isotropiemessung erfolgte in horizontaler (Abb. 5.3-5) und vertikaler (Abb. 5.3-6) Lage in zwei verschiedenen Messhöhen (100mm bzw. 250mm) bzw. Feldstärken.

Da bei dieser Messung die Größenordnung der auftretenden Feldstärken keine Rolle spielt, wurde aus Sicherheitsaspekten die Überprüfung bei  $I=110A$  durchgeführt (kleinste Aussteuerung).



**Abb. 5.3-6:** Isotropiemessung (Sonde in Vertikalstellung), Aussteuerung bei  $I = 110A$

Auch in obiger Abbildung (Abb. 5.3-6) ist ein gutes Isotropieverhalten der Sonde erkennbar. Die Isotropiemessung wurde lediglich an der kleinen 20kA/m–Sonde durchgeführt. Aufgrund derselben Wickeltechnik wird angenommen, dass das Ergebnis auch für die anderen beiden Sonden gilt.

Wie bereits aus der Theorie hervorging musste die Windungszahl der größten Sonde auf 15 erhöht werden, damit die Verhältnisse der Gleichung (20) beibehalten werden.

Dabei sind die Windungen so dicht wie möglich zueinander gewickelt worden.

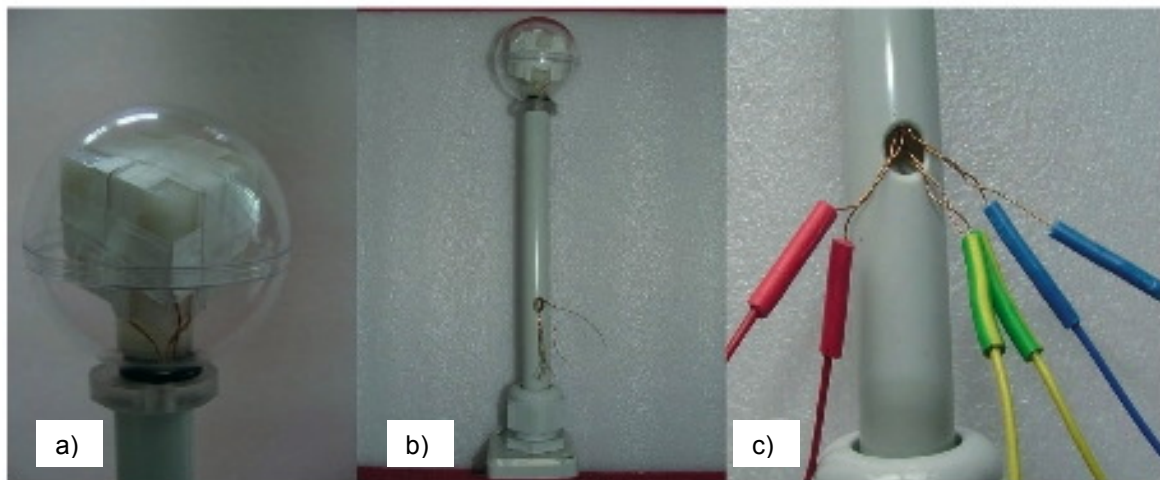
Ein Verhältnis der Größenordnung der drei Feldsonden ist aus der obigen Abbildung (Abb. 5.3-3c) zu erkennen.

### 5.3.2 Schnittstelle zum Sondenadapter

Die fertig gewickelten Sonden sind zusätzlich zum Schutz in einer Acrylkugel (Abb. 5-3-7a) untergebracht. Damit sich die Sonde nicht in der Kugel verdrehen konnte, musste die Raumdiagonale des Würfels dem Innendurchmesser der Kugel entsprechen. Die Sonden wurden mithilfe von Gummiringen (Abb. 5.3-7b) und Kunststoffschrauben an 25cm lange PVC-Rohren befestigt.

Als Nächstes wurden die 3 x 2 Leitungsenden seitlich am Rohr rausgeführt (Abb. 5.3-7c) farbig gekennzeichnet und an SUB-D-Stecker gelötet, die für die Anbindung zum Sondenadapter bestimmt sind.

Die Pin-Belegung ist aus dem Kapitel 4.5.2 (Abb. 4.5-5) zu entnehmen.



**Abb. 5.3-7:** Sondenadapter: a) SONDENGEHÄUSE, b) SONDENMODUL, c) SONDENLEITUNGEN

### 5.3.3 Fertig gestellte H-Feldsonde

Die untere Abbildung (Abb. 5.3-8) zeigt das Größenverhältnis der drei H-Feldsonden.

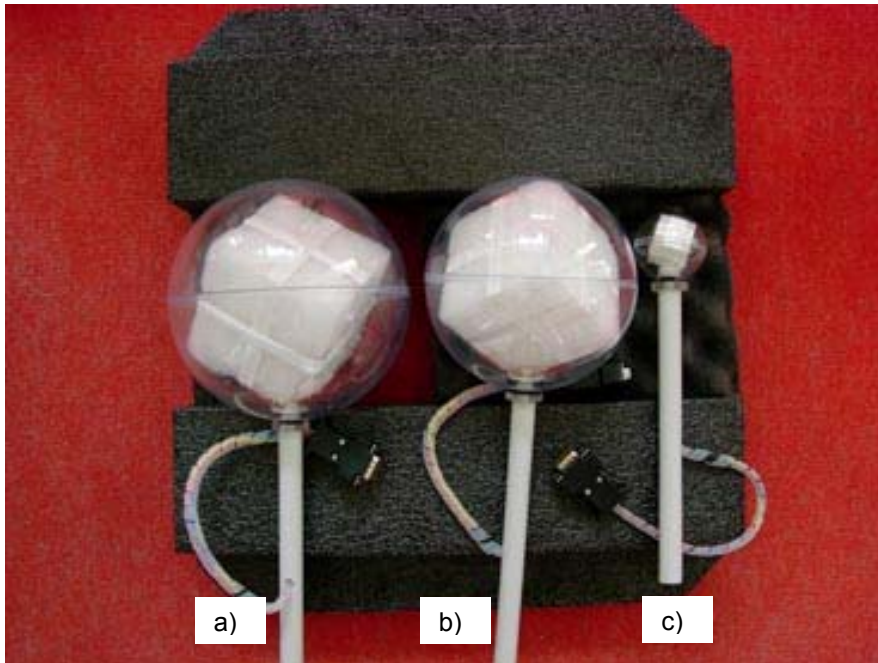
Bei der Verwendung der Sonden ist darauf zu achten, dass je nach Stärke der Exposition die richtige Sonde aufgesteckt wird, da ansonsten eine Zerstörung des Messgerätes die Folge wäre.

Für Feldstärken bis zu 20kA/m ist die Sonde in Abbildung 5.3-8c zu verwenden. Der nächste Messbereich schließt Größenordnungen bis zu 2kA/m ein und kann mit der Sonde in Abbildung 5-2b gemessen werden.

Der kleinste Messbereich ist für Expositionen vorgesehen, die unterhalb von 200A/m liegen, hierfür ist die Sonde in Abbildung 5.3-8a dimensioniert.

Nach der Fertigung ist festgestellt worden, dass aus Sicherheitsgründen der vorgesehene Abstand der Sonden vom Messgerät bei den beiden größeren Sonden ein statisches Problem darstellte, sodass das Anbringen einer Stativhalterung notwendig war.

Diese Veränderung der Messvorrichtung verbesserte nicht nur die Stabilität der Sondenhalterung, sondern sicherte auch eine gleichmäßige Feldaufnahme einer Dreikanal-Messung.



**Abb. 5.3-8:** H-Feld-Sonden für 100kHz, a) 200A/m , b) 2kA/m, c) 20kA/m

## 6 Kalibriervorgang des Messgerätes

Die Reproduzierbarkeit von Messergebnissen und der normgerechte Nachweis von Feldstärken sind wichtige Kriterien einer Kalibrierung.

Der Kalibriervorgang für derartige Messgeräte stellt eine Herausforderung dar.

Der Prüfaufbau setzt ein berechenbares Vergleichsfeld mit 20kA/m voraus. Dazu ist es notwendig, ein magnetisches Wechselfeld mit ausreichend großer Homogenität zu erzeugen (Norm-Magnetfeld).

Wie bereits im Kapitel 5 erwähnt, führt zwar die PTB-Kalibrierungen durch, jedoch nicht im hier benötigten Messbereich. Da auch im betreuenden Messlabor kein ausreichend großes Feld erzeugt werden konnte, wurde die Überprüfung am zu vermessenden Gerät durchgeführt.

Der Kalibriervorgang diene dazu, die Homogenität des Feldes bzw. die Rastergröße abschätzen zu können, die für die eigentliche Messung geeignet ist.

Im Anschluss an den Kalibriervorgang ist eine Betrachtung der möglichen Messfehler aufgeführt.

Als Anmerkung ist hinzuzufügen, dass Personen das magnetische Feld nicht beeinflussen, sodass das Messgerät vom Messenden direkt ins Feld gebracht werden darf. Nennenswerte Verzerrungen des magnetischen Feldes sind nur durch Gegenstände aus ferromagnetischen Metallen zu erwarten.

## 6.1 Vorbereitung der Messung und Ortung der maximalen Feldstärke

Zum Kalibriervorgang wurde eine mechanisch hochpräzise gefertigte Kalibriersonde (Abb. 6.1-1) zum Ausmessen eines homogenen Kugelvolumens mit einer Abweichung < 5% verwendet. Die Kalibriersonde besteht aus dem Material AWS.

Der Außenring dient als Schutz und hat einen Durchmesser mit 40mm.

Der Innenring mit ca. 20mm Durchmesser führt eine Lut mittig mit 0,1mm Tiefe, so dass ein Draht mit 0,1mm Durchmesser um den Innenring gewickelt werden konnte.

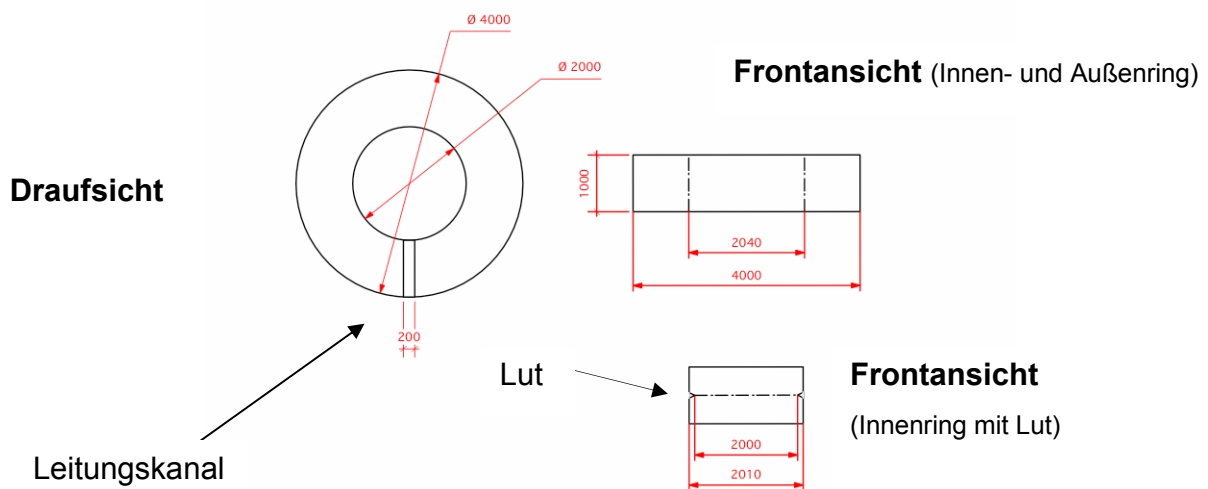


Abb. 6.1-1: Kalibriersonde

Der Feldapplikator kann durch Variierung der Spalthöhe unterschiedliche Maxima erzeugen. Die Höhe für Therapie-Anwendungen kann zwischen 210mm und 300mm betragen, wobei je nach Aussteuerung (100A–500A) unterschiedliche Feldstärken erzeugt werden können. Für die Kalibriersonde wurde eine Spalthöhe von 300mm gewählt. Die Messhöhe des Kalibriervorgangs betrug 150mm ausgehend von der Patientenliegefläche.

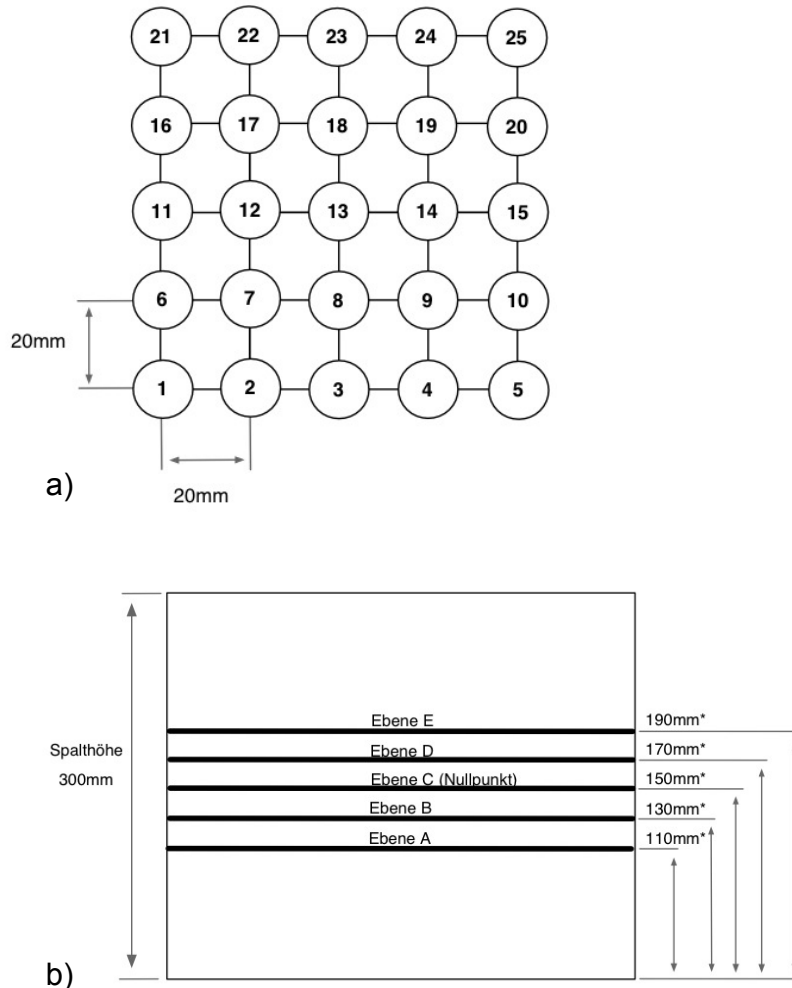
Die Lokalisierung der maximalen Feldstärke bei dieser Messhöhe konnte durch die Hand geführte Sonde ermittelt werden. Ausgehend von dem Punkt der maximalen Feldstärke konnte anschließend die Kalibrier-Messung beginnen.

Als Indikator wurde ein Oszilloskop (siehe Anhang B) verwendet.

Das dafür verwendete Messraster wurde so angeordnet, dass der Nullpunkt des Rasters am Punkt der maximalen Feldstärke platziert wurde (Koordinate C13).

Die Messpunkte sind nach dem Raster aus der nächsten Abbildung (Abb. 6.1-2) zu entnehmen. Dabei erfolgte eine Höhen-Einteilung in 5 Ebenen von A-E mit jeweils 20mm Abstand zueinander.

Die einzelnen Ebenen sind in ein 20 x 20 mm<sup>2</sup> Raster eingeteilt, die jeweils insgesamt 25 Messpunkte enthalten. Somit ergaben sich nach Durchführung der Messung 125 Messpunkte bzw. die Feldverteilung im Raum der Therapiezone.



\* Messhöhe über Patientenliegefläche

**Abb. 6.1-2:** 5-Ebenen-Kalibrier-Raster, a) Draufsicht, b) Frontansicht

Die Sonde wurde auf einem 2-Zentimeter-Raster verschoben und mithilfe von 1cm starken Hartschaumplatten in der Höhe variiert. Eine maximale Felddurchdringung der Spule konnte durch horizontale Haltung der Sonde erreicht werden. Bei Vollaussteuerung der Anlage wurde im Zentrum des annähernd homogenen Bereiches eine Feldstärke von 13,53 kA/m ermittelt. Nach abschätzender Betrachtung handelt es sich bei der Feldverteilung um ein etwa kugelförmiges Gebilde.

## 6.2 Messtechnische Ermittlung der homogenen Zone

Nachdem durch die Kalibriermessung eine nahezu homogene Zone lokalisiert wurde, konnte das Raster in der Therapiezone so platziert werden, dass das ermittelte Maximum dem räumlichen Mittelpunkt des Raum-Rasters entsprach.

Die Sonde wurde mithilfe einer Passform jeweils zentrisch im Rasterkreuz gelagert.

Als Nächstes wurden die Messwerte ebenenweise aufgenommen. Die Messwerte der Kalibriersonde (Anhang K) beinhalten 25 Messpunkte pro Ebene (A-E). Die ermittelte Abweichung von etwa 2% des Maximalwertes des Feldes (Feldhomogenität) ist in einem etwa kugelförmigen Volumen mit 3cm Radius festgestellt worden.

## 6.3 Messfehlerbetrachtung

Eine Fehleranalyse ist je nach messtechnischer Anforderung unterschiedlich zu bewerten. In diesem Fall werden mögliche Beeinflussungen untersucht, die zwar durch entsprechenden Aufwand korrigiert werden könnten, aber je nach Fehlertyp nicht immer berücksichtigt werden müssen. Als mögliche Fehlerursachen können die Experimentieranordnung, die verwendeten Messgeräte und Messmittel, der Experimentator und die Umgebung eine Verfälschung der Messgröße bewirken.

Es spielen also sowohl objektive und vom Messenden nicht zu beeinflussende, als auch subjektive und beeinflussbare Faktoren eine Rolle. Je nach ihrem Charakter unterscheidet man unterschiedliche Arten von Messfehlern. Darunter treten im Allgemeinen vermeidbare systematische und unvermeidbare zufällige Fehler auf, die statistisch vorkommen. Dabei kann das Ergebnis, durch fehlerhafte Messinstrumente oder durch gesetzmäßig schwankende Versuchsbedingungen beeinflusst werden.

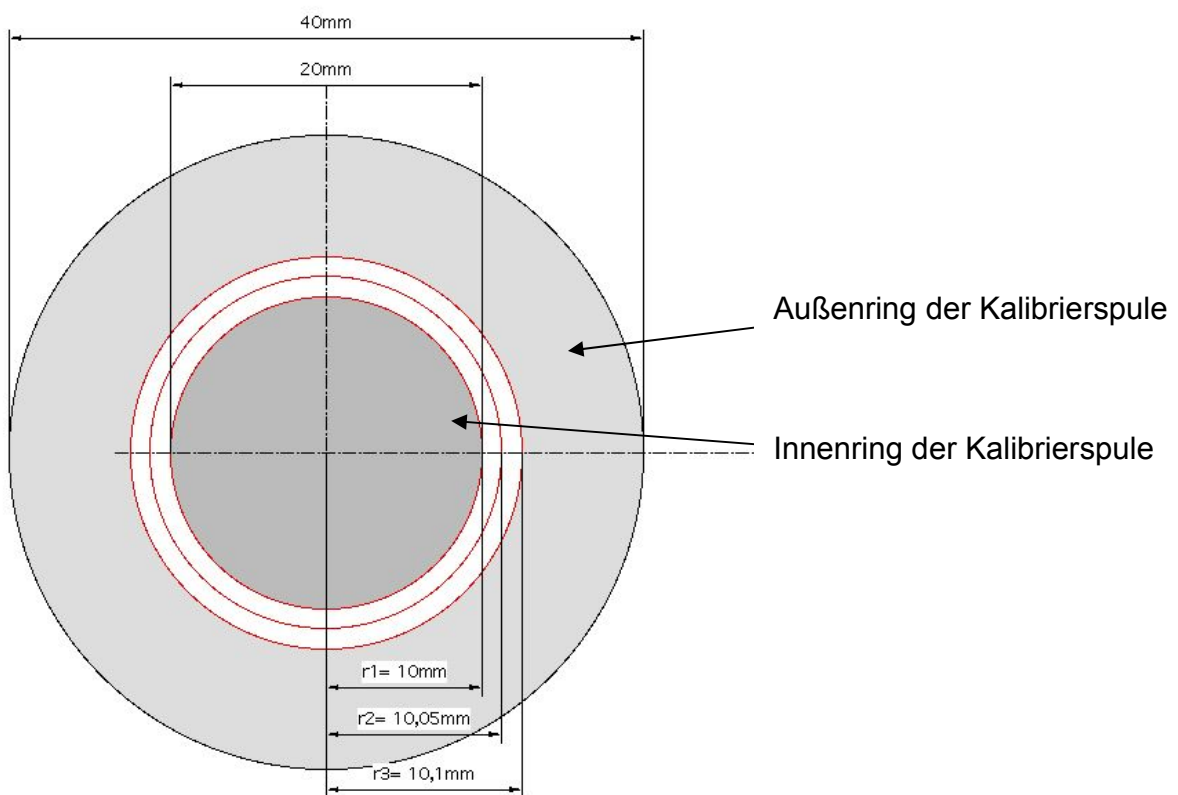
Der Einfluss des Fehlers kann durch Übertragung der Fehler einer Größe auf eine andere, von dieser abgeleiteten Größe, vergrößert werden. In diesem Fall spricht man von Fehlerfortpflanzung.

