

**LANGER**  
EMV-Technik

# IC TEST SYSTEM

Benutzerhandbuch  
Probe Set

HF-Power Feldeinkopplung 1 GHz  
Set P1401 / P1501

Magnetfeld:  
**P1401**

E-Feld:  
**P1501**



**CE**

---

Speisung aus HF-Leistungsverstärker

<b>Inhalt:</b>	<b>Seite</b>
<b>1 HF-Feldquellen für elektrisches Feld und magnetisches Feld</b>	<b>3</b>
1.1 Aufbau der Magnetfeldquelle P1401	6
1.2 Funktion der Magnetfeldquelle P1401	7
1.2.1 Messung des Stromes $i_p$ im Stromleiter der Feldquelle	8
1.2.2 Berechnung des Stromes $i_p$ aus der Vorwärtsleistung des Leistungsverstärkers	9
1.2.3 Zeitlicher und räumlicher Verlauf des Probestromes $i_p$	10
1.2.4 Anpassung der Feldquelle	11
1.2.5 Störmechanismus des Magnetfeldes B	11
1.2.6 Berechnung des Magnetfeldes B	12
1.2.7 Messung des Magnetfeldes B	13
1.2.8 Messung der Induktion $dB / dt$	15
1.2.9 Induktiver Koppelmechanismus der Feldquelle P1401 zum Test IC	24
1.2.10 Ermittlung der Hauptarten der induktiven Kopplung durch Fallunterscheidung:	25
1.2.11 Stromeinkopplung in den IC	25
1.2.12 Spannungseinkopplung in den IC	26
1.2.13 Oberschwingungen	28
1.2.14 Frequenzgang der HF-Magnetfeldquelle	29
1.2.15 E-Feldunterdrückung der HF-Magnetfeldquelle	32
1.3 Aufbau der E-Feldquelle P1501	33
1.4 Funktion der E-Feldquelle P1501	35
1.4.1 Ermittlung der Spannung $U_p$ an der Elektrode der Feldquelle	36
1.4.2 Anpassung der Feldquelle	38
1.4.3 Störmechanismus des elektrischen Feldes	38
1.4.4 Berechnung des elektrischen Feldes E	39
1.4.5 Messung des elektrischen Feldes E	40
1.4.6 Messung der Änderung des elektrischen Feldes $dE/dt$	42
1.4.7 Kapazitiver Koppelmechanismus der Feldquelle P1501 zum Test-IC	48
1.4.8 Störspannungsübertragung in den Test-IC	50
1.4.9 Störstromübertragung in den Test-IC	50
1.4.10 Oberschwingungen	52
1.4.11 Frequenzgang der Feldquelle P1501	52
1.5 Aufbau des Prüfplatzes / Systemaufbau	55
1.6 Durchführung der Prüfung	57
1.6.1 Prüfablauf	58
1.7 Überprüfung der Kurvenform	58
<b>2 Sicherheitshinweise</b>	<b>59</b>
<b>3 Gewährleistung</b>	<b>60</b>
<b>4 Technische Daten</b>	<b>60</b>
4.1 Eigenschaften	60
4.1.1 Eigenschaften der Magnetfeldquelle P1401	60
4.1.2 Eigenschaften der E-Feldquelle P1501	62
<b>5 Lieferumfang</b>	<b>63</b>

# 1 HF-Feldquellen für elektrisches Feld und magnetisches Feld

Die Probes **P1401** und **P1501** sind Feldquellen. Sie dienen der Erzeugung von elektrischen (E) oder magnetischen (H, B) HF-Feldern. Die Feldquellen dienen der definierten und reproduzierbaren HF-Feldeinkopplung in IC-Gehäuse. Die Feldquellen können nur in Verbindung mit einem Leistungsverstärker betrieben werden.

Praktischer Hintergrund ist die HF-Störfestigkeit von elektronischen Systemen. Diese werden einer Prüfung nach Norm (IEC 61000-4-3) unterzogen. Bei diesen Prüfungen wird HF-Power mit verschiedenen Verfahren in die elektronischen Systeme eingekoppelt. Zum Beispiel wird bei der BCI-Methode (*Bulk Current Injection*) HF-Strom über einen Stromwandler in den Kabelbaum eingekoppelt. Weiterhin kann über TEM-Zelle, Streifenleitung oder Antenne in geschirmten Räumen HF-Strahlung in ein elektronisches System gekoppelt werden.

Für die EMV-Charakterisierung von ICs gibt es nach der EMV-Norm für IC (IEC 62132) drei typische Messverfahren: die DPI- (Direct Power Injection), die TEM-Cell-Methode (Transverse Electromagnetic Cell) und die Beaufschlagung mit einer Streifenleitung (IC-Stripline).

Alle diese Verfahren erzeugen auf den Flachbaugruppen der elektronischen Systeme elektrische und magnetische HF-Felder. Diese Felder wirken auf der Oberfläche der Flachbaugruppe und durchsetzen auch die Gehäuse der ICs. Wenn die Felder die ICs durchdringen, werden in den ICs Störgrößen erzeugt. Die Beeinflussung der ICs über magnetische oder elektrische Felder ist ein wesentlicher Störmechanismus neben den leitungsgebundenen HF-Leistungseinkopplungen über die DPI-Methode<sup>1</sup> (IEC 62132). Ein IC in einem elektrischen System wird im Allgemeinen nur entweder von elektrischem oder magnetischem Feld gestört. Die Schwachstelle im IC wird im Allgemeinen nur von einer Feldart angesprochen.

Die Feldquelle **P1401** erzeugt magnetisches HF-(Power) Feld und die Feldquelle **P1501** erzeugt elektrisches HF-Power Feld.

Mit der Feldquelle **P1401** kann der Test-IC eindeutig auf Schwachstellen für magnetisches HF-Feld und mit der Feldquelle **P1501** eindeutig auf Schwachstellen für elektrisches HF-Feld getestet werden. Dabei auftretende Fehlermechanismen können über das Monitoring des Test-ICs aufgeklärt werden. Dazu zählen das Oszillographieren von Fehlerabläufen an IC-Pins sowie das Auswerten von internen Fehlerregistern in ICs. Diese Tests sind Basis für eine EMV-gerechte Entwicklung von ICs.

Die Dimensionierung der Feldquellen orientiert sich an den Einkoppelmechanismen von HF-Feldern in ICs. Die dabei vorliegenden Feldorientierungen sind die Grundlage für den Aufbau der Feldquellen (**Bild 1**, **Bild 2**).

Entscheidend ist die Formung der HF-Felder im Platzierungsraum der ICs auf der elektronischen Baugruppe. Der Platzierungsraum ist der Raum in dem der Test-IC auf der Oberfläche der Flachbaugruppe angeordnet werden kann. Das Feld in diesem Platzierungsraum wird im Wesentlichen vom inneren metallischen Aufbau (Layout) der Flachbaugruppe bestimmt. Im Allgemeinen besitzen Flachbaugruppen im Inneren durchgehende Kupferlagen. Die Felder werden durch die Kupferlagen der Flachbaugruppe geformt.

---

<sup>1</sup> Leitungsgebundene EFT/Burst Tests von ICs erfolgen mit der Probe-Familie P500 (**Probe Set HF-Power Einkopplung Analyse**) der Langer EMV-Technik GmbH