Zunächst kommt das Messgerät als mögliche Fehlerquelle in Betracht.

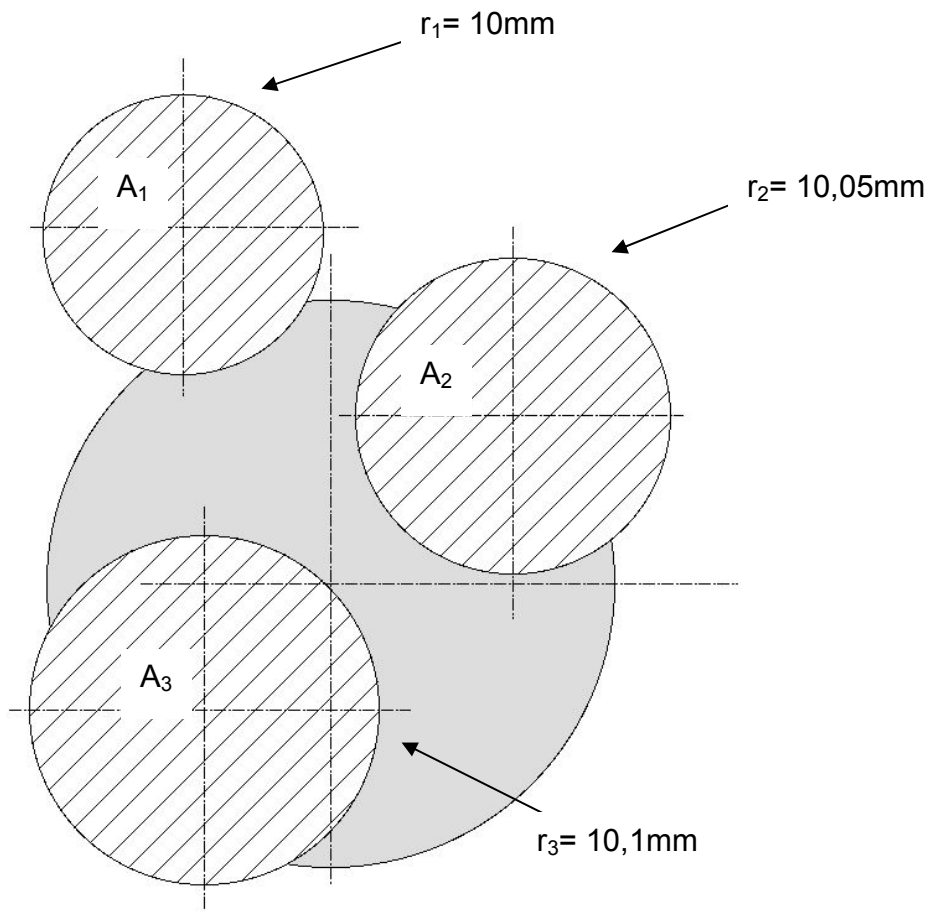
Die Kalibriermessung wurde mithilfe eines Oszilloskops vom Typ LeCroy 5350CL durchgeführt. Die Genauigkeit der angezeigten Werte ist mit 2% angegeben.

Als nächste mögliche Fehlerquelle wurde die Kalibriersonde untersucht.

Die Präzisionssonde wurde, wie bereits beschrieben, mit einer Lut im Innenring angefertigt, wobei die Lut mittig verläuft. Bei der Berechnung der gespannten Fläche wurde lediglich der Durchmesser des Innenrings berücksichtigt und nicht zusätzlich der Durchmesser des Cu-Drahtes. Die untere Abbildung (Abb. 6.3-1) dient der vereinfachten Darstellung, inwiefern die umspannte Fläche des Drahtes vom Radius variiert. Das Größenverhältnis ist frei gewählt und entspricht nicht dem Originalmaß.



**Abb. 6.3-1:** Drahtdurchmesser im Unterschied



**Abb. 6.3-2:** Flächenverhältnis bei unterschiedlichen Radien

$$\Rightarrow A_1 < A_2 < A_3$$

Theoretisch betrachtet gibt es unendlich viele Radien. In der obigen Abbildung (Abb. 6.3-1) sind für das prinzipielle Verständnis nur drei eingezeichnet. Daraus ist zu erkennen, dass bei unterschiedlichen Radien (Abb. 6.3-2) auch verschieden große Flächen gespannt werden, sodass die Durchflutungsfläche immer eine andere ist. Demnach ist die Fläche  $A_1$  die kleinste und  $A_3$  die größtmögliche Fläche.

Aufgrund der Direktproportionalität zwischen der Fläche und der Leerlaufspannung ergibt sich bei größerer Fläche eine größere Leerlaufspannung.

Mit zunehmender Kantenlänge der Spule bei konstantem Drahtdurchmesser nimmt der Unterschied zwischen maximal und minimal umspannter Fläche ab, damit auch eine mögliche Abweichung von der Ausgangsspannung.

Die Tabelle in Abbildung 6.3-3 zeigt den Vergleich bei unterschiedlichen Betrachtungen. Bei der Wicklung der räumlich größeren Messsonden, die für die Vermessung des Applikators vorgesehen sind, spielt hingegen diese Betrachtung eher eine zu vernachlässigende Rolle, da die Verhältnisse der jeweiligen Kantenlängen zum Drahtdurchmesser zu klein sind. Lediglich bei der kleinsten Sonde mit 25mm Kantenlänge kann eine ähnliche Fehlerbetrachtung wie bei der Kalibriersonde berücksichtigt werden.

Durchmesser D [mm]	Radius [mm]	Fläche [mm <sup>2</sup> ]	U <sub>0</sub> [mV]
<b>20</b>	<b>10</b>	<b>0,000314159</b>	<b>248,055848</b>
20,1	10,05	0,000317309	250,543047
20,2	10,1	0,000320477	253,044458

Durchmesser D [mm]	Mittelwertabweichung [mV]	Mittelwertabweichung [%]
<b>20</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
20,1	2,487199	1,01
20,2	4,98861	1,02

**Abb. 6.3-3:** Berechnung der möglichen Abweichung

Für den Kalibriervorgang wurde der mittlere Radius mit 10,05mm gewählt, da die tatsächlich effektive Durchflutungsfläche unbekannt ist. Bei der Umrechnung ergibt sich eine Abweichung der Leerlaufspannung von  $\pm 0,8\%$ , bezogen vom mittleren auf den maximalen bzw. minimalen Radius.

Als nächster Punkt ist der Leistungsverlust im Feld durch die Messwertaufnahme zu erwähnen. Um eine Feldmessung überhaupt zu ermöglichen, muss dem Feld Energie entzogen werden. Die Größenordnung des Verlustes bei 10V Leerlaufspannung und einer Last von 6,8k $\Omega$  (Antennenlast) beträgt 15mW.

Dieser Leistungsverlust erfolgt während einer Messwertaufnahme in Form einer Transformation des Lastwiderstandes in das Wirkfeld.

Zusätzlich haben die für den Bau einer Rahmenantenne verwendeten Drähte einen ohmschen Widerstand, eine Induktivität und eine Kapazität, die sich negativ auf das Rauschverhalten der Spule auswirken.

Bei der folgenden Abbildung (Abb. 6.3-4) sind diese Leitungsverluste für die drei Sonden berechnet worden. Die Ermittlung der Induktivitäten erfolgte durch eine Näherungsformel (Gl. 32). Die Widerstandsbeläge sind nach dem spezifischen Widerstand des Leitermaterials (in diesem Fall Kupfer) berechnet worden (Gl. 33).

$$L = \frac{(2\pi \cdot r \cdot n)^2}{l} \quad (32)$$

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad \text{mit} \quad \rho = 17,8 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \quad (33)$$

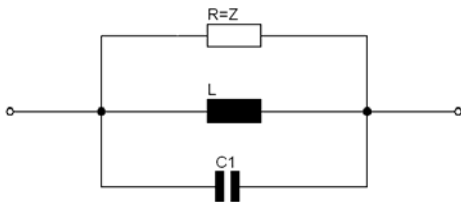
Spulenlänge (Sonde)	Induktivität [L <sup>-1</sup> ]	Induktiver Blindwiderstand $X_L = 2\pi f l$	Widerstands-Belag [R]
$l = 25\text{mm}$	$50\text{nH}(n = 1)$	$31\text{m}\Omega$	$226\text{m}\Omega$
$l = 81\text{mm}$	$170\text{nH}(n = 1)$	$53\text{m}\Omega$	$734\text{m}\Omega$
$l = 89\text{mm}$	$12,4\mu\text{H}(n = 15)$	$3,9\Omega$	$6,5\Omega$

**Abb. 6.3-4:** Leitungsverluste der Rahmenspule

Die kapazitiven Anteile des Kupferdrahtes sind nicht ohne weiteres mit Formeln berechenbar. Je nach Spulentyp und Größe ist die Berechnung äußerst schwierig und nur mit großen Fehlern möglich. Aus Erfahrungsberichten anderer Hersteller ist das Vernachlässigen der kapazitiven Anteile in Spulenarten mit ähnlicher Größe übernommen worden.

Die übrigen Leitungsverluste ( $X_L$  und R) der Rahmenantenne aus Abb. 6.3-4 sind aufgrund ihrer Größenordnung vernachlässigbar.

Eine weitere wichtige elektrische Größe einer Kalibrierspule ist deren Eigenfrequenz, die den nutzbaren Frequenzbereich bestimmt. Resonanz tritt ein, wenn der Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung  $\varphi = 0$  beträgt. Jede Spule besitzt eine Induktivität und eine Kapazität mit dem Ersatzschaltbild: (Abb. 6.3-5)



**Abb. 6.3-5:** Spule mit Eigenkapazität und deren dielektrischen Verlusten

( $Z$  = Scheinwiderstand,  $C1$  = Eigenkapazität) Resonanz tritt ein, wenn

$$\omega^2 \cdot L \cdot C = 1. \quad (34)$$

Daraus ergibt sich die Eigenresonanz der Spule zu

$$f_0 = \frac{1}{(2\pi\sqrt{L \cdot C})} \quad (35)$$

Bis zur Eigenresonanz besitzt die Spule rein induktives Verhalten und ab der Eigenresonanz rein kapazitives Verhalten. Da die aufgebaute Kalibriersonde für das Vermessen eines Applikators vorgesehen ist, der mit einer konstanten Arbeitsfrequenz ( $f = 100\text{kHz}$ ) betrieben wird, kann diese Fehlerquelle ausgeschlossen werden.

## 7 Feldmessungen am Hyperthermiesystem

Die Messung wurde am 22. Juni 2004 in der Charité im Virchow-Klinikum Berlin durchgeführt. Eine gründliche Vorbereitung auf die Vorgehensweise der Messung ist eine wichtige Voraussetzung gewesen, die Kalibrierung und die Messung an einem Tag durchführen zu können. Die Messung erfolgte mit Unterstützung von Herrn Reichl vom EMV-Labor und Herrn Brüß von FM-Elektronik.

In den nachfolgenden Kapiteln wird der Messaufbau beschrieben. Anschließend wurde die Messung durchgeführt und ausgewertet.

## 7.1 Vorbereitung der Messung

Die Vermessung des Feldapplikators umfasst drei Messbereiche:

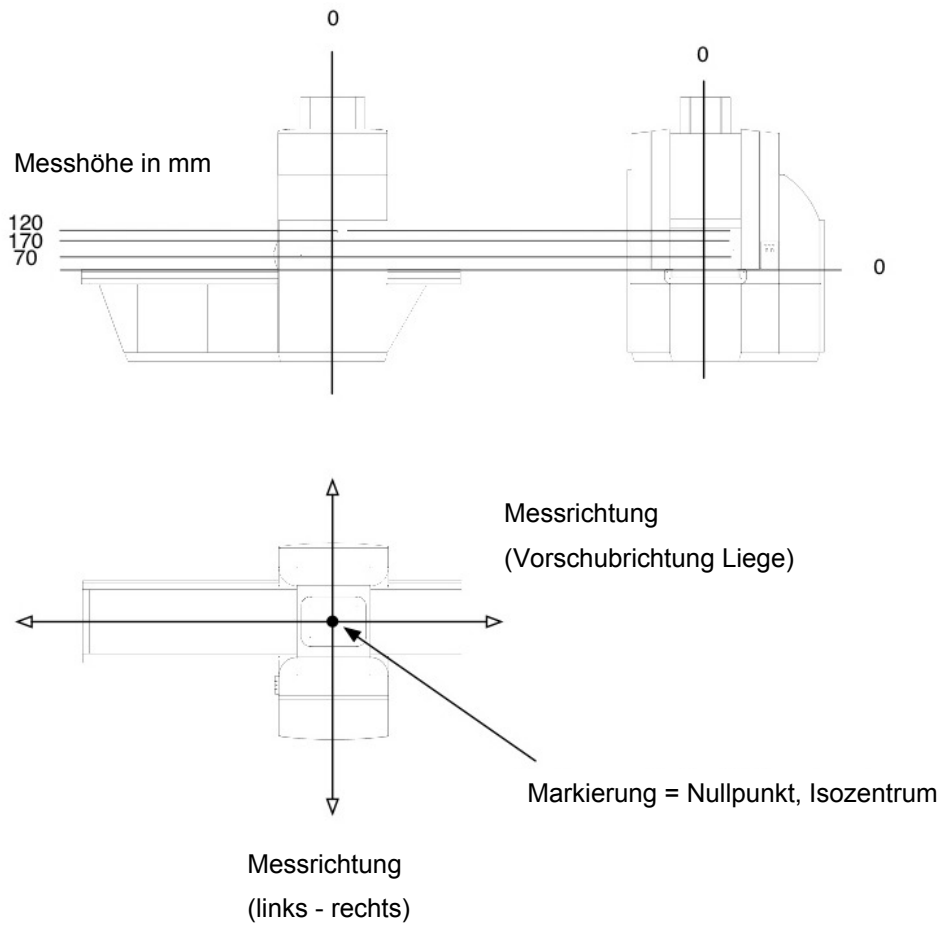
1. Feldmessung in der Therapiezone
2. Informative Feldmessung im Abstand von 10cm
3. Feldmessung im vorgegebenen Sicherheitsabstand von 1m

Nachdem der räumliche Mittelpunkt der Therapiezone mithilfe der Kalibriersonde ermittelt wurde, konnte von dem Mittelpunkt ausgehend ein  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  Raster aufgebaut werden. Als Vorlage dazu diente ein auf Papier gedrucktes Raster mit einem xy-Feld und Styroporflächen als Distanzstücke mit je 1cm Höhe. Als Auflage für die Sonde wurde eine Passform aus Styropor mit 10cm Höhe angefertigt, die auf der Oberseite eine halbkugelförmige Eintiefung aufweist und zur exakten Positionierung der Sonde diente.

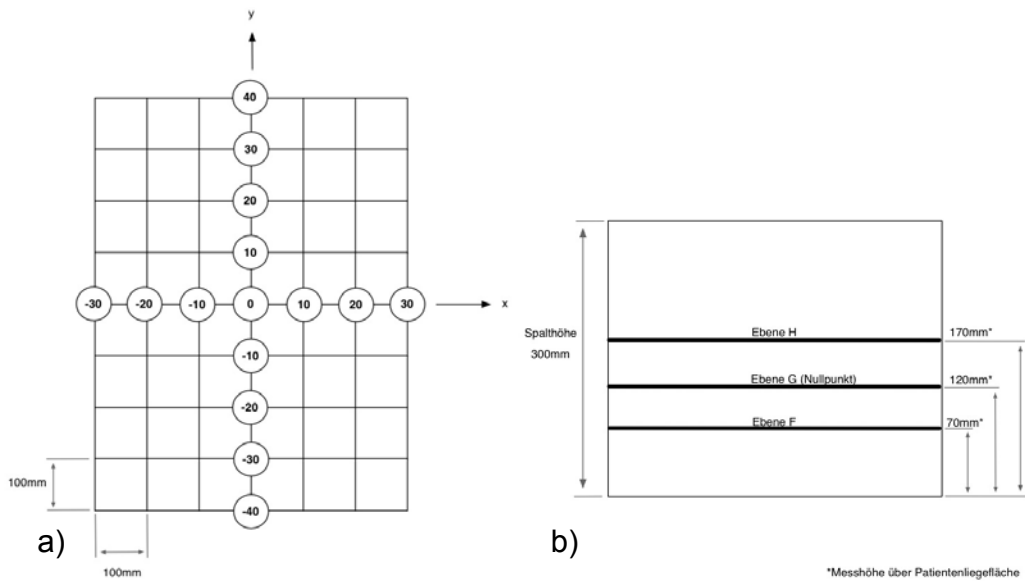
Die Höheneinteilung der Therapiezone erfolgte wie bereits bei der Kalibrierung in Ebenen, wobei diesmal durch die ermittelte homogene Zone ein 3-Ebenen-Raster (Abb. 7.1-2b) mit jeweils 15 Messpunkten ausreichte. Der Höhenabstand der drei Ebenen ist durch die begrenzte Auflösung der Sonde auf 50mm festgelegt worden.

Die einstellbare Spalthöhe betrug während der gesamten Messung 300mm.

Aus dem Messraster ergeben sich von der Markierung des Therapiezentrums (Isozentrum) zwei Messrichtungen (Abb. 7.1-1). Die Auswertung der Feldlinien in der Horizontalen sind mit der Messrichtung „links  $\diamond$  rechts“ gekennzeichnet, wobei die negativen Koordinaten der Messrichtung „links“ entsprechen. In der Vertikalen werden die Messpunkte mit „Vorschubrichtung Liege“ gekennzeichnet.



**Abb. 7.1-1:** Messrichtung und Messhöhe am Applikator



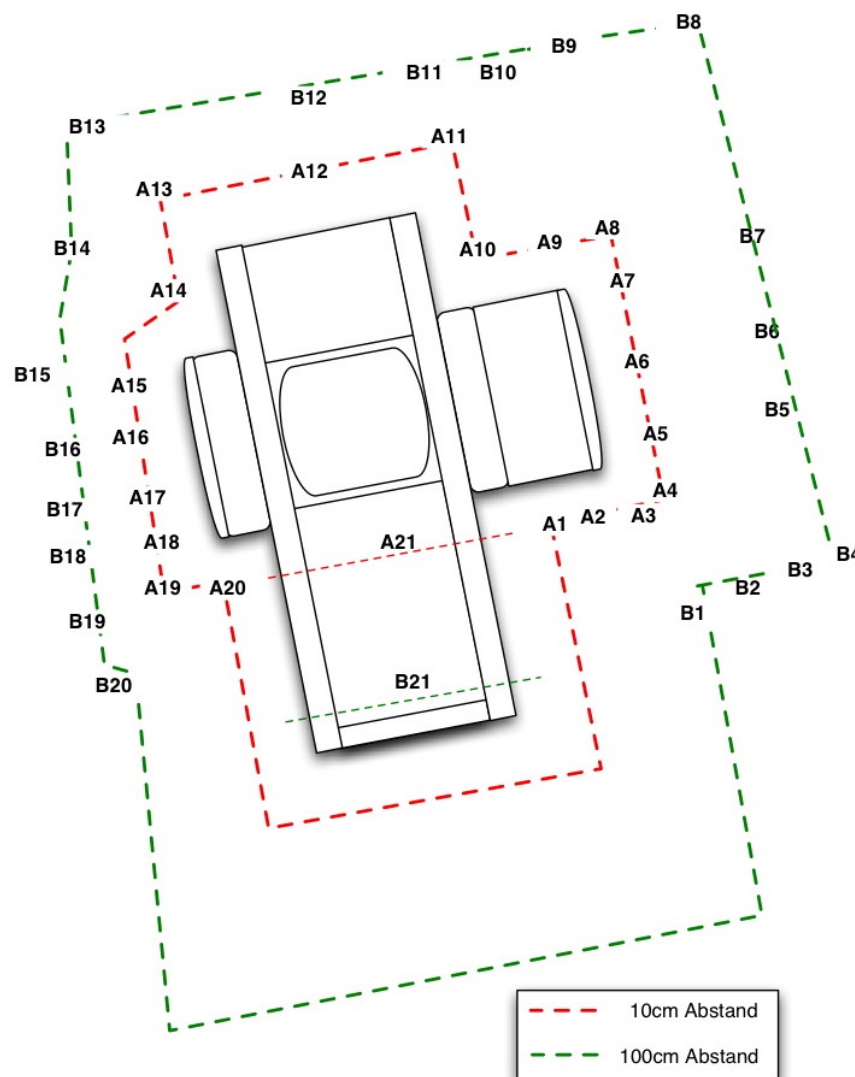
**Abb. 7.1-2:** 3-Ebenen-Raster für die Hauptmessung; a) Draufsicht, b) Seitenansicht

Für das Ausmessen der Feldstärken um den Applikator wurden zwei Messlinien ausgehend von dem Umriss (Abb. 7.1-3) des Applikators festgelegt. Die unten aufgeführte Skizze veranschaulicht die prinzipielle Verteilung der Messpunkte.

Der erste Messabstand ist mit 10cm um die Apparatur farblich markiert worden.

Hier werden Messwerte für informative Zwecke aufgenommen (Schirmwirkung des Gehäuses). Der Abstand der zweiten Messlinie wurde nach Sicherheits Gesichtspunkten festgelegt und auf dem Boden farblich markiert.

Der Abstand von 1m Meter ist gewählt worden, um die durchschnittliche Armlänge des Bedienpersonals zu überschreiten. Es wurden mithilfe des Entwicklungsingenieurs für die Umfeldmessung 21 Messpunkte (Abb. 7.1-3) festgelegt.



**Abb. 7.1-3:** Sicherheitsabstand und Messpunkte um den Feldapplikator

Die festgelegten Messpunkte um die Apparatur wurden in drei verschiedenen Höhen aufgenommen. Um die Vergleichbarkeit bzw. Reproduzierbarkeit der Messergebnisse für identische Anlagen gewährleisten zu können, sind einheitliche Messpunkthöhen über der Standfläche entsprechend den ergonomischen Maßen für Sitz- und Steharbeitsplätze verwendet worden. Diese sind:

1. 50cm (Kniehöhe)
2. 100cm (Hüfthöhe)
3. 170cm (Kopfhöhe)

Zur Platzierung der Messsonde wurde ein Holzstativ verwendet.

## 7.2 Messergebnisse: Therapiezone

Die Messergebnisse sind bei fünf unterschiedlichen Leistungsstufen (100A-500A) aufgenommen worden. Die ausführlichen Messtabellen sind im Anhang beigefügt. Der Betrag der magnetischen Feldstärke konnte aus den gemessenen xyz-Koordinaten berechnet werden. Dieser Betrag (Raumvektor) dient der grafischen Darstellung der Feldverteilung in der Therapiezone.

Messkonfiguration:

Messort: Therapiezone

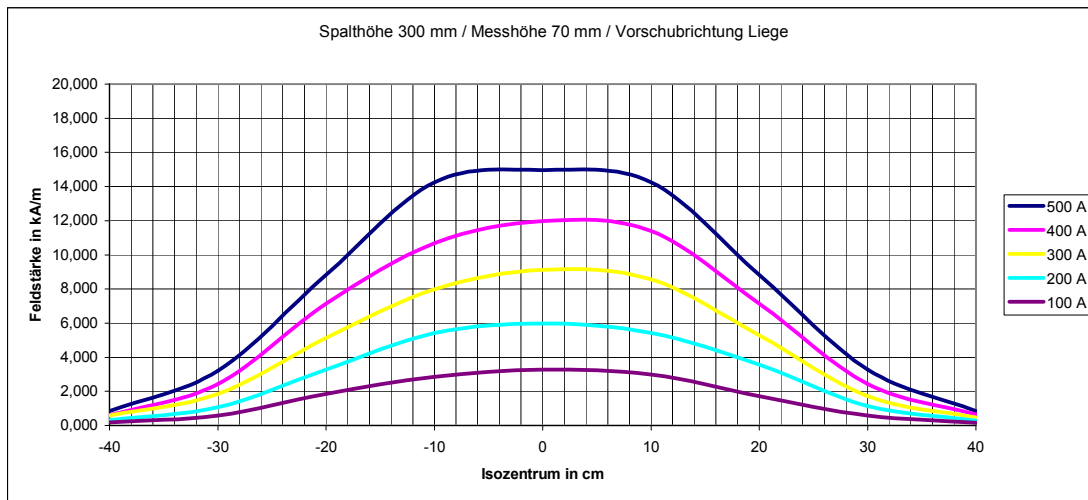
Spalthöhe: 300mm

Ebene: F (70mm)

Feldstärkenübersicht: Siehe Tabelle in Anhang E1

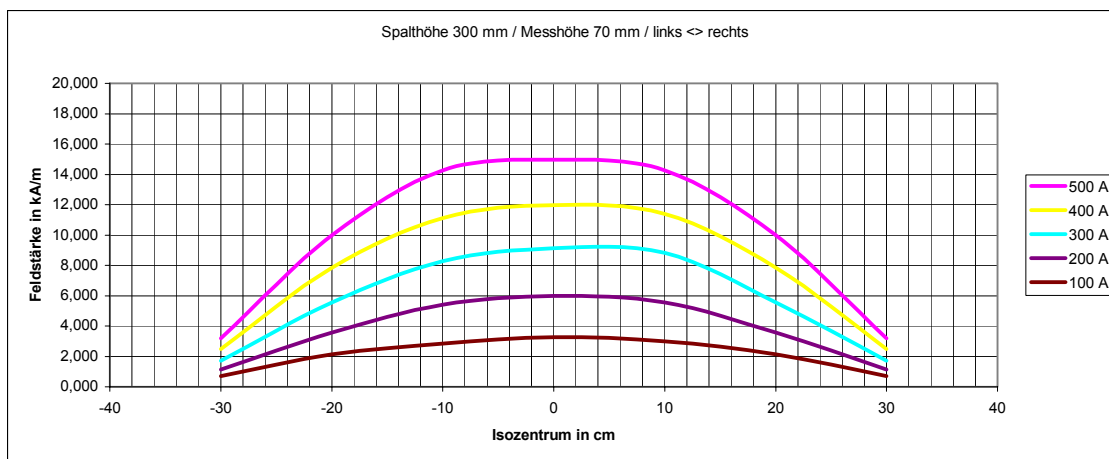
Messrichtung: Vorschubrichtung Liege

Empfindlichkeit der Sonde: 20kA/m



**Abb. 7.2-1:** Feldstärkendiagramm bei 70mm Messhöhe (Vorschubrichtung Liege)

Messrichtung: links <> rechts



**Abb. 7.2-2:** Feldstärkendiagramm bei 70mm Messhöhe (links <> rechts)

Messkonfiguration:

Messort: Therapiezone

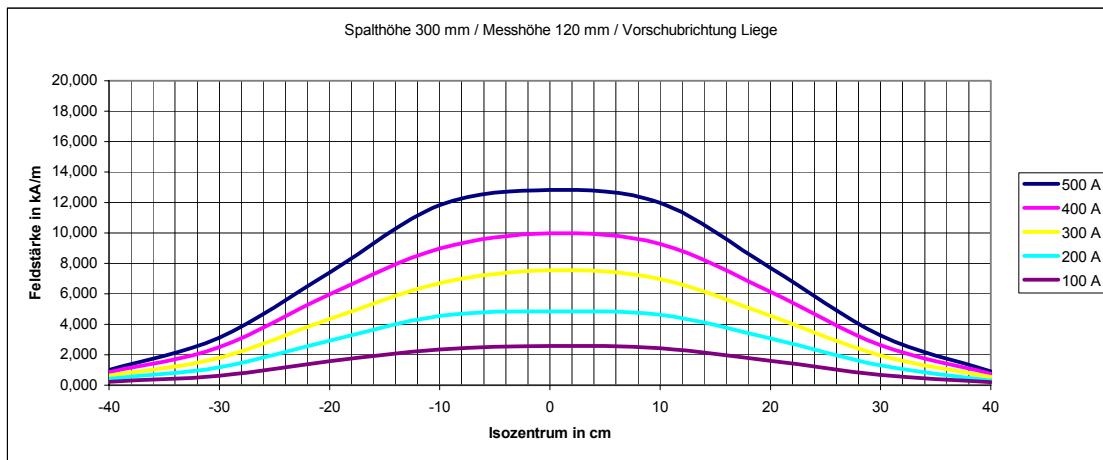
Spalthöhe: 300mm

Ebene: G (120mm)

Feldstärkenübersicht: Siehe Tabelle in Anhang E2

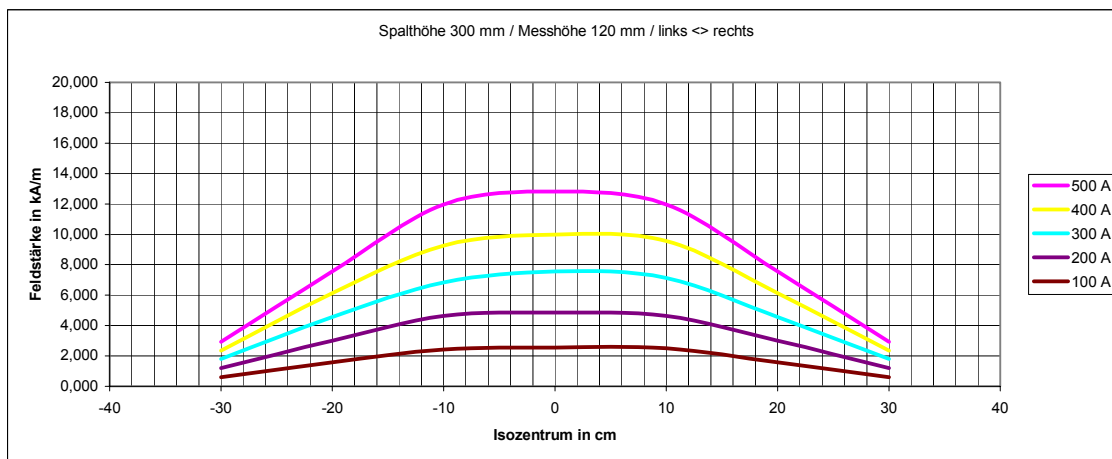
Messrichtung: Vorschubrichtung Liege

Empfindlichkeit der Sonde: 20kA/m



**Abb. 7.2-3:** Feldstärkendiagramm bei 120mm Messhöhe (Vorschubrichtung Liege)

Messrichtung: links <> rechts



**Abb. 7.2-4:** Feldstärkendiagramm bei 120mm Messhöhe (links <> rechts)

Messkonfiguration:

Messort: Therapiezone

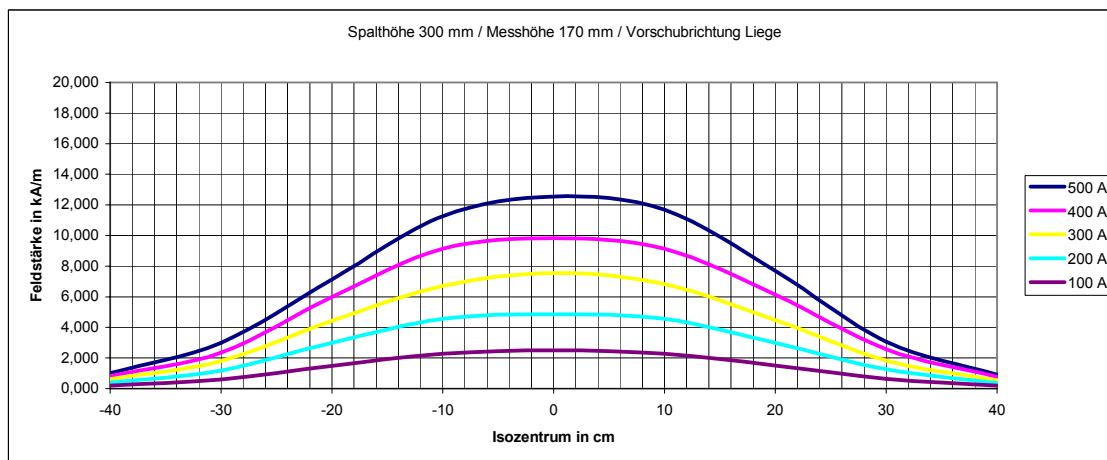
Spalthöhe: 300mm

Ebene: H (170mm)

Feldstärkenübersicht: Siehe Tabelle in Anhang E3

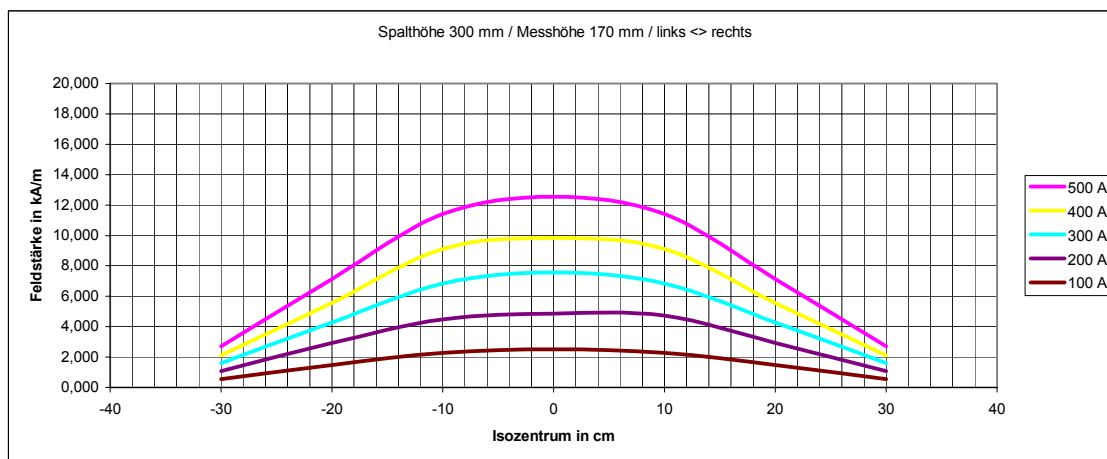
Messrichtung: Vorschubrichtung Liege

Empfindlichkeit der Sonde: 20kA/m



**Abb. 7.2-5:** Feldstärkendiagramm bei 170mm Messhöhe (Vorschubrichtung Liege)

Messrichtung: links <> rechts



**Abb. 7.2-6:** Feldstärkendiagramm bei 170mm Messhöhe (links <> rechts)

### 7.2.1 Auswertung: Therapiezone

Die Diagrammanalyse hat ergeben, dass sich bei 300mm Spalthöhe eine relativ große homogene Feldverteilung bei 70 Millimetern Messhöhe (Ebene F) befindet. Die maximal ermittelten Feldstärken (ca.15kA/m) sind ebenfalls in dieser Höhe in beiden Messlagen ermittelt worden.

Ein leichter Versatz des Maximums in Richtung der positiven Koordinaten ist durch die leicht versetzte Anordnung der Pole begründet.

Die an den Seiten abgeschnittenen Verläufe aus den Diagrammen mit der Messrichtung „links <>rechts“ sind aufgrund der Breite der Patientenliegefläche auf +30cm bzw. – 30cm ausgehend vom Isozentrum begrenzt.

Die Feldstärken und der homogene Bereich zeigen mit zunehmender Messhöhe eine kontinuierliche Abnahme, sodass bei 100mm Höhenunterschied ein Abfall von 2,5kA/m vom Maximalwert gemessen werden konnte. Die Achsensymmetrie der Feldlinienverteilung ist ein zusätzlicher Beweis für das Isozentrum, das mithilfe der Kalibriermessung ermittelt wurde.

Der Verlauf der Feldlinienverteilung zeigt das prinzipielle Verhalten bei Aussteuerungen im Bereich zwischen 100A–500A, sodass bei empfindlichen Patienten die Intensität der Feldstärke reduziert werden kann bzw. dafür die Dauer der Einwirkung der Feldexposition erhöht wird.

Die dabei berücksichtigten Messhöhen sind aus Empfehlungen vom Bedienpersonal und Entwicklungsingenieur hervorgegangen. Auf Wunsch des Entwicklers sind zusätzlich Messwerte für informative Zwecke bei unterschiedlichen Spalthöhen aufgenommen worden aber hier nicht dokumentiert.

### 7.3 Messergebnisse: Applikator- Umfeldmessung

#### Messkonfiguration:

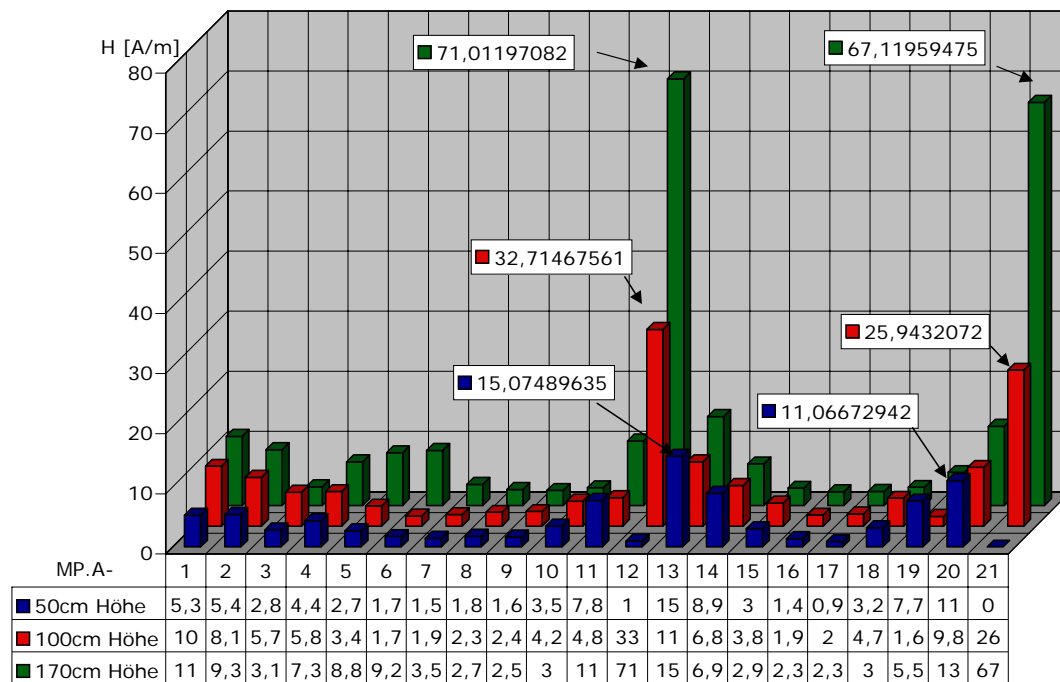
Messort: Applikator- Umfeld

Messzone: A (Abstand bei 10cm)

Messhöhen: 50cm (Kniehöhe), 100cm (Hüfthöhe), 170cm (Kopfhöhe)

Gemessene Feldstärken: Siehe Tabellen in Anhang F1, F2, F3

Messsonde: 200A/m-Sonde



**Abb. 7.3-1:** H-Feldmessung im Applikator-Umfeld (10cm Abstand)

Messkonfiguration:

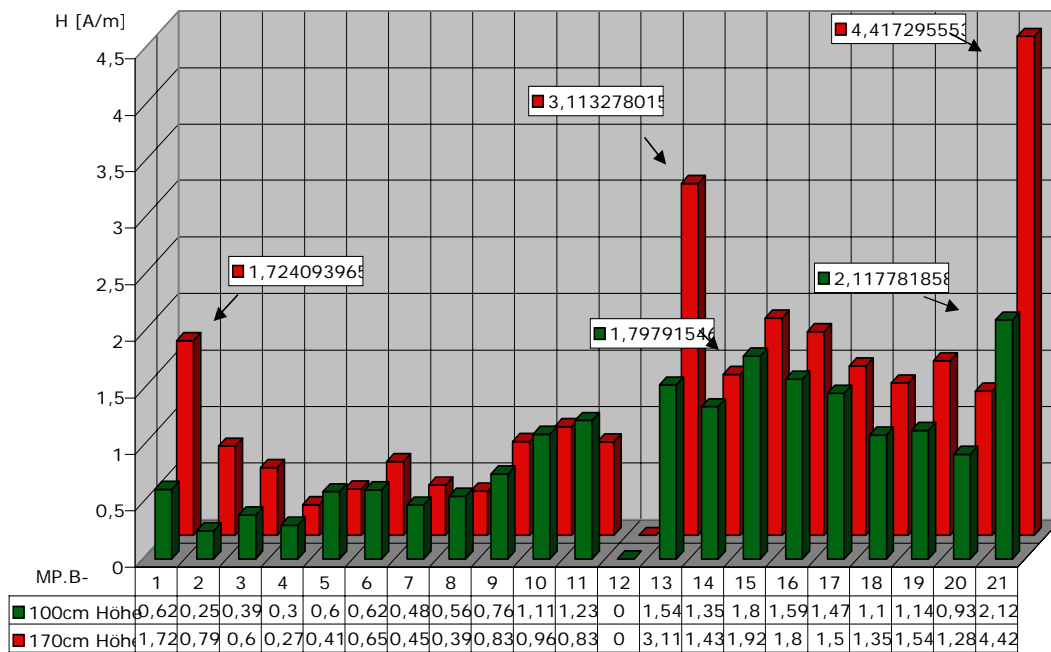
Messort: Applikator- Umfeld

Messzone: B (Abstand bei 100cm)

Messhöhen: 100cm (Hüfthöhe), 170cm (Kopfhöhe)

Gemessene Feldstärken: Siehe Tabellen in Anhang F4, F5

Messsonde: 200A/m-Sonde



**Abb. 7.3-2:** H-Feldmessung im Applikator-Umfeld (100cm Abstand)

7.3.1 Auswertung: Applikator-Umfeldmessung

Die Umfeldmessung diente neben der Überprüfung der sicherheitsrelevanten Abstände auch zum Vergleich der außerhalb der Apparatur auftretenden Feldstärken mit denen im Innern der Therapiezone.

Die Auswertung ergab ein sehr niedriges Streufeld um die Maschine herum. Die aufgenommenen Messwerte sind an den festgelegten Messpunkten aus Kapitel 7.1 (Abb. 7.1-3) aufgenommen worden. Die Diagramme in den Abbildungen 7.3-1 und 7.3-2 zeigen die Feldstärkenverteilung längs des Umfangs des Applikators. Die hierbei maximal auftretenden Feldstärken variieren je nach Messhöhe und Messabstand zwischen  $0,25A/m$  und  $71A/m$ . Bei jeder der drei Messhöhen fallen insbesondere zwei Maximalwerte auf. Zum einen fehlt an diesen Stellen die Schirmwirkung zum zentralen Joch hin, aufgrund der Verwendung von Abdeckplatten aus Kunststoff, und zum anderen liegen diese in unmittelbarer Nähe zum Luftspalt (Therapiezone). Zur Veranschaulichung der Bauweise der MFH-Anlage liegen im Anhang (siehe Anhang G) technische Zeichnungen bei.

Abgesehen von den markierten Messpunkten in den Abbildungen 7.3-1 und 7.3-2 liegen die mittleren Feldstärken in Zone A für 50cm Höhe bei  $3,6A/m$ , für 100cm Höhe bei etwa  $4,8A/m$  und für 170cm Höhe bei  $6,8A/m$ . Der Messwert am MP.A-21 bei 50cm Höhe konnte aus konstruktionsbedingten Gründen nicht aufgenommen werden (unterhalb der Patientenliegefläche).

Das in Abbildung 7.3-2 dargestellte Diagramm ist in erster Linie durch eine einseitige Feldexposition gekennzeichnet. Zwar sind die maximal auftretenden Feldstärken an den zu erwartenden Stellen gemessen worden, jedoch unterscheiden sich die Messwerte auf der linken Flügelseite um bis zu dreifach höhere Feldstärken von denen auf der rechten. Die Begründung hierzu liegt in der Messvorbereitung, denn ein Abstand von 100cm konnte durch die Platzierung der Anlage im Behandlungsraum nicht eingehalten werden.

Betrachtet man den Gesamtverlauf der auftretenden Feldstärken längs um den Applikator, so ergibt sich abzüglich der beiden Maximalfeldstärken ein Mittelwert für Zone B für 100cm Höhe und für 170cm Höhe von etwa  $1,0A/m$ .

Der Messpunkt an der Stelle MP.B-12 konnte, bedingt durch die Lage der Apparatur im Raum, nicht den Abstand von 100cm einhalten und wurde demnach nicht gemessen. Besonders auffallend an der Messung in Zone A sind die relativ geringen Feldstärkebeträge, die bereits in einem Abstand von 10cm sehr niedrig waren.

## 7.4 Gesamtauswertung der Messung

Die Ausführung der Messungen erbrachte nicht nur den Beweis der Funktionalität des Messgerätes und der Sonden, sondern trug auch dazu bei, neue wissenschaftliche Erkenntnisse über die MFH-Anlage zu erlangen. Mithilfe einiger technischer Angaben über die Feldquelle (Frequenzen, Generatorleistung, Strahlungseigenschaften) vom Betreiber konnte die Messung gründlich vorbereitet und ausgeführt werden.

Bisherige Methoden zur Feldstärkenermittlung nutzten theoretische Vorgehensweisen, die Feldstärken in der Therapiezone zu ermitteln.

Aufgrund der sehr geringen Exposition im Nahfeld kam die dritte Sonde mit 2kA/m-Empfindlichkeit nicht zum Einsatz. Die Begründung hierzu liegt in der Gesetzmäßigkeit (Gl. 36) des Nahfeldes (*FRESNEL* Region). Demnach nimmt die Magnetfeldstärke mit der dritten Potenz mit der Entfernungsänderung ab.

$$\frac{1}{(r)^3} \quad (36)$$

Aus der Arbeitsfrequenz des Applikators folgt, dass das Nahfeld erst bei etwa 500m Abstand in den Übergangsbereich zum Fernfeld übergeht. Der Messabstand von 100cm impliziert daraus den tatsächlichen Aufenthalt im Nahfeld. (Gl. 37)

$$\text{Messradius im Verhältnis zum Nahfeldradius: } r \ll \frac{\lambda}{(2\pi)} \Rightarrow 1 \ll 500\text{m} \quad (37)$$

Im Umfeld um den Luftspalt herum wurden einige informative, nicht dokumentierte Messungen mit der 2kA/m-Sonde durchgeführt, um die Funktion auch dieser Sonde zu überprüfen.

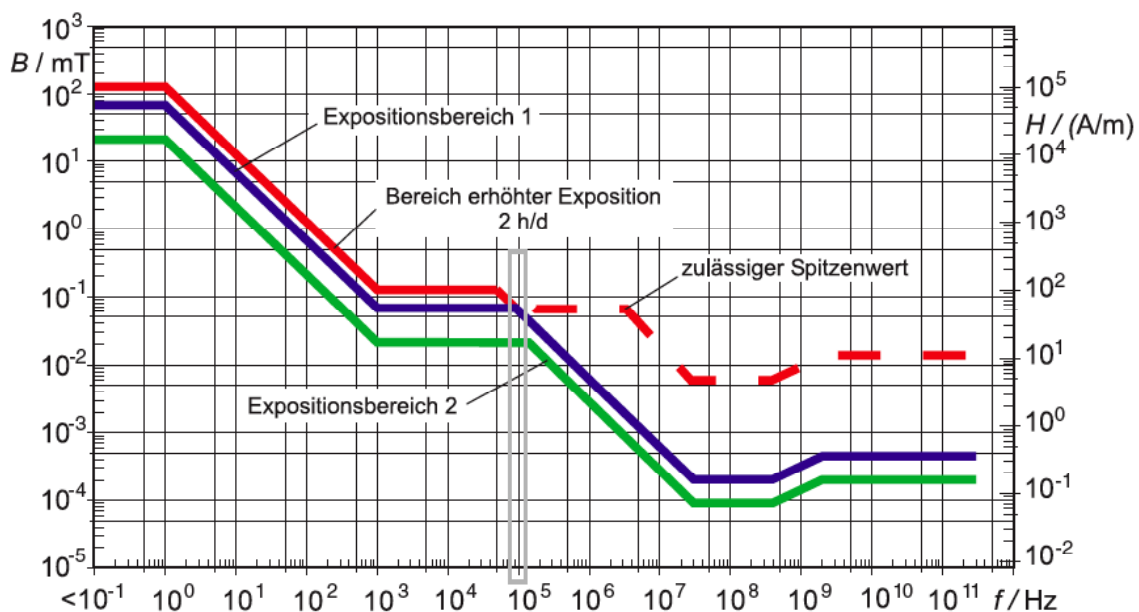
Die Expositionsbereiche, die aus der Definition der „Berufsgenossenschaft für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit - BGV B11“ hervorgehen (siehe Anhang A) bestimmen die zulässigen Grenzwerte für elektromagnetische Felder.

Der Grundgedanke der Vorschrift ist die Einführung eines Schutzzonenkonzeptes im Rahmen einer vom Unternehmer durchzuführenden Gefährdungsbeurteilung.

Der Unternehmer muss EM-Felder ermitteln und die Exposition von Beschäftigten beurteilen.

Unter der Berücksichtigung, dass die zulässige Aufenthaltsdauer des Bedienpersonals den Expositionsbereich 1 nicht überschreitet, liegen die gemessenen Werte unterhalb der zulässigen Grenzwerte. Die Kontrolle der Aufenthaltsdauer im Expositionsbereich 1 erfolgt durch Lichtschranken, die bei einer Dauerexposition bzw. Überschreitung der zulässigen 6 Minuten das Bedienpersonal alarmieren. Die Festlegung der maximal zulässigen Dauerexposition von 6 Minuten basiert auf der Thermoregulation des Körpers.

Das in Abbildung 7.4-1 dargestellte Diagramm zeigt die zulässigen Werte der magnetischen Flussdichte bzw. magnetischen Feldstärke in den Expositionsbereichen 1 und 2 sowie den Bereich erhöhter Exposition.



**Abb. 7.4-1:** BGV B11-Grenzwerte für Expositionsbereiche 1 und 2

Die Umfeldmessung hat die Sicherheitsvorkehrungen dieser medizinischen Einrichtung in Bezug auf Sicherheitsabstand und Grenzwerteinhalten laut BGV B11 bestätigt.

Die BGV B11 gilt nicht für die Exposition von Patienten bei gewollter Einwirkung von EM-Feldern und sie gilt nicht, soweit die 26. BImSchV zur Anwendung kommt.

Die Messungen sind bei der maximal möglichen Leistung durchgeführt und am unbesetzten Arbeitsplatz aufgenommen worden.

Zusätzlich zu den durchgeführten Messkonfigurationen sind auch Feldstärkenverläufe mit Spalthöhen von 210mm und 250mm aufgezeichnet worden, aus denen hervorging, dass eine Spitzenfeldstärke von bis zu 18,244kA/m erzeugt werden konnte.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Magnetische Wechselfelder finden unter anderem ihre Anwendung in der interstitiellen Hyperthermie-Behandlung. Im Gegensatz zu der kontrollierten Feld-Exposition ist es notwendig, auch den Umgebungsbereich (Streufeld) zu identifizieren und zu lokalisieren. Unter Einhaltung der Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV und der BGV 11 – liegen die gemessenen Feldstärken für die verschiedenen Expositionsbereiche weit unter den erforderlichen Grenzwerten.

Das dazu verwendete Messgerät wurde speziell den Anforderungen des Prüflings angepasst.

Die Herstellung eines H-Feld-Messgerätes setzt ein Konzept voraus, das neben grundlegenden Kenntnissen der theoretischen Elektrotechnik auch die Sammlung von empirischen Erfahrungen im Bereich der Feldmessung beinhalten sollte.

Der Entwicklungspfad ist durch zwischenzeitliche Überprüfungen bei der Umsetzung der theoretischen Überlegungen durch Kontrollschleifen realisiert worden.

Insbesondere die Entwicklung der drei Sonden erfordert Präzision bei der Fertigung, deren Qualität am Ende der Messung durch den daraus resultierenden Messfehler bewertet wird.

Während der Durchführung der Messung ist aufgefallen, dass durch die bedingte Messmethode mehrere Stunden zum Messen benötigt werden, um eine dichte Feldlinienverteilung abbilden zu können.

Eine Verbesserung der Messmethodik könnte durch eine Digitalisierung der Messwertaufnahme nicht nur den zeitlichen Aufwand verringern, sondern die Weiterverarbeitung durch eine geeignete Schnittstelle an einem Terminal erleichtern.

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.2-1: Elektrische und magnetische Feldkomponente im Nah- und Fernfeld.....	10
Abb. 2.2-2: Magnetische Feldlinien .....	11
Abb. 2.2-3: Durchflutung.....	12
Abb. 2.2-4: Permeabilität .....	14
Abb. 2.2-5: Spannung in einer Leiterschleife .....	16
Abb. 2.3-1: EMV-Beeinflussungsmodell.....	19
Abb. 2.3-2: EMV-Kopplungsmechanismen .....	20
Abb. 2.3-3: Galvanische Kopplung: a) Entstehung b) Eliminierung .....	21
Abb. 2.3-4: Elektrische Kopplung zweier Stromkreise .....	23
Abb. 2.3-5: Verringerung der kapazitiven Kopplung durch einen geerdeten Schirm.....	24
Abb. 2.3-6: Beispiel für die magnetische Kopplung zweier Stromkreise.....	25
Abb. 4.1-1: Schematische Darstellung einer allgemeinen Messkette.....	31
Abb. 4.2-1: Sensor als erstes Glied einer Messkette .....	33
Abb. 4.2-2: Schematischer Aufbau des Messgerätes .....	35
Abb. 4.3-1: ESB des Messempfängers .....	37
Abb. 4.4-1: Präzisions-Vollweg-Gleichrichter mit geerdetem Ausgang .....	38
Abb. 4.4-2: Spannungsverlauf bei sinusförmiger Eingangsspannung .....	40
Abb. 4.4-3: Übertragungskennlinie des OPV : LF412 .....	42
Abb. 4.4-4: Zwangssymmetrisierung am Messeingang .....	43
Abb. 4.4-5: Ansteuerung der LCD-Messeingänge; a) Voltmeter, b) Multi-Voltmeter .....	46
Abb. 4.4-6: PIN-Belegung der LCD-Einheit (Typ HED281/DPM951) .....	47
Abb. 4.4-7: Schaltung der Dezimalpunktsteuerung.....	48
Abb. 4.4-8: Beispiele für die Dezimalpunktsteuerung: a) 199,9 ; b) 1,999.....	48
Abb. 4.5-1: Gleichrichtergehäuse.....	49
Abb. 4.5-2: Gleichrichter-Einheit.....	50
Abb. 4.5-3: a) Sondenadapter, b) SUB-D-Schnittstelle am Sondenadapter .....	51
Abb. 4.5-4: a) SUB-D-Pinbelegung, b) PG-Kabelverschraubungen .....	51
Abb. 4.5-5: Gehäuse: a) Frontansicht, außen; b) Frontansicht, innen; c) Rückansicht, innen .....	52
Abb. 4.5-6: LCD-Einheit: a) LCD-Gehäusebefestigung b) Silber besprüht und verschraubt.....	52
Abb. 4.5-7: Zusammengesetztes Messgerät (Innenansicht).....	53
Abb. 4.5-8: SUB-D-Schnittstelle: a) SUB- D-Kupplung, b) Pin-Nummerierung der Schnittstelle.....	54
Abb. 4.5-9: Pin-Belegungsplan an der Messgerätschnittstelle.....	55
Abb. 4.5-10: Ansicht des Messgerätes: a) Messgerät Frontansicht b) M. Rückansicht.....	56

Abb. 5.1-1: Materialbelastungstest mit vier Prüflingen .....	58
Abb. 5.1-2: Bildausschnitt: Erkennbare Materialabnutzung durch thermische Belastung .....	59
Abb. 5.2-1: Rahmenantennen aus vier kurzen Leiterstücken (prinzipieller Aufbau) .....	60
Abb. 5.2-2: Entwicklung einer magnetischen Rahmenantenne .....	61
Abb. 5.2-3: Berechnung der Rahmenlänge bei $U_0 = 10V$ .....	63
Abb. 5.2-4: Sonde mit orthogonaler Spulenanordnung .....	64
Abb. 5.2-5: Vektorkomponenten der magnetischen Ersatzfeldstärke .....	65
Abb. 5.3-1: Herstellung der Sonde .....	66
Abb. 5.3-3: a) Wickelkörper aus Polyurethan b) gewickelte Sonden c) Sondenvergleich .....	68
Abb. 5.3-4: Verstärkte Würfelkante .....	68
Abb. 5.3-5: Isotropiemessung (Sonde in Horizontalstellung), Aussteuerung bei $I = 110A$ .....	69
Abb. 5.3-6: Isotropiemessung (Sonde in Vertikalstellung), Aussteuerung bei $I = 110A$ .....	70
Abb. 5.3-7: Sondenadapter: a) Sondengehäuse, b) Sondenmodul, c) Sondenleitungen .....	71
Abb. 5.3-8: H-Feld-Sonden für 100kHz, a) 200A/m , b) 2kA/m, c) 20kA/m .....	72
Abb. 6.1-1: Kalibriersonde .....	73
Abb. 6.1-2: 5-Ebenen-Kalibrier-Raster, a) Draufsicht, b) Frontansicht .....	75
Abb. 6.3-1: Drahtdurchmesser im Unterschied .....	77
Abb. 6.3-2: Flächenverhältnis bei unterschiedlichen Radien .....	78
Abb. 6.3-3: Berechnung der möglichen Abweichung .....	79
Abb. 6.3-4: Leitungsverluste der Rahmenspule .....	80
Abb. 6.3-5: Spule mit Eigenkapazität und deren dielektrischen Verlusten .....	81
Abb. 7.1-1: Messrichtung und Messhöhe am Applikator .....	83
Abb. 7.1-2: 3-Ebenen-Raster für die Hauptmessung; a) Draufsicht, b) Seitenansicht .....	83
Abb. 7.1-3: Sicherheitsabstand und Messpunkte um den Feldapplikator .....	84
Abb. 7.2-1: Feldstärkendiagramm bei 70mm Messhöhe (Vorschubrichtung Liege) .....	86
Abb. 7.2-2: Feldstärkendiagramm bei 70mm Messhöhe (links <->rechts) .....	86
Abb. 7.2-3: Feldstärkendiagramm bei 120mm Messhöhe (Vorschubrichtung Liege) .....	87
Abb. 7.2-4: Feldstärkendiagramm bei 120mm Messhöhe (links <->rechts) .....	87
Abb. 7.2-5: Feldstärkendiagramm bei 170mm Messhöhe (Vorschubrichtung Liege) .....	88
Abb. 7.2-6: Feldstärkendiagramm bei 170mm Messhöhe (links <->rechts) .....	88
Abb. 7.3-1: H-Feldmessung im Applikator-Umfeld (10cm Abstand) .....	90
Abb. 7.3-2: H-Feldmessung im Applikator-Umfeld (100cm Abstand) .....	91
Abb. 7.4-1: BGV B11-Grenzwerte für Expositionsbereiche 1 und 2 .....	94

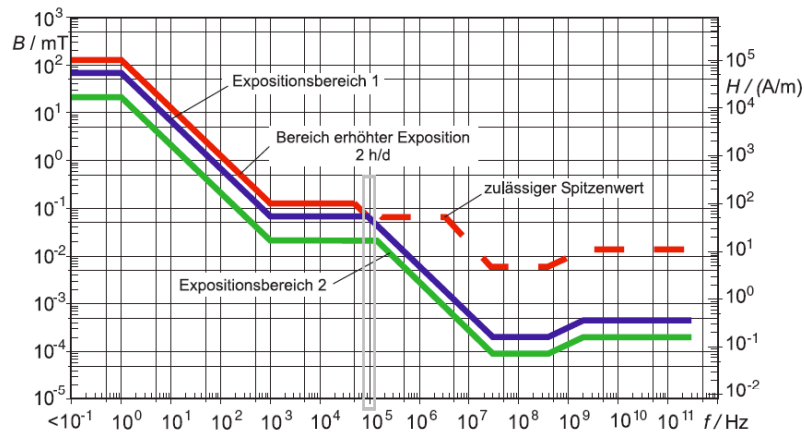
## Literaturverzeichnis

- [1] Andreas Jordan, Regina Scholz, Peter Wust, Hermann Schirra, Thomas Schiestel Helmut Schmidt, Roland Felix: *Endoctosis of dextran and silan-coated magnetite nanoparticles and the effect of intracellular hyperthermia on human mammary carcinoma cells in vitro*; Journal of magnetism and magnetic materials; Berlin 1999
- [2] Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Wunsch, Dr. sc. techn. Hans-Georg Schulz: *Elektromagnetische Felder*, 1. Auflage, VEB Verlag Technik;; Berlin 1989
- [3] A. Schwab: *Elektromagnetische Verträglichkeit*, 4. Auflage, Springer Verlag; Berlin 1996
- [4] Prof. Dr.-Ing. W. Wiesbeck: *Antennen und Antennensysteme*, Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik; Karlsruhe 2002
- [5] Prof. Ermel: *EMV-Skript Einführung und Grundbegriffe*; Berlin 1999
- [6] *Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten (EMVG)*; EMV-Zentrum Berlin-Brandenburg e.V.; Berlin 1998
- [7] Klaus Beuth, Wolfgang Schmusch: *Grundsaltungen*, Elektronik 3; 7. Auflage, Vogel Buchverlag; Würzburg 1985
- [8] Rudolf Mäusl: *Hochfrequenzmesstechnik, Messverfahren und Messgeräte*; Dr. Alfred Hüthig Verlag; Heidelberg 1974
- [9] Karl Rothammel, Franckh-Kosmos: *Antennenbuch*; 10. Auflage, Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co.; Stuttgart 1991
- [10] U. Tietze, Ch. Schenk: *Halbleiter-Schaltungstechnik*, 6. Auflage, Springer-Verlag; Berlin 1983
- [11] Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Seifart: *Analoge Schaltungen*; 5. Auflage, VEB Verlag Technik; Berlin 1996
- [12] Horst Czichos: *Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften*; Hütte, 29. Auflage, Springer-Verlag; Berlin 1989
- [13] Bert Hildebrandt, Beate Rau, Johanna Gellermann, Thoralf Kerner: *Lokoregionale Hyperthermie: Standards und neue Entwicklungen*; Springer-Verlag; Wien 2004
- [14] Isidor Straus, Curtis Straus LLC: *Conformity, Magnetic Field Calibration: Unwinding The Helmholtz Coil*; Littleton, MA, 2002
- [15] John D. Kraus: *Antennas*, Second Edition, McGraw-Hill Book Company, 1988

- [16] Prof. Dr.-Ing. Franz X. Eder, *Moderne Messmethoden der Physik*, Teil 3 Elektrophysik, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften; Berlin 1972
- [17] Wolfgang Kemmer, *Die neue Elektrosmog-Verordnung, Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes* (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV vom 16. Dezember 1996, H. Hoffmann GmbH Verlag; Berlin 1997
- [18] Berufsgenossenschaftliche Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit; BGV B11 (VBG25); BG-Vorschrift; *Unfallverhütungsvorschrift – Elektromagnetische Felder*, Juni 2001
- [19] Edmund Stirner: *Antennen*, Band 2: Praxis; 2. Auflage, Dr. Alfred Hüthig Verlag; Heidelberg 1986

## Anhang A

### BGV-B11-Grenzwerte:



Zulässige Werte der magnetischen Flussdichte in den Expositionsbereichen 1 und 2 sowie im Bereich erhöhter Exposition

Definition der Expositionsbereiche laut BGV B11:

Erstes Kapitel  
Geltungsbereich  
§ 1  
Geltungsbereich

- (1) Diese Unfallverhütungsvorschrift gilt, soweit Versicherte elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Feldern, im folgenden EM-Felder genannt, im Frequenzbereich 0 Hz bis 300 GHz unmittelbar oder deren mittelbaren Wirkungen ausgesetzt sind.
- (2) Diese Unfallverhütungsvorschrift gilt nicht für die Exposition von Patienten bei gewollter medizinischer Einwirkung von EM-Feldern.
- (3) Diese Unfallverhütungsvorschrift gilt nicht, soweit die Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetz (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV) zur Anwendung kommt.

Zweites Kapitel  
Begriffsbestimmungen  
§ 2  
Begriffsbestimmungen

5. Expositionsbereich 2 ist der Bereich, der alle Bereiche des Unternehmens umfasst, sofern sie nicht dem Expositionsbereich 1, dem Bereich erhöhter Exposition oder dem Gefahrenbereich (siehe Nummern 6 bis 8) zuzuordnen sind.
6. Expositionsbereich 1 ist der Bereich, der kontrollierte Bereiche sowie Bereiche umfasst, in denen aufgrund der Betriebsweise oder aufgrund der Aufenthaltsdauer sichergestellt ist, dass eine Exposition oberhalb der zulässigen Werte von Expositionsbereich 2 nur vorübergehend erfolgt.
7. Bereich erhöhter Exposition ist ein kontrollierter Bereich, in dem die Werte des Expositionsbereiches 1 überschritten werden.
8. Gefahrenbereich ist ein kontrollierter Bereich, in dem die Werte für Bereiche erhöhter Exposition überschritten werden.

## Anhang B

Geräteliste:

Verwendete Mess- und Prüfmittel

Inv.-Nr	Gerätetyp	Bezeichnung	Hersteller	Seriennr.
50068	Labornetzteil	GP035-10	Takasago	9609008
50138	Speicheroszilloskop 0,5 GHz	9350 CL	LeCroy	13023
50121	NF-Generator	SPN	R&S	881625/005
50122	RLC-Meßbrücke	VideoBridge 2000	ESI	
x50125	Digitalvoltmeter	3456 A	HP	2825A-20387

## Anhang C

### Stückliste:

#### Präzisionsgleichrichterschaltung:

R1	= 11k Toleranz +/- 0,1%
R2	= 22k Toleranz +/- 0,1%
OP1	= LF412 National Semiconductor
OP2	= LF412 National Semiconductor
D1	= 1N4148
D2	= 1N4148
C	= 220n/60V FKC

#### Gesamtschaltung:

R1	= 10k Toleranz +/- 1%, Metallschichtwiderstand
R2	= 10k Toleranz +/- 1%, Metallschichtwiderstand
R3	= 5k6 Toleranz +/- 1%, Metallschichtwiderstand
R4	= 10k Toleranz +/- 1%, Metallschichtwiderstand
R5	= 10k Toleranz +/- 1%, Metallschichtwiderstand
R6	= 5k6 Toleranz +/- 1%, Metallschichtwiderstand
R7	= 10k Toleranz +/- 1%, Metallschichtwiderstand
R8	= 10k Toleranz +/- 1%, Metallschichtwiderstand
R9	= 5k6 Toleranz +/- 1%, Metallschichtwiderstand
R10	= 1M Toleranz +/- 1%, Metallschichtwiderstand
R11	= 1M Toleranz +/- 1%, Metallschichtwiderstand
R12	= 1M Toleranz +/- 1%, Metallschichtwiderstand
R13	= 33k Toleranz +/- 1%, Metallschichtwiderstand
R14	= 33k Toleranz +/- 1%, Metallschichtwiderstand
R15	= 33k Toleranz +/- 1%, Metallschichtwiderstand

P1	= 10k Spindeltrimmer Herst. PREH
P2	= 10k Spindeltrimmer Herst. PREH
P3	= 10k Spindeltrimmer Herst. PREH

D1	= 1N4148
D2	= 1N4148
D3	= 1N4148
D4	= 1N4148

S4	= Schließer, Ein-/Ausschalter
S1,S2,S3	= Drehschalter mit 4 Schalterstellungen (davon 3 genutzt) und 3 Schaltebenen

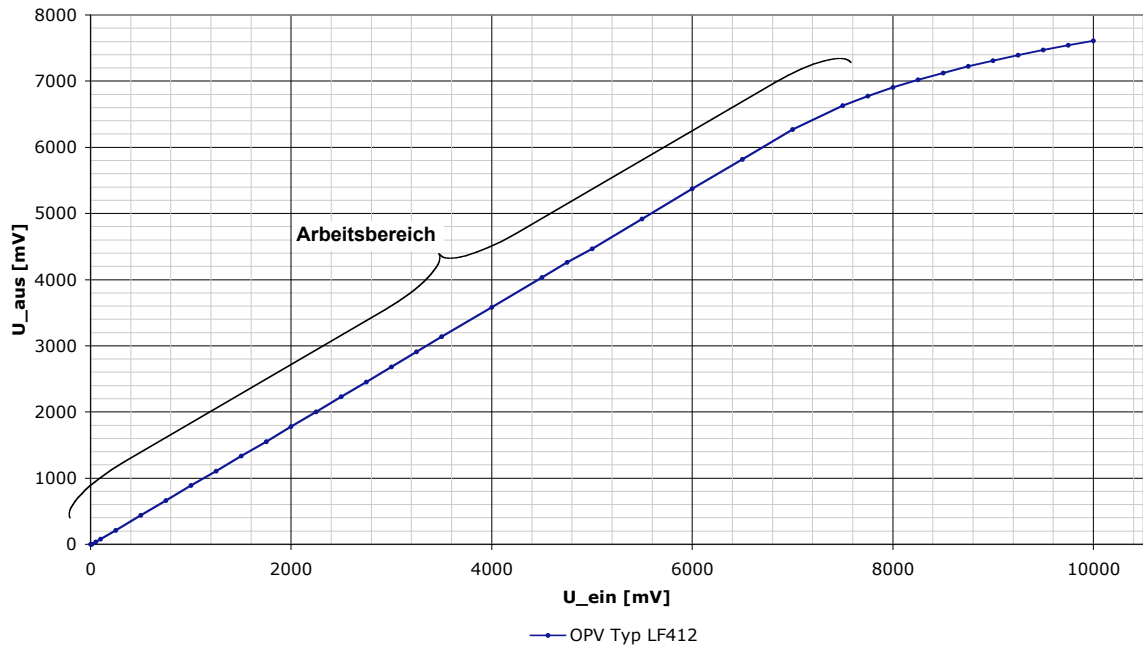
Bat	= 6V (4x1,5V AA)
LCD	= Panel Mount Digital Multimeter- HED281/DPM951
DC/DC	= HN 2 Watt Ultra- Miniatur SIL-Modul-Serie
Relais	= DR/ SDS-DR 24V

#### Schnittstelle:

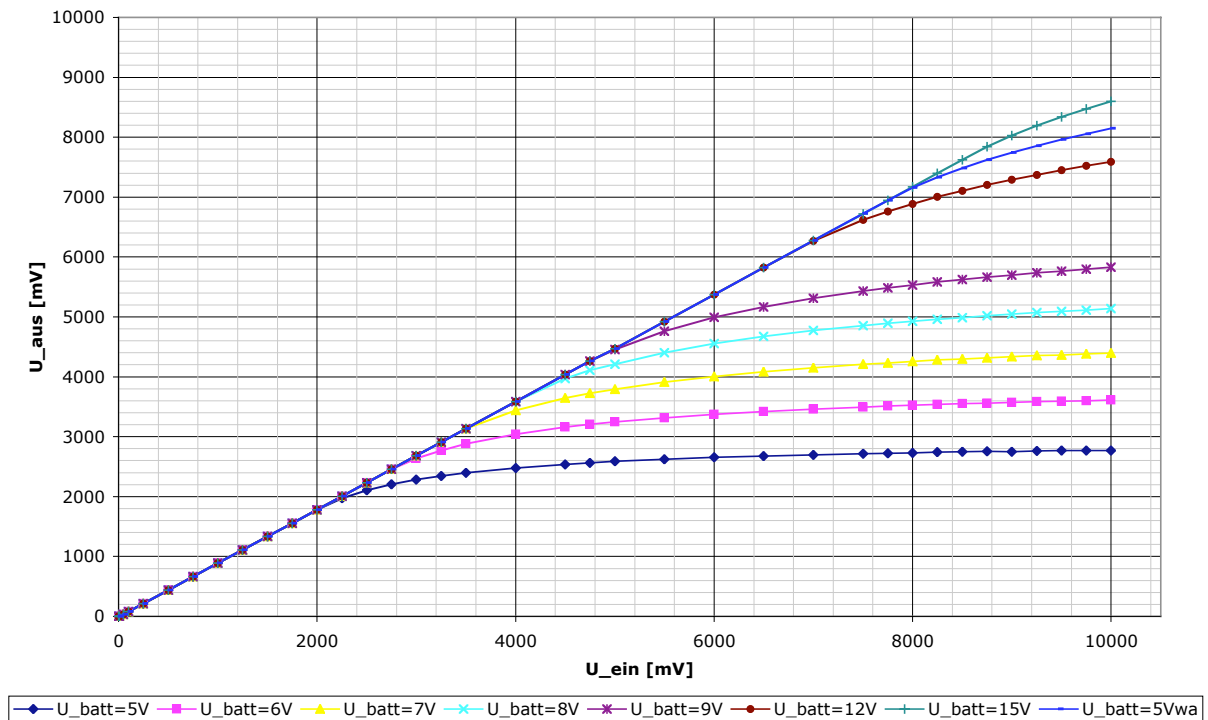
3xSUB-D, davon 2xKupplung und 1xStecker  
1xVerbindungskabel (1,5m) mit 1xStecker und 1xKupplung (1:1 Verbindung)

## Anhang D1

Übertragungsverhalten des Präzisionsgleichrichters  
Bereich: 1mV..10V.

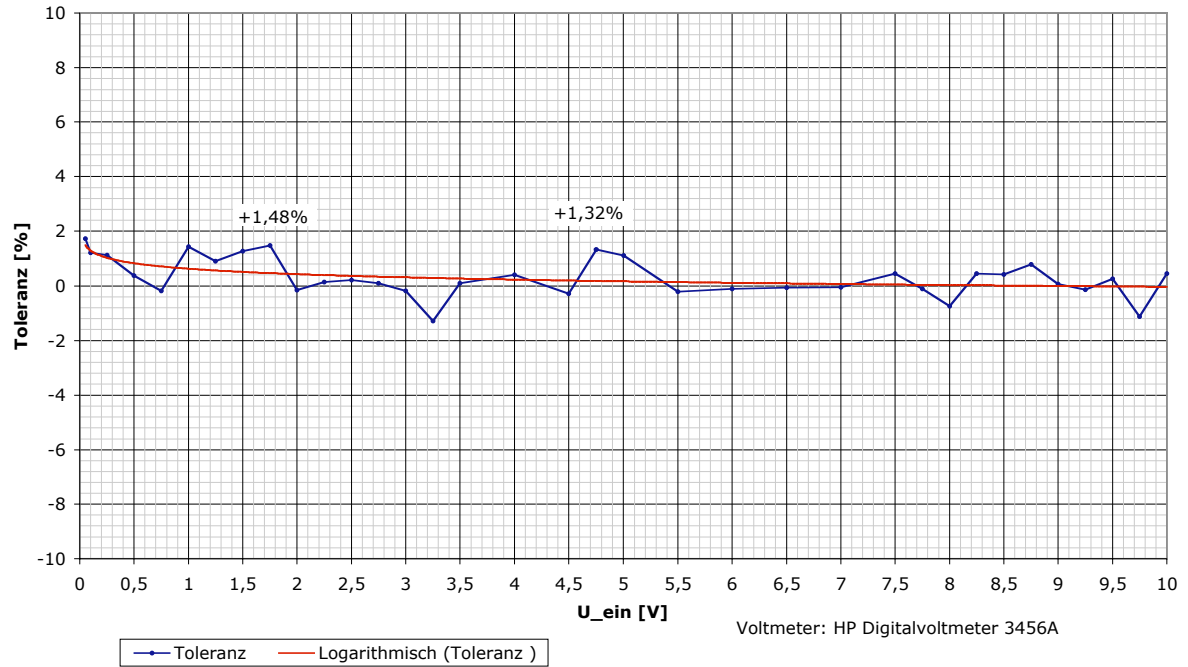


Kurvenschar des Übertragungsverhaltens bei variierender Betriebsspannung



## Anhang D2

### Toleranzschema der Gleichrichtung



## Anhang E1

### Messkonfiguration:

Art der Messung: Feldstärkenermittlung

Messort: Therapiezone

Spalthöhe: 300mm

Ebene: F (70mm)

Aussteuerung:		500	400	300	200	100
x	y	H [kA/m]	H [kA/m]	H [kA/m]	H [kA/m]	H [kA/m]
0	40	0,855	0,64139846	0,463	0,285	0,157
0	30	3,278	2,423	1,710	1,140	0,584
0	20	8,837	7,127	5,274	3,563	1,710
0	10	14,253	11,403	8,552	5,416	2,993
0	0	14,966	11,973	9,122	5,986	3,278
0	-10	14,253	10,690	7,982	5,416	2,851
0	-20	14,253	7,127	5,131	3,278	1,853
0	-30	3,207	2,423	1,853	1,069	0,570
0	-40	0,855	0,599	0,570	0,321	0,185
-30	0	3,207	2,494	1,710	1,140	0,713
-20	0	9,977	7,839	5,559	3,563	2,138
-10	0	14,253	11,118	8,267	5,416	2,851
0	0	14,966	11,973	9,122	5,986	3,278
10	0	14,253	11,403	8,837	5,559	2,993
20	0	9,977	7,839	5,559	3,563	2,138
30	0	3,207	2,494	1,710	1,140	0,713

Aussteuerung:		500	400	300	200	100
x	y	B [T]	B [T]	B [T]	B [T]	B [T]
0	40	0,0010747	0,0008060	0,0005821	0,0003582	0,0001970
0	30	0,0041196	0,0030449	0,0021493	0,0014329	0,0007344
0	20	0,0111050	0,0089556	0,0066272	0,0044778	0,0021493
0	10	0,0179112	0,0143290	0,0107467	0,0068063	0,0037614
0	0	0,0188068	0,0150454	0,0114632	0,0075227	0,0041196
0	-10	0,0179112	0,0134334	0,0100303	0,0068063	0,0035822
0	-20	0,0111050	0,0089556	0,0064480	0,0041196	0,0023285
0	-30	0,0040300	0,0030449	0,0023285	0,0013433	0,0007164
0	-40	0,0010747	0,0007523	0,0007164	0,0004030	0,0002328
-30	0	0,0040300	0,0031345	0,0021493	0,0014329	0,0008956
-20	0	0,0125379	0,0098512	0,0069854	0,0044778	0,0026867
-10	0	0,0179112	0,0139708	0,0103885	0,0068063	0,0035822
0	0	0,0188068	0,0150454	0,0114632	0,0075227	0,0041196
10	0	0,0179112	0,0143290	0,0111050	0,0069854	0,0037614
20	0	0,0125379	0,0098512	0,0069854	0,0044778	0,0026867
30	0	0,0040300	0,0031345	0,0021493	0,0014329	0,0008956

## Anhang E2

### Messkonfiguration

Art der Messung: Feldstärkenermittlung

Messort: Therapiezone

Spalthöhe: 300mm

Ebene: G (120mm)

Aussteuerung:		500	400	300	200	100
x	y	H [kA/m]	H [kA/m]	H [kA/m]	H [kA/m]	H [kA/m]
0	40	0,912	0,755	0,556	0,299	0,188
0	30	3,278	2,637	1,938	1,311	0,670
0	20	7,697	6,129	4,561	3,064	1,596
0	10	11,973	9,265	6,984	4,632	2,423
0	0	12,828	9,977	7,554	4,846	2,566
0	-10	11,830	8,980	6,699	4,561	2,352
0	-20	7,412	5,986	4,347	2,922	1,568
0	-30	3,136	2,494	1,796	1,169	0,627
0	-40	0,998	0,855	0,627	0,413	0,228
-30	0	2,922	2,352	1,796	1,197	0,613
-20	0	7,554	6,129	4,561	2,993	1,568
-10	0	11,973	9,265	6,842	4,632	2,423
0	0	12,828	9,977	7,554	4,846	2,566
10	0	11,973	9,550	7,127	4,632	2,494
20	0	7,554	6,129	4,561	2,993	1,568
30	0	2,922	2,352	1,796	1,197	0,613

Aussteuerung:		500	400	300	200	100
x	y	B [T]	B [T]	B [T]	B [T]	B [T]
0	40	0,0011463	0,0009493	0,0006985	0,0003761	0,0002364
0	30	0,0041196	0,0033136	0,0024359	0,0016478	0,0008418
0	20	0,0096721	0,0077018	0,0057316	0,0038509	0,0020061
0	10	0,0150454	0,0116423	0,0087765	0,0058211	0,0030449
0	0	0,0161201	0,0125379	0,0094929	0,0060898	0,0032240
0	-10	0,0148663	0,0112841	0,0084183	0,0057316	0,0029554
0	-20	0,0093138	0,0075227	0,0054629	0,0036718	0,0019702
0	-30	0,0039405	0,0031345	0,0022568	0,0014687	0,0007881
0	-40	0,0012538	0,0010747	0,0007881	0,0005194	0,0002866
-30	0	0,0036718	0,0029554	0,0022568	0,0015045	0,0007702
-20	0	0,0094929	0,0077018	0,0057316	0,0037614	0,0019702
-10	0	0,0150454	0,0116423	0,0085974	0,0058211	0,0030449
0	0	0,0161201	0,0125379	0,0094929	0,0060898	0,0032240
10	0	0,0150454	0,0120005	0,0089556	0,0058211	0,0031345
20	0	0,0094929	0,0077018	0,0057316	0,0037614	0,0019702
30	0	0,0036718	0,0029554	0,0022568	0,0015045	0,0007702

## Anhang E3

### Messkonfiguration:

Art der Messung: Feldstärkenermittlung

Messort: Therapiezone

Spalthöhe: 300mm

Ebene: H (170mm)

Aussteuerung:		500	400	300	200	100
x	y	H [kA/m]	H [kA/m]	H [kA/m]	H [kA/m]	H [kA/m]
0	40	0,912	0,755	0,534	0,371	0,188
0	30	3,064	2,566	1,824	1,254	0,641
0	20	7,697	6,129	4,490	2,993	1,511
0	10	11,688	9,122	6,842	4,561	2,281
0	0	12,543	9,835	7,554	4,846	2,494
0	-10	11,260	9,122	6,699	4,561	2,281
0	-20	7,127	5,986	4,419	2,993	1,482
0	-30	2,993	2,352	1,796	1,197	0,599
0	-40	1,026	0,827	0,613	0,406	0,205
-30	0	2,708	2,109	1,596	1,069	0,542
-20	0	7,127	5,559	4,276	2,922	1,482
-10	0	11,403	9,122	6,842	4,490	2,281
0	0	12,543	9,835	7,554	4,846	2,494
10	0	11,403	9,122	6,842	4,739	2,281
20	0	7,127	5,559	4,276	2,922	1,482
30	0	2,708	2,109	1,596	1,069	0,542

Aussteuerung:		500	400	300	200	100
x	y	B [T]	B [T]	B [T]	B [T]	B [T]
0	40	0,0011463	0,0009493	0,0006717	0,0004657	0,0002364
0	30	0,0038509	0,0032240	0,0022926	0,0015762	0,0008060
0	20	0,0096721	0,0077018	0,0056420	0,0037614	0,0018986
0	10	0,0146872	0,0114632	0,0085974	0,0057316	0,0028658
0	0	0,0157619	0,0123587	0,0094929	0,0060898	0,0031345
0	-10	0,0141499	0,0114632	0,0084183	0,0057316	0,0028658
0	-20	0,0089556	0,0075227	0,0055525	0,0037614	0,0018628
0	-30	0,0037614	0,0029554	0,0022568	0,0015045	0,0007523
0	-40	0,0012896	0,0010389	0,0007702	0,0005105	0,0002579
-30	0	0,0034031	0,0026509	0,0020061	0,0013433	0,0006806
-20	0	0,0089556	0,0069854	0,0053734	0,0036718	0,0018628
-10	0	0,0143290	0,0114632	0,0085974	0,0056420	0,0028658
0	0	0,0157619	0,0123587	0,0094929	0,0060898	0,0031345
10	0	0,0143290	0,0114632	0,0085974	0,0059555	0,0028658
20	0	0,0089556	0,0069854	0,0053734	0,0036718	0,0018628
30	0	0,0034031	0,0026509	0,0020061	0,0013433	0,0006806

## Anhang F1

### Messkonfiguration:

Art der Messung: Feldstärkenermittlung

Messort: Applikator- Umfeld

Messzone: A (Abstand bei 10cm)

Messhöhen: 50cm (Kniehöhe)

Messsonde: 200A-Sonde (größte Sonde)

MP	x	y	z	H(xyz) [A/m]	B <sup>1</sup> [T]
1	5,2	8,5	3,6	5,297405025	6,65692E-06
2	6,6	8,4	1,9	5,425172808	6,81747E-06
3	2,1	4,3	3	2,824004249	3,54875E-06
4	4,2	7,6	0,9	4,364916952	5,48512E-06
5	1,6	4,5	2,5	2,695366394	3,3871E-06
6	0,1	3,4	0,8	1,747140521	2,19552E-06
7	0	2,9	0,1	1,450861813	1,82321E-06
8	2,4	2,4	1	1,769180601	2,22322E-06
9	2,5	1,7	1,3	1,645448267	2,06773E-06
10	5,2	2,5	3,8	3,45434509	4,34086E-06
11	15,3	0,2	2,6	7,760315715	9,7519E-06
12	0	2	0,2	1,004987562	1,2629E-06
13	17,4	3,3	24,4	<b>15,07489635</b>	1,89437E-05
14	17,3	3	3,1	8,914875209	1,12028E-05
15	0,2	3,3	5,1	3,03891428	3,81881E-06
16	0,6	0,2	2,7	1,386542462	1,74238E-06
17	0,3	1,2	1,3	0,897217922	1,12748E-06
18	6,4	0,4	0,6	3,220248438	4,04668E-06
19	10,2	0,5	11,4	7,652613933	9,61656E-06
20	16,2	2,9	14,8	<b>11,06672942</b>	1,39069E-05
21	-	-	-	-	-

<sup>1)</sup> mit  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$

## Anhang F2

### Messkonfiguration:

Art der Messung: Feldstärkenermittlung

Messort: Applikator- Umfeld

Messzone: A (Abstand bei 10cm)

Messhöhen: 100cm (Hüfthöhe)

Messsonde: 200A-Sonde (größte Sonde)

MP	x	y	z	H(xyz) [A/m]	B <sup>1</sup> [T]
1	19	4,2	4,4	9,974968672	1,25349E-05
2	15	6	1,6	8,117265549	1,02005E-05
3	10,5	0,5	4,2	5,659946996	7,1125E-06
4	9,4	5,7	3,4	5,753477209	7,23003E-06
5	0,1	6,6	1,2	3,354474624	4,21536E-06
6	0,5	2,7	2	1,698528775	2,13443E-06
7	2	1,9	2,7	1,930025907	2,42534E-06
8	1,2	3,8	2,4	2,32594067	2,92286E-06
9	0,1	4	2,8	2,441823089	3,06849E-06
10	1,6	6,7	4,7	4,169532348	5,23959E-06
11	5	3,3	7,4	4,760514678	5,98224E-06
12	38	34	41	<b>32,71467561</b>	4,11105E-05
13	7,5	8,2	18,4	10,74767417	1,35059E-05
14	5,9	3,7	11,6	6,76498337	8,50113E-06
15	0,5	7,2	2,6	3,835687683	4,82007E-06
16	0,9	2,7	2,4	1,861451047	2,33917E-06
17	1,9	3,6	0,1	2,035927307	2,55842E-06
18	3,8	3,6	7,7	4,65537324	5,85011E-06
19	2,2	1,5	1,9	1,635542723	2,05528E-06
20	14	13,5	2,3	9,792088643	1,23051E-05
21	31	32,8	25,6	<b>25,9432072</b>	3,26012E-05

<sup>1)</sup> mit  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$

## Anhang F3

### Messkonfiguration:

Art der Messung: Feldstärkenermittlung

Messort: Applikator- Umfeld

Messzone: A (Abstand bei 10cm)

Messhöhen: 175cm (Kopfhöhe)

Messsonde: 200A-Sonde (größte Sonde)

MP	x	y	z	H(xyz) [A/m]	B <sup>1</sup> [T]
1	6,5	19,4	10,5	11,49847816	1,44494E-05
2	3,7	16,4	7,8	9,266741606	1,16449E-05
3	3,3	5,2	1,1	3,128098464	3,93088E-06
4	5,4	13,4	2,1	7,299486283	9,1728E-06
5	3,4	17,2	0,4	8,768694316	1,10191E-05
6	4,6	9,1	15,2	9,151639197	1,15003E-05
7	2	6,2	2,5	3,488911005	4,38429E-06
8	0	5,3	0,9	2,687936011	3,37776E-06
9	4,5	1,4	1,7	2,50499501	3,14787E-06
10	5,9	0	0,3	2,953811098	3,71187E-06
11	15,2	11,6	9,7	10,72019123	1,34714E-05
12	122	50,2	52,6	<b>71,01197082</b>	8,92363E-05
13	24	12,2	12,3	<b>14,79974662</b>	1,85979E-05
14	13,8	0,9	0,2	6,915381407	8,69012E-06
15	4,2	1,5	3,7	2,897412639	3,641E-06
16	4,1	1,1	1,6	2,268259244	2,85038E-06
17	4,3	0,7	1,6	2,320560277	2,9161E-06
18	5,7	0,3	2	3,024070105	3,80016E-06
19	10	2,9	3,5	5,492267291	6,90179E-06
20	20,4	9,2	14	<b>13,19848476</b>	1,65857E-05
21	106	56	60,4	<b>67,11959475</b>	8,4345E-05

<sup>1)</sup> mit  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$

## Anhang F4

### Messkonfiguration:

Art der Messung: Feldstärkenermittlung

Messort: Applikator- Umfeld

Messzone: B (Abstand bei 100cm)

Messhöhen: 100cm (Hüfthöhe)

Messsonde: 200A-Sonde (größte Sonde)

MP	x	y	z	H(XYZ) [A/m]	B <sup>1</sup> [T]
1	0,3	0,1	1,2	0,62048368	7,79723E-07
2	0,1	0,4	0,3	0,25495098	3,20381E-07
3	0,7	0,3	0,2	0,39370039	4,94739E-07
4	0	0,6	0,1	0,30413813	3,82191E-07
5	0	1,2	0	0,6	7,53982E-07
6	0,6	1	0,4	0,6164414	7,74643E-07
7	0,2	0,5	0,8	0,48218254	6,05928E-07
8	0,1	0,2	1,1	0,56124861	7,05286E-07
9	0,2	0,9	1,2	0,7566373	9,50818E-07
10	2,1	0,7	0,1	1,10792599	1,39226E-06
11	0,1	1,1	2,2	1,23085336	1,54674E-06
12					
13	0	1,3	2,8	1,5435349	1,93966E-06
14	0,3	1,9	1,9	1,35185058	1,69879E-06
15	1,6	2,6	1,9	<b>1,79791546</b>	2,25933E-06
16	1,4	2,5	1,4	1,59452187	2,00374E-06
17	1,9	1,9	1,2	1,4713939	1,84901E-06
18	0,1	2,2	0	1,10113578	1,38373E-06
19	1,6	1,2	1,1	1,14127122	1,43416E-06
20	1,2	0,9	1,1	0,93005376	1,16874E-06
21	0,5	2	3,7	<b>2,11778186</b>	2,66128E-06

<sup>1)</sup> mit  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$

## Anhang F5

### Messkonfiguration:

Art der Messung: Feldstärkenermittlung

Messort: Applikator- Umfeld

Messzone: B (Abstand bei 100cm)

Messhöhen: 170cm (Kopfhöhe)

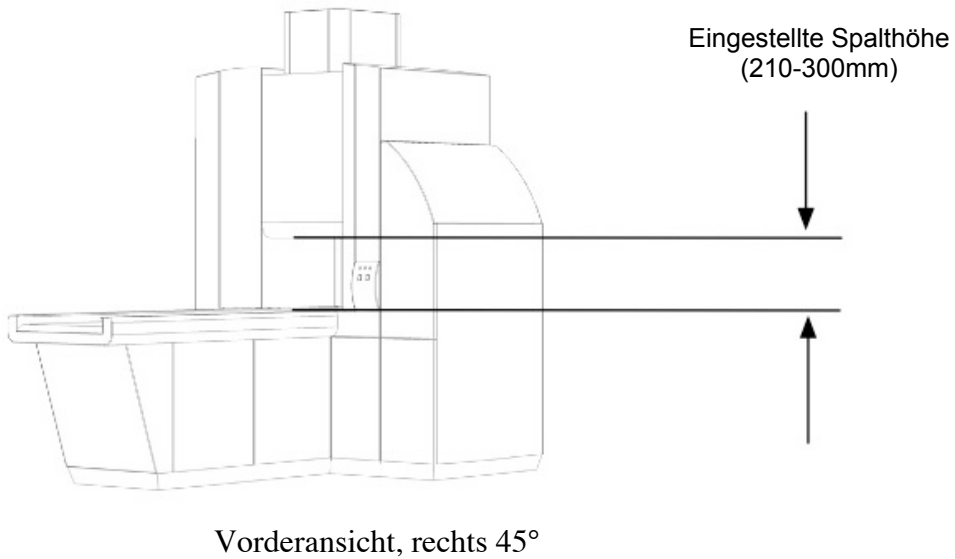
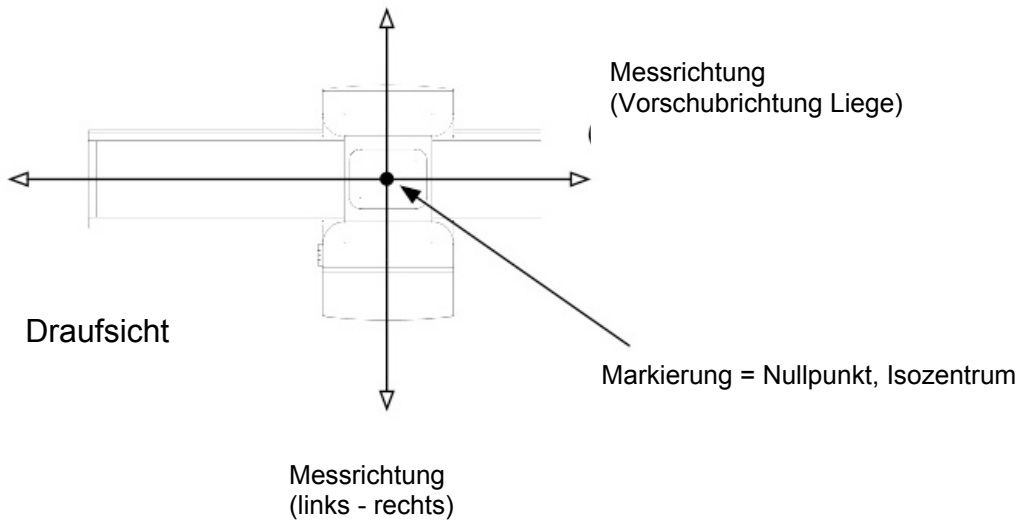
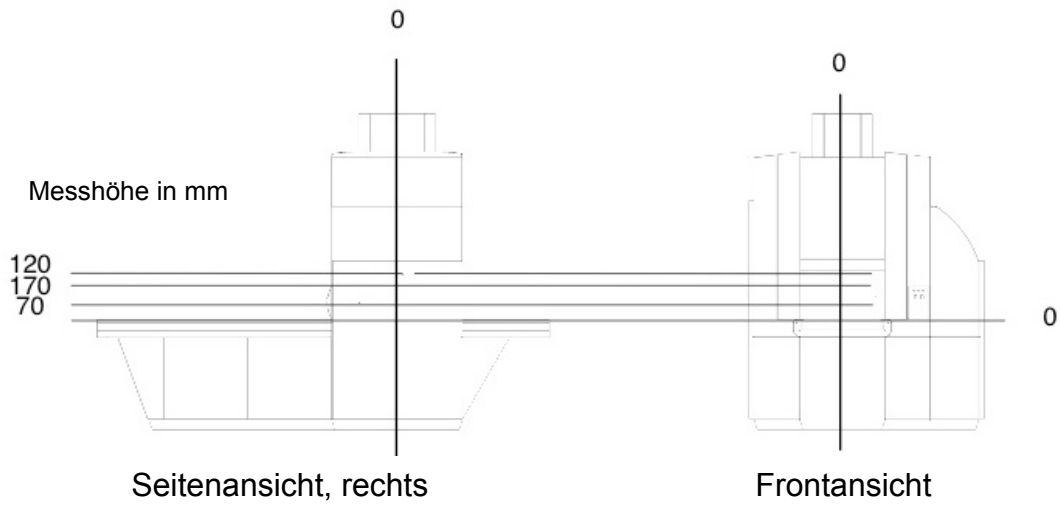
Messsonde: 200A- Sonde (größte Sonde)

MP	x	y	z	H(xyz) [A/m]	B <sup>1</sup> [T]
1	1,8	1,7	2,4	1,72409396	2,16656E-06
2	0,9	0,7	1,1	0,79214898	9,95444E-07
3	0,8	0,9	0	0,60207973	7,56596E-07
4	0,5	0,2	0,1	0,27386128	3,44144E-07
5	0	0,8	0,2	0,41231056	5,18125E-07
6	0,1	1,3	0,1	0,65383484	8,21633E-07
7	0,4	0,8	0	0,4472136	5,61985E-07
8	0,6	0,5	0,1	0,39370039	4,94739E-07
9	1,4	0,8	0,4	0,83066239	1,04384E-06
10	1,6	1	0,4	0,96436508	1,21186E-06
11	1,2	0,7	0,9	0,82764727	1,04005E-06
12					
13	5,7	1,2	2,2	<b>3,11327802</b>	3,91226E-06
14	2,8	0,5	0,2	1,42565774	1,79153E-06
15	3,8	0	0,6	1,92353841	2,41719E-06
16	3,6	0	0,2	1,80277564	2,26543E-06
17	3	0	0	1,5	1,88496E-06
18	2,7	0	0	1,35	1,69646E-06
19	2,9	0,8	0,7	1,54434452	1,94068E-06
20	2,2	0,7	1,1	1,27867119	1,60683E-06
21	6,6	4,3	4	<b>4,41729555</b>	5,55094E-06

<sup>1)</sup> mit  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$

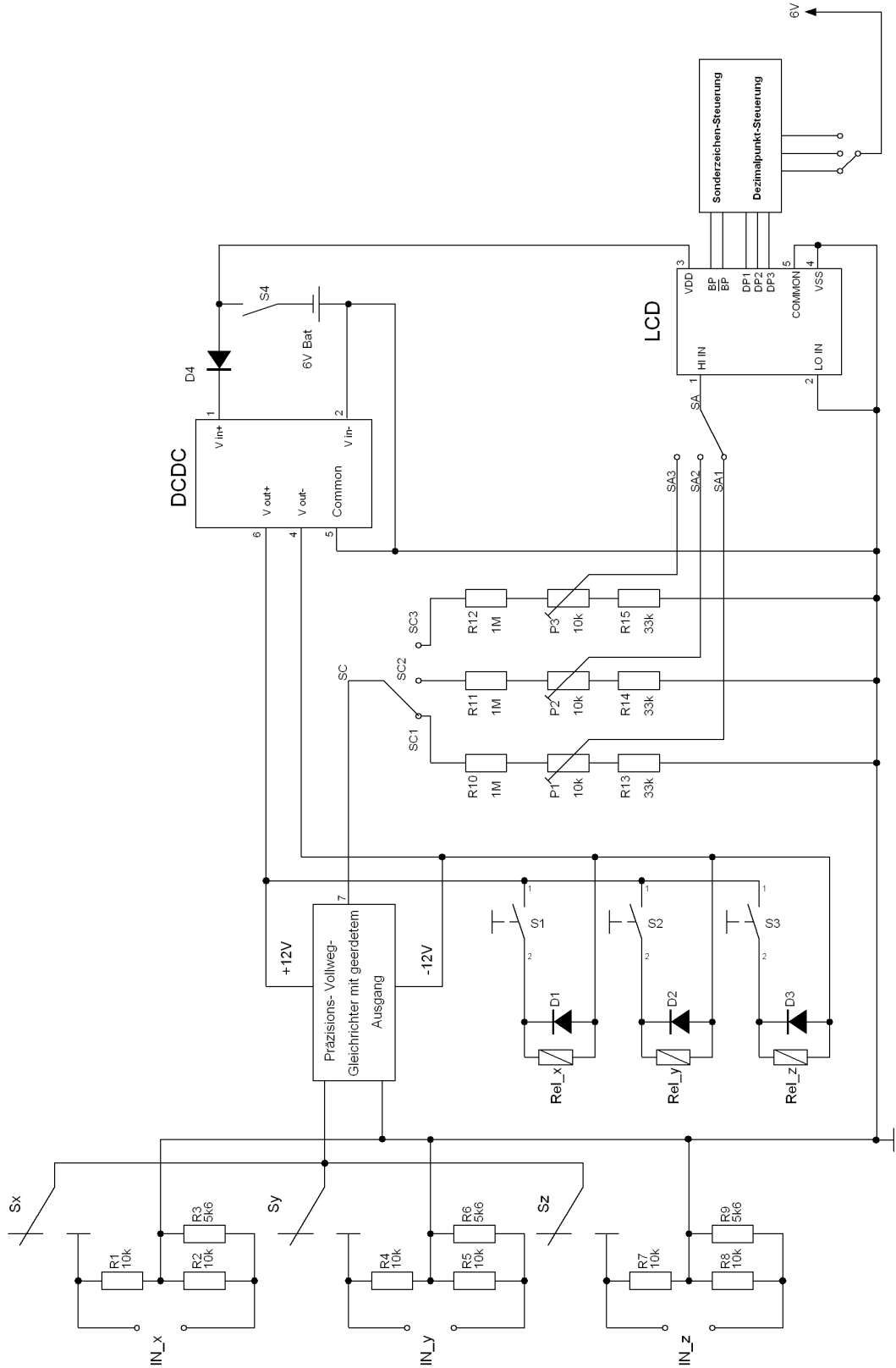
# Anhang G

## Technische Zeichnung der MFH-Anlage



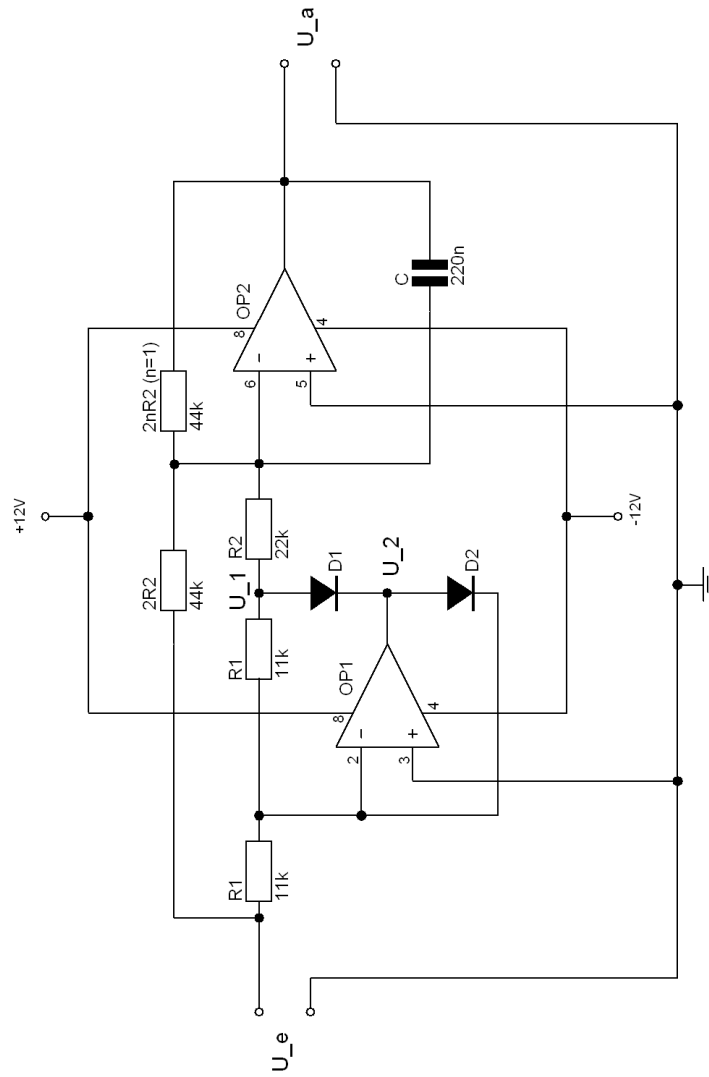
# Anhang H1

## Schaltplan: Gesamtschaltung „KAT-20“



## Anhang H2

### Präzisions-Vollweg-Gleichrichter mit geerdetem Ausgang



## Anhang I1

Belegungsplan: KAT20 Flachkabel

<b>Pin</b>	<b>Vorderseite</b> (Kabelfarbe)	<b>Rückseite</b>
<b>1</b>	Pin 10 Drehschalter (schw)	SC2-Zweig
<b>2</b>	Schalter S4 (-) Ein/Aus (bl)	D4 (+)
<b>3</b>	Taster Z S3 (+) (grau)	Pin 3 SUB-D Kat-20 (in) Taster
<b>4</b>	Taster X S1 (+) (grau)	Pin 1 SUB-D Kat-20 (in) Taster
<b>5</b>	Taster Y S2 (+) (grau)	Pin 2 SUB-D Kat-20 (in) Taster
<b>6</b>	Batt.- LED Vcc+	Batterie (+)
<b>7</b>	Schalter S4 (+) Ein/Aus (glb)	Batterie (+) vor D4
<b>8</b>	Massebezugsfläche	U <sub>Meß</sub> über COMMON
<b>9</b>	Pin3 Drehschalter (br/w)	Schleifer P3 von SC3
<b>10</b>	Taster (+12V) (s/w)	Direkt an Massebezugsfläche <sup>1</sup>
<b>11</b>	Pin 11 Drehschalter (w)	SC3-Zweig
<b>12</b>	-	-
<b>13</b>	Pin 2 Drehschalter (gr/glb)	Schleifer P2 von SC2
<b>14</b>	Pin 9 Drehschalter (glb)	SC1-Zweig
<b>15</b>	Pin C Drehschalter (grn)	Pin 7 OPV LF412 (Ua)
<b>16</b>	Pin 1 Drehschalter (ora)	Schleifer P1 von SC1

<sup>1</sup>Massepunkt befindet sich auf der Frontseite des Gehäuses

- nicht belegt

## Anhang I2

Belegungsplan:

KAT-20 SUB-D

Pin	in	out
1	Taster S1 X (+)	Pin 10 der Leiterplatte
2	Taster S2 Y (+)	Pin 11 der Leiterplatte
3	Taster S3 Z (+)	Pin 12 der Leiterplatte
4	Pin 8 OPV LF412 (+12V)	Pin 6 DC/DC (Vout +12V)
5	Pin 4 OPV LF412 (-12V)	Pin 4 DC/DC (Vout -12V)
6	Massebezugsfläche	Pin 5 DC/DC (Common)
7	Pin 6 $U_{Me\beta}$ (+)	Pin 10 Drehschalter (schw)
8	-	-
9	-	-

- nicht belegt

SUB-D SA (Sondenadapter)

Pin	in	out
1	blau1	x1
2	blau2	x2
3	-	-
4	rot1	y1
5	rot2	y2
6	-	-
7	schwarz1	z1
8	schwarz2	z2
9	-	-

- nicht belegt

## Anhang K

Messergebnisse der Kalibriersonde:

Ebene A		Ebene B		Ebene C		Ebene D		Ebene E	
MP	Uo [%]	MP	Uo [%]	MP	Uo [%]	MP	Uo [%]	MP	Uo [%]
A1	-3,4	B1	-4,6	C1	-3,5	D1	-4,1	E1	-3,6
A2	-3,2	B2	-4,1	C2	-3,5	D2	-4,1	E2	-3,4
A3	-3,1	B3	-3,7	C3	-2,8	D3	-3,6	E3	-3,1
A4	-3,2	B4	-4,0	C4	-3,2	D4	-3,9	E4	-3,4
A5	-3,6	B5	-4,3	C5	-3,3	D5	-4,5	E5	-3,7
A6	-3,2	B6	-3,9	C6	-3,2	D6	-4,1	E6	-3,5
A7	-2,5	B7	-2,4	C7	-1,6	D7	-2,3	E7	-2,4
A8	-2,0	B8	-2,1	C8	-1,2	D8	-2,2	E8	-2,7
A9	-2,1	B9	-2,3	C9	-1,5	D9	-2,2	E9	-3,0
A10	-3,4	B10	-4,0	C10	-3,1	D10	-4,0	E10	-3,4
A11	-3,1	B11	-3,8	C11	-3,0	D11	-3,8	E11	-3,1
A12	-2,5	B12	-2,0	C12	-1,0	D12	-2,1	E12	-2,6
A13	-1,8	B13	-1,3	<b>C13<sup>2</sup></b>	<b>0</b>	D13	-1,2	E13	-2,0
A14	-2,2	B14	-2,0	C14	-0,9	D14	-2,2	E14	-2,4
A15	-3,2	B15	-4,2	C15	-3,0	D15	-4,0	E15	-3,2
A16	-3,3	B16	-4,2	C16	-3,2	D16	-4,2	E16	-3,5
A17	-2,2	B17	-2,3	C17	-1,5	D17	-2,4	E17	-2,5
A18	-2,1	B18	-2,0	C18	-1,2	D18	-2,2	E18	-2,4
A19	-2,6	B19	-2,4	C19	-1,6	D19	-2,3	E19	-2,6
A20	-3,4	B20	-4,4	C20	-3,2	D20	-3,7	E20	-3,4
A21	-3,5	B21	-4,4	C21	-3,2	D21	-4,5	E21	-3,6
A22	-3,3	B22	-4,0	C22	-3,2	D22	-4,2	E22	-3,2
A23	-3,2	B23	-3,9	C23	-3,2	D23	-3,8	E23	-3,4
A24	-3,3	B24	-4,2	C24	-3,2	D24	-4,0	E24	-3,3
A25	-3,5	B25	-4,5	C25	-3,3	D25	-4,4	E25	-3,6

Messhöhe<sup>1</sup> Ebene A: 110mm

Messhöhe<sup>1</sup> Ebene B: 130mm

Messhöhe<sup>1</sup> Ebene C: 150mm

Messhöhe<sup>1</sup> Ebene D: 170mm

Messhöhe<sup>1</sup> Ebene E: 190mm

<sup>1</sup> – ausgehend von der Patientenliegefläche

<sup>2</sup> – Bezugswert (100%=13,53kA/m)

## Anhang L1

### KONFORMITÄTSERKLÄRUNG

Wir.....Okay Tosunoğlu  
*(Name des Anbieters)*

Ebersstr.78 – 10827 Berlin  
*(Anschrift)*

erklären in alleiniger Verantwortung, daß das Produkt

„KAT-20“  
*(Bezeichnung)*

auf das sich diese Erklärung bezieht, mit der/den folgenden Norm(en) oder normativen Dokument(en) übereinstimmt:

EN 61326

gemäß den Bestimmungen der Richtlinie...89/ 336/ EWG (bzw EMVG)

Art des Messgerätes:	H-Feldmessgerät
Messbereich:	200A/m – 20kA/m
Frequenzbereich:	100kHz

Berlin, 13.August 2004

## Anhang M

H-Feldmessgerät: Gleichrichter- Einheit / 1,5m Verbindungsleitung / KAT-20 /  
3 Sonden (200A/m, 2kA/m, 20kA/m) / Sondenadapter



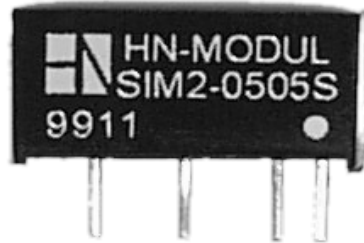
### Technische Daten:

- Messbereich H-Feld: 200A/m, 2kA/m, 20kA/m
- Frequenzbereich: 100kHz
- Richtungsunabhängige (isotrope) Messung
- Speisung: 4x1,5V AA

2 W  
DC/DC  
SIM-SIL  
MODUL

# SIM 2 - SIL 7

2 Watt Ultra-Miniatur SIL-Modul-Serie



HN-MODUL

## Besondere Merkmale Features

Ultraminiatur-SIL7-Gehäuse	Ultra mini SIL7 package
Isolationsspannung max. 1000 VDC	Isolation voltage max. 1000 V
kurzzeitig Kurzschlußfestigkeit	short-time short circuit protection

## Technische Daten Specification

(bei 25°C Umgebungstemperatur, nominaler Eingangsspannung und Vollast )	(at 25°C ambient temperature, nominal input voltage and full load )
---	---

## Eingangsdaten Input Specifications

Eingangsspannung	Input voltages	5 / 12 / 15 VDC, ±10%
Eingangsfiler	Input filter	Kondensatoren, capacitors

## Ausgangsdaten Output Specifications

Leistung	Power	2 Watt
Wirkungsgrad	Efficiency	70% min.
Regelabweichung	Voltage accuracy	Max. ±5%
Restwelligkeit	Ripple and noise	100 mV p-p max.
Last	Load	±10%(Load=20%-100%)
Eingang	Line	±1.2% von $V_{in}$

## Allgemeine Daten General Specifications

Schaltfrequenz	Switching frequency	100 KHz min.
Betriebstemperatur	Operation temperature	-20°C...+75°C
Lagertemperatur	Storage temperature	-25°C...+125°C
Isolationsspannung	Isolation voltage	1 kVDC min.
Gehäusematerial	Casing	Nichtleitender Kunststoff, non conducting plastics

# SIM 2 - SIL 7

## 2 Watt Ultra-Miniatur SIL-Modul-Serie

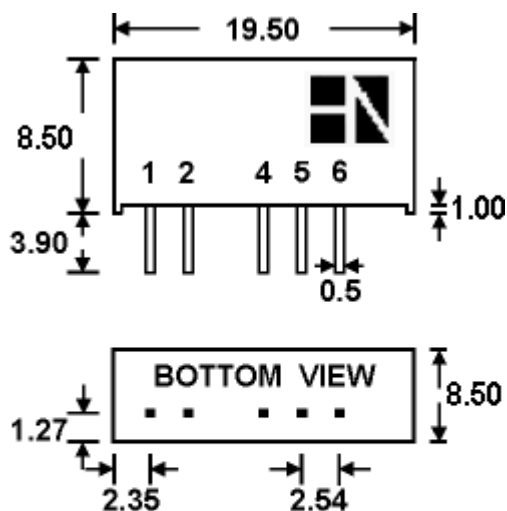
# 2 W DC/DC SIM-SIL MODUL

### Bestell-Information / Order Information

Modell	Eingang/Input V	Ausgang 1/Output 1 V / mA	Ausgang 2/Output 2 V / mA
SIM2-0505S-SIL7	5	5/400	
SIM2-0512S-SIL7	5	12/166	
SIM2-0515S-SIL7	5	15/132	
SIM2-0905S-SIL7	9	5/400	
SIM2-0912S-SIL7	9	12/166	
SIM2-0915S-SIL7	9	15/132	
SIM2-1205S-SIL7	12	5/400	
SIM2-1212S-SIL7	12	12/166	
SIM2-1215S-SIL7	12	15/132	
SIM2-1505S-SIL7	15	5/400	
SIM2-1512S-SIL7	15	12/166	
SIM2-1515S-SIL7	15	15/132	
SIM2-0512D-SIL7	5	12/82	-12/82
SIM2-0515D-SIL7	5	15/66	-15/66
SIM2-0905D-SIL7	9	5/200	-5/200
SIM2-0912D-SIL7	9	12/82	-12/82
SIM2-0915D-SIL7	9	15/66	-15/66
SIM2-1205D-SIL7	12	5/200	-5/200
SIM2-1212D-SIL7	12	12/82	-12/82
SIM2-1215D-SIL7	12	15/66	-15/66
SIM2-1505D-SIL7	15	5/200	-5/200
SIM2-1512D-SIL7	15	12/82	-12/82
SIM2-1515D-SIL7	15	15/66	-15/66

MEMO:

### PIN-Belegung und Zeichnung / Pin assignments & drawing, mm (inch)



PIN CONNECTION		
	SINGLE	DUAL
1	Vin +	Vin +
2	Vin -	Vin -
4	Vout-	Vout-
5	OMITTED	COMMON
6	Vout +	Vout +

Tolerance XX.XX +/- 0.25  
All Dimensions in m. m.

# HED281 ■ HED282 ■ DPM951 ■ DPM952

## Panel Mount Digital Multimeters



### Features

- Low power consumption
- 5 or 9 volt dc operation (customer selectable)
- Multi-turn voltage-reference potentiometer for accurate adjustment of display reading (HED281/HED282)
- Annunciators for common engineering units
- Large character height, 10mm on HED271/DPM951 and 14mm HED282/DPM952
- DIN standard housings, 24x48mm HED281/DPM951 and 36x72mm on HED282/DPM952
- Low cost versions available (DPM951/DPM952)

These modules are low profile LCD digital panel meters conforming to DIN standard panel cut-outs. They use advanced components and construction techniques to provide performance combined with elegant appearance at a cost previously unattainable. The LED backlight (-T/BL version) provides a clear, easy to read display under all lighting conditions. The very low power consumption makes either module ideally suited to battery powered applications.

Features include 200mV full scale reading, programmable annunciators and decimal point, auto-polarity and operation from 5V or 9V supplies. In 5V mode each module generates its own -5V supply which enables it to measure signals with the same common zero as the supply. Connections are brought out to enable the module to operate in various modes including single ended, ratio measurement and differential. Different modes are selected by linking PCB solder pads which are provided for the purpose.

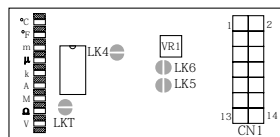
### Specification Connections

	Min	Typ	Max	Units
Accuracy ( $\pm 1$ Count)		0.1	0.1	%
Linearity			$\pm 1$	count
Sample Rate		3		per sec
Temperature Stability		30		ppm/ $^{\circ}$ C
Operating temp range	0		50	$^{\circ}$ C
Storage temp range	-20		70	$^{\circ}$ C
Supply voltage (5V mode)	3	5	7	Vdc
Supply voltage (9V mode)	7	9	12	Vdc
Supply current		2		mA
Backlight Current (HED281-TDPM951-BL)			80	mA
Backlight Current (HED282-TDPM952-BL)			160	mA
Input impedance	100			M $\Omega$

Rear views showing connections and links

#### HED281/DPM951

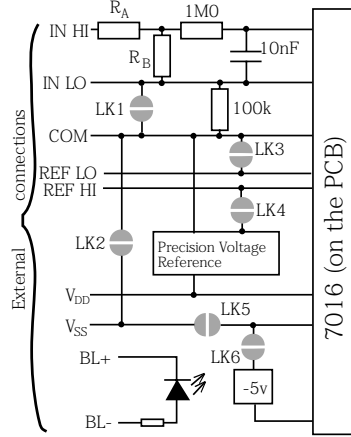
- Annunciator Connectors
- De-select
- LEGEND
- Select



## Panel Mount Digital Multimeters

### Block Schematic Diagram showing PCB Links

Note: Links LK1 and LK2 are not present on HED281/DPM951



### Links & Mode Connections

Function (Note: There is no LK3 link on either model)	On HED281/ DPM951	On HED282/ DPM952
Links ANALOGUE COMMON to IN LO	Connect CN1 pins 2-5	Solder LK1
Links ANALOGUE COMMON to VSS	Connect CN1 pins 4-5	Solder LK2
Links ANALOGUE COMMON to REF LO	Connect CN1 pins 5-7	Solder LK3
Links REF HI to VR1 (remove link if using external reference voltage circuit)	Solder LK4	Solder LK4
Power supply voltage mode link (see Power Supply Mode Selection)	Solder LK5	Solder LK5
Power supply voltage mode link (see Power Supply Mode Selection)	Solder LK6	Solder LK6
TEST LINK. Forces display to 1888. Do not use for more than 2 seconds or damage to the display may occur	Briefly bridge LKT	Briefly bridge LKT

### Internal Reference Voltage

The internal reference voltage (REF HI) is set by VR1. This is a 9 turn pot for greatest accuracy (single turn for DPM951 and DPM952). The voltage is factory set at 100.0mV but may be trimmed to suit individual applications, eg. to compensate for the inaccuracy of external resistors when using scaling configurations.

### Analogue Inputs

IN HI, IN LO and REF HI are all differential inputs. They respond to the voltage across them and not to the voltage with respect to the power supply. The only exception to this is in 5V mode where the analogue common and VSS have been connected together (using pins 4/5 on HED281/DPM951 and LK2 on HED282/DPM952).

There is a limit to the voltage which can be measured using a differential input and this is known as the common mode range. No input may be taken outside the range  $V+ - 0.5V$  and  $V- + 1.0V$ . If there is a danger that any input may be taken outside these limits, it is necessary to fit a resistor of suitable value to limit the current to  $100\mu A$  in series with the input or damage to the unit may occur.

### Power Supply Mode Selection

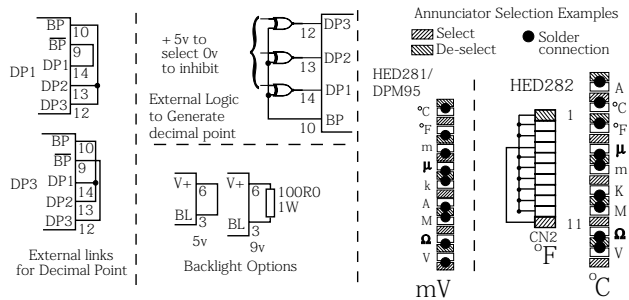
The following power supply mode connections apply to both models.

5 volt mode	9 volt mode
LK5 Open	LK5 Shorted
LK6 Shorted	LK6 Open

### Annunciators

There are annunciator connections, each with its legend, provided on the PCB. Refer to the connections diagram. To display an annunciator, solder a connection between the required LEGEND solder pad and the adjacent SELECTED solder pad. For the annunciators that are not in use, solder a connection between the associated LEGEND and the adjacent NOT SELECTED solder pad to ensure that they do not appear.

### Wiring Examples for Options



### Connector CN2 (HED282 only)

(Note: provision is made for this connector on the DPM952 but is not included).

Pin	Annunciator	Function
1	BP	SEGMENT NOT SELECTED
2	A	Amps
3	°C	degrees Celsius
4	°F	degrees Fahrenheit
5	μ	micro
6	m	milli
7	K	Kilo
8	M	Mega
9	Ω	ohms
10	V	Volts
11	BP	SEGMENT SELECTED

# Application Circuits

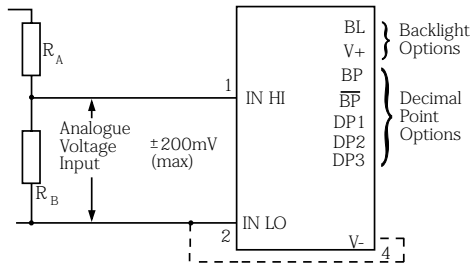
**Note:** In the application circuits, power is supplied on pins V+ and V-.  
**Caution:** Where the measurement voltage is referenced to the supply voltage (in either current or voltage applications) the voltage on IN HI or IN LO must not exceed ± 4.5V for 5V supply or ± 3.5V for 9V supply.

## Scaling Configuration

You can configure the module (semi-permanently) for different voltage ranges by soldering resistors in the positions RA and RB. As supplied RA has a 0Ω resistor fitted. (For switching between ranges see Multi-voltage). On the HED281/DPM951 RA and RB must be fitted externally.

**Note:** 0.1% resistors are required to maintain an accuracy of 0.1%. This may be relaxed if an accuracy less than this is required.

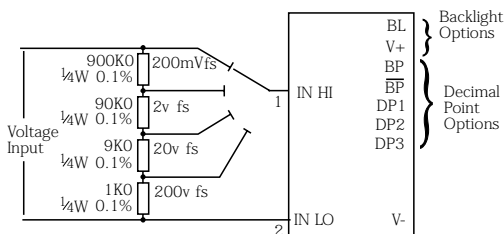
## Voltage Measurement



Link:	HED282/DPM952	HED281/DPM951
Floating I/P voltage (5V)	LK2,3, 4 & 6	LK4 & 6 and connect CN1 pins 4, 5 & 7
Floating I/P voltage (9V)	LK3, 4 & 5	LK4 & 5 and connect CN1 pins 5 & 7
I/P common to 0V (5V)	LK1, 2, 3, 4 & 6	LK4 & 6 and connect CN1 pins 2, 4, 5 & 7
I/P common to 0V (9V)	Not possible	Not possible

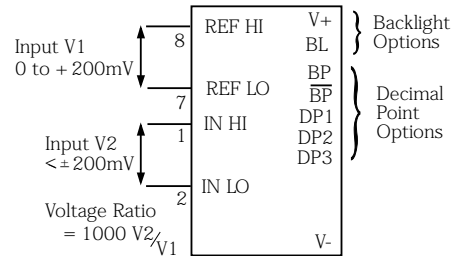
Required full scale	RA(Ω)	RB(Ω)
200mv	0R	Open
2V	900K	100K
20V	990K	10K
200V	999K	1K

## Multi - Voltage Measurement



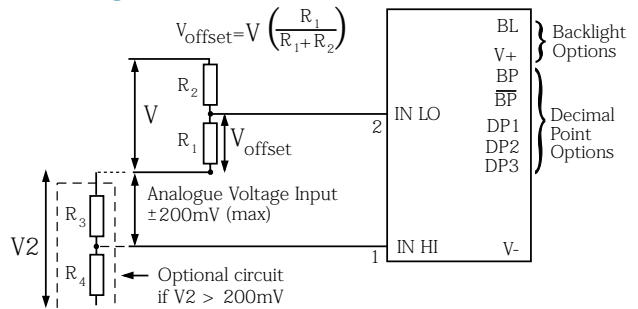
Link:	HED282/DPM952	HED281/DPM951
Floating I/P voltage (5V)	LK2,3, 4 & 6	LK4 & 6 and connect CN1 pins 4, 5 & 7
Floating I/P voltage (9V)	LK3, 4 & 5	LK4 & 5 and connect CN1 pins 5 & 7
I/P common to 0V (5V)	LK1, 2, 3, 4 & 6	LK4 & 6 and connect CN1 pins 2, 4, 5 & 7
I/P common to 0V (9V)	Not possible	Not possible

## Voltage Ratio Measurement



Link:	HED282/DPM952	HED281/DPM951
Floating I/P voltage (5V)	LK2 & 6	LK6 and connect CN1 pins 4 & 5
Floating I/P voltage (9V)	LK5	LK5 and connect CN1 pins 5 & 7
I/P common to 0V (5V)	LK1, 2, 3 & 6	LK6 and connect CN1 pins 2, 4, 5 & 7
I/P common to 0V (9V)	Not possible	Not possible

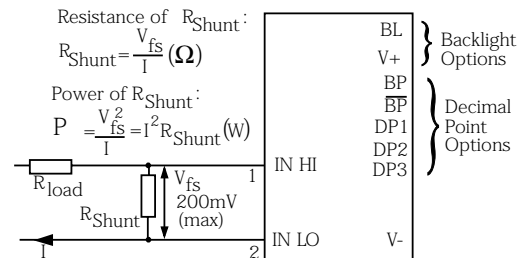
## Voltage Offset Measurement



## Current Measurement

Link:	HED282/DPM952	HED281/DPM951
Floating I/P voltage (5V)	LK2, 3, 4 & 6	LK4 & 6 and connect CN1 pins 4, 5 & 7
Floating I/P voltage (9V)	LK3, 4 & 5	LK4 & 5 and connect CN1 pins 5 & 7

(Note: in 5V mode common is linked to V5)

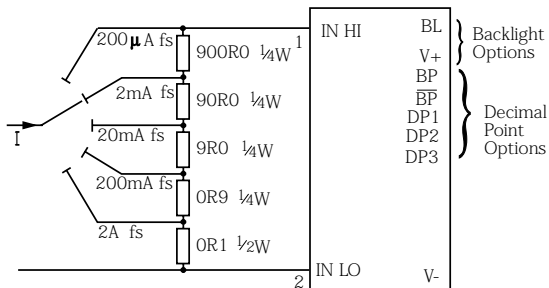


Link:	HED282/DPM952	HED281/DPM951
5V Supply	LK2, 3, 4 & 6	LK4 & 6 and connect CN1 pins 4, 5 & 7
9V Supply	LK3, 4 & 5	LK4 & 5 and connect CN1 pins 5 & 7

Current	R Shunt (Ω)	P (R Shunt) (W)
200 mA	1	0.04
2A	0.1	0.4
20A	0.01	4.0

## Application Circuits

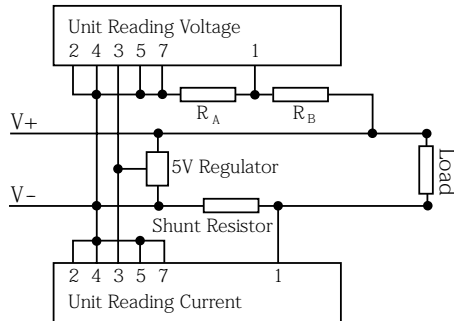
### Multi-current Measurement



Link:	HED282/DPM952	HED281/DPM951
Floating I/P voltage (5V)	LK2,3, 4 & 6	LK4 & 6 and connect CN1 pins 4, 5 & 7
Floating I/P voltage (9V)	LK3, 4 & 5	LK4 & 5 and connect CN1 pins 5 & 7
I/P common to 0V (5V)	LK1, 2, 3, 4 & 6	LK4 & 6 and connect CN1 pins 2, 4, 5 & 7
I/P common to 0V (9V)	Not possible	Not possible

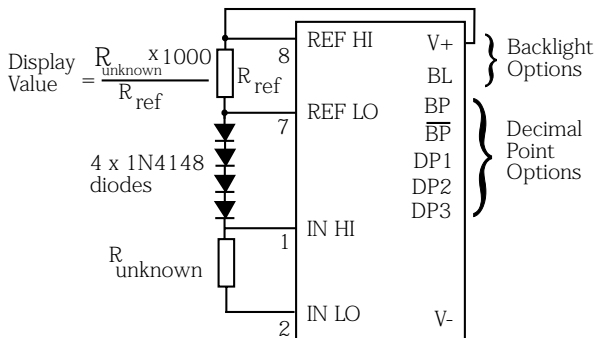
**Caution:** In 5V operation on both the HED281/DPM951 and HED282/DPM952, the shunt resistor must be between the load and 0V/ground or the module will be damaged.

Two HED28 measuring current and voltage from common supply



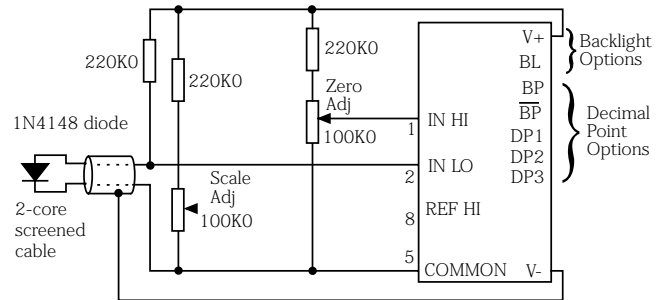
The shunt resistor must be between the load and 0V/ground or the module will be damaged.

### Resistance Ratio Measurement



Link:	HED282/DPM952	HED281/DPM951
5V Supply	LK2 & 6	LK6 and connect CN1 pins 4 & 5
9V Supply	LK5	LK5

### Temperature Measurement using a Signal Diode

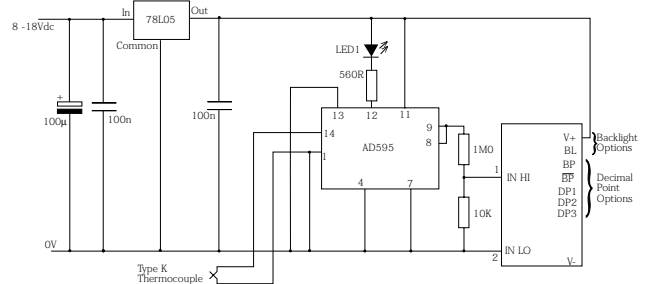


### Temperature Measurement Set Up

- 1 Adjust the SCALE ADJ pot to read 100mV between REF HI (pin8) and COM (pin 5)
- 2 With the temperature probe diode at 0°C adjust the ZERO ADJ pot to indicate 00.0 on the display.
- 3 Increase the temperature of the probe to a known value (x°C). When the display has stabilised, take a reading (y°C).
- 4 Calculate the new value for REF HI voltage as y°C/x°C x 100mV.
- 5 Adjust the SCALE ADJ pot to read the new REF HI value between REF HI (pin 8) and COM (pin 5)

Link:	HED282/DPM952	HED281/DPM951
5V Supply	LK2, 3 & 6	LK6 and connect CN1 pins 4, 5 & 7
9V Supply	LK3 & 5	LK5 and connect CN1 pins 5 & 7

### Temperature Measurement using a Thermocouple



Theoretical Range using 'K' Thermocouple: 0-2,000°C (Practical range depends on range of thermocouple used) LED1 provides indication of overload or thermocouple open circuit.

Link:	HED282/DPM952	HED281/DPM951
	LK1, 2, 3, 4 & 6	LK4 & 6 and connect CN1 pins 2, 4, 5 & 7

### Ordering Information

<b>HED281-R / DPM951-R</b>	24x48mm Multimeter.
<b>HED281-T / DPM951-T</b>	24x48mm Multimeter with backlight.
<b>HED282-R / DPM952-R</b>	36x72mm Multimeter.
<b>HED282-T / DPM952-T</b>	36x72mm Multimeter with backlight.

Datenblatt-3

SDS-DR-Relais

Anzugszeit		2 ms typ.
Abfallzeit		0,6 ms typ.
Prellzeit		< 2 ms
Max. mechanische Schaltfrequenz		100 / s
Umgebungstemperatur		-40 / +70°C
Vibrationsbeständigkeit		40g / 10-200 Hz 20g / 200-2000 Hz
Elektrische Lebensdauer 24V/1A		10 <sup>7</sup> op.
U <sub>AN</sub>	5V 12V 24V	3,75V 9,0V 18,0V
Abfallspg. U <sub>AB</sub>	5V 12V 24V	min. 0,5V min. 1,2V min. 2,4V
Spulenwiderstand: Mono	5V 12V 24V	320 Ohm 1140 Ohm 4370 Ohm
Spulenwiderstand: Bistabil: 1 Wicklung	5V 12V 24V	500 Ohm 1850 Ohm 5650 Ohm
Spulenwiderstand: Bistabil: 2 Wicklungen	5V 12V 24V	315 Ohm 1110 Ohm 2800 Ohm
Kontaktwiderstand R <sub>k</sub>		100 mOhm bei 10mA/20 mV
Kontaktmaterial		Pd Ni, AuRh beschichtet

# LF412

## Low Offset, Low Drift Dual JFET Input Operational Amplifier

### General Description

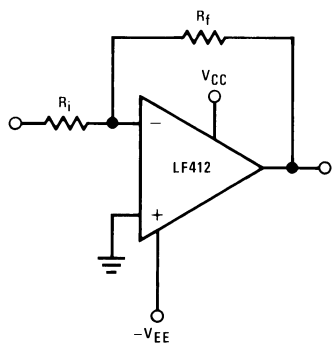
These devices are low cost, high speed, JFET input operational amplifiers with very low input offset voltage and guaranteed input offset voltage drift. They require low supply current yet maintain a large gain bandwidth product and fast slew rate. In addition, well matched high voltage JFET input devices provide very low input bias and offset currents. The LF412 dual is pin compatible with the LM1558, allowing designers to immediately upgrade the overall performance of existing designs.

These amplifiers may be used in applications such as high speed integrators, fast D/A converters, sample and hold circuits and many other circuits requiring low input offset voltage and drift, low input bias current, high input impedance, high slew rate and wide bandwidth.

### Features

- Internally trimmed offset voltage: 1 mV (max)
- Input offset voltage drift: 10  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  (max)
- Low input bias current: 50 pA
- Low input noise current: 0.01  $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Wide gain bandwidth: 3 MHz (min)
- High slew rate: 10V/ $\mu\text{s}$  (min)
- Low supply current: 1.8 mA/Amplifier
- High input impedance:  $10^{12}\Omega$
- Low total harmonic distortion  $\leq 0.02\%$
- Low 1/f noise corner: 50 Hz
- Fast settling time to 0.01%: 2  $\mu\text{s}$

### Typical Connection



DS005656-41

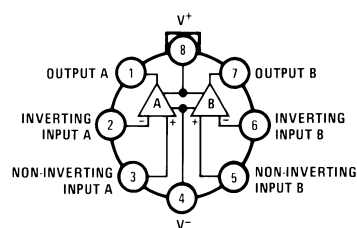
### Ordering Information

#### LF412XYZ

- X** indicates electrical grade
- Y** indicates temperature range
  - "M" for military
  - "C" for commercial
- Z** indicates package type
  - "H" or "N"

### Connection Diagrams

#### Metal Can Package

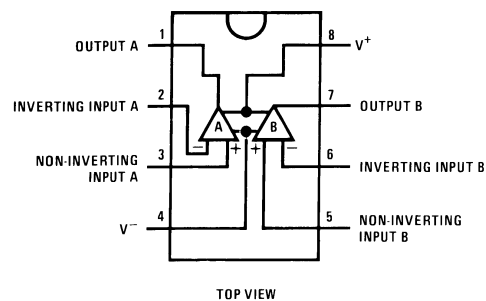


Note. Pin 4 connected to case.  
TOP VIEW

DS005656-42

Order Number LF412MH, LF412CH  
or LF412MH/883 (Note 1)  
See NS Package Number H08A

#### Dual-In-Line Package



TOP VIEW

DS005656-44

Order Number LF412ACN, LF412CN  
or LF412MJ/883 (Note 1)  
See NS Package Number J08A or N08E

## Absolute Maximum Ratings (Note 2)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

(Note 11)

	LF412A	LF412		H Package	N Package
Supply Voltage	±22V	±18V	T <sub>j</sub> max	150°C	115°C
Differential Input Voltage	±38V	±30V	θ <sub>JA</sub> (Typical)	152°C/W	115°C/W
Input voltage Range (Note 3)	±19V	±15V	Operating Temp. Range	(Note 6)	(Note 6)
Output Short Circuit Duration (Note 4)	Continuous	Continuous	Storage Temp. Range	-65°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ 150°C	-65°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ 150°C
	<b>H Package</b>	<b>N Package</b>	Lead Temp. (Soldering, 10 sec.)	260°C	260°C
Power Dissipation (Note 12)	(Note 5)	670 mW	ESD Tolerance (Note 13)	1700V	1700V

## DC Electrical Characteristics

(Note 7)

Symbol	Parameter	Conditions	LF412A			LF412			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V <sub>OS</sub>	Input Offset Voltage	R <sub>S</sub> =10 kΩ, T <sub>A</sub> =25°C		0.5	1.0		1.0	3.0	mV
ΔV <sub>OS</sub> /ΔT	Average TC of Input Offset Voltage	R <sub>S</sub> =10 kΩ (Note 8)		7	10		7	20	μV/°C
I <sub>OS</sub>	Input Offset Current	V <sub>S</sub> =±15V (Notes 7, 9)	T <sub>j</sub> =25°C	25	100		25	100	pA
			T <sub>j</sub> =70°C		2			2	nA
			T <sub>j</sub> =125°C		25			25	nA
I <sub>B</sub>	Input Bias Current	V <sub>S</sub> =±15V (Notes 7, 9)	T <sub>j</sub> =25°C	50	200		50	200	pA
			T <sub>j</sub> =70°C		4			4	nA
			T <sub>j</sub> =125°C		50			50	nA
R <sub>IN</sub>	Input Resistance	T <sub>j</sub> =25°C		10 <sup>12</sup>			10 <sup>12</sup>		Ω
A <sub>VOL</sub>	Large Signal Voltage Gain	V <sub>S</sub> =±15V, V <sub>O</sub> =±10V, R <sub>L</sub> =2k, T <sub>A</sub> =25°C	50	200		25	200		V/mV
		Over Temperature	25	200		15	200		V/mV
V <sub>O</sub>	Output Voltage Swing	V <sub>S</sub> =±15V, R <sub>L</sub> =10k	±12	±13.5		±12	±13.5		V
V <sub>CM</sub>	Input Common-Mode Voltage Range		±16	+19.5		±11	+14.5		V
				-16.5			-11.5		V
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio	R <sub>S</sub> ≤10k	80	100		70	100		dB
PSRR	Supply Voltage Rejection Ratio	(Note 10)	80	100		70	100		dB
I <sub>S</sub>	Supply Current	V <sub>O</sub> = 0V, R <sub>L</sub> = ∞		3.6	5.6		3.6	6.5	mA

**Note 2:** "Absolute Maximum Ratings" indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is functional, but do not guarantee specific performance limits.

## AC Electrical Characteristics

(Note 7)

Symbol	Parameter	Conditions	LF412A			LF412			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
	Amplifier to Amplifier Coupling	T <sub>A</sub> =25°C, f=1 Hz-20 kHz (Input Referred)		-120			-120		dB
SR	Slew Rate	V <sub>S</sub> =±15V, T <sub>A</sub> =25°C	10	15		8	15		V/μs
GBW	Gain-Bandwidth Product	V <sub>S</sub> =±15V, T <sub>A</sub> =25°C	3	4		2.7	4		MHz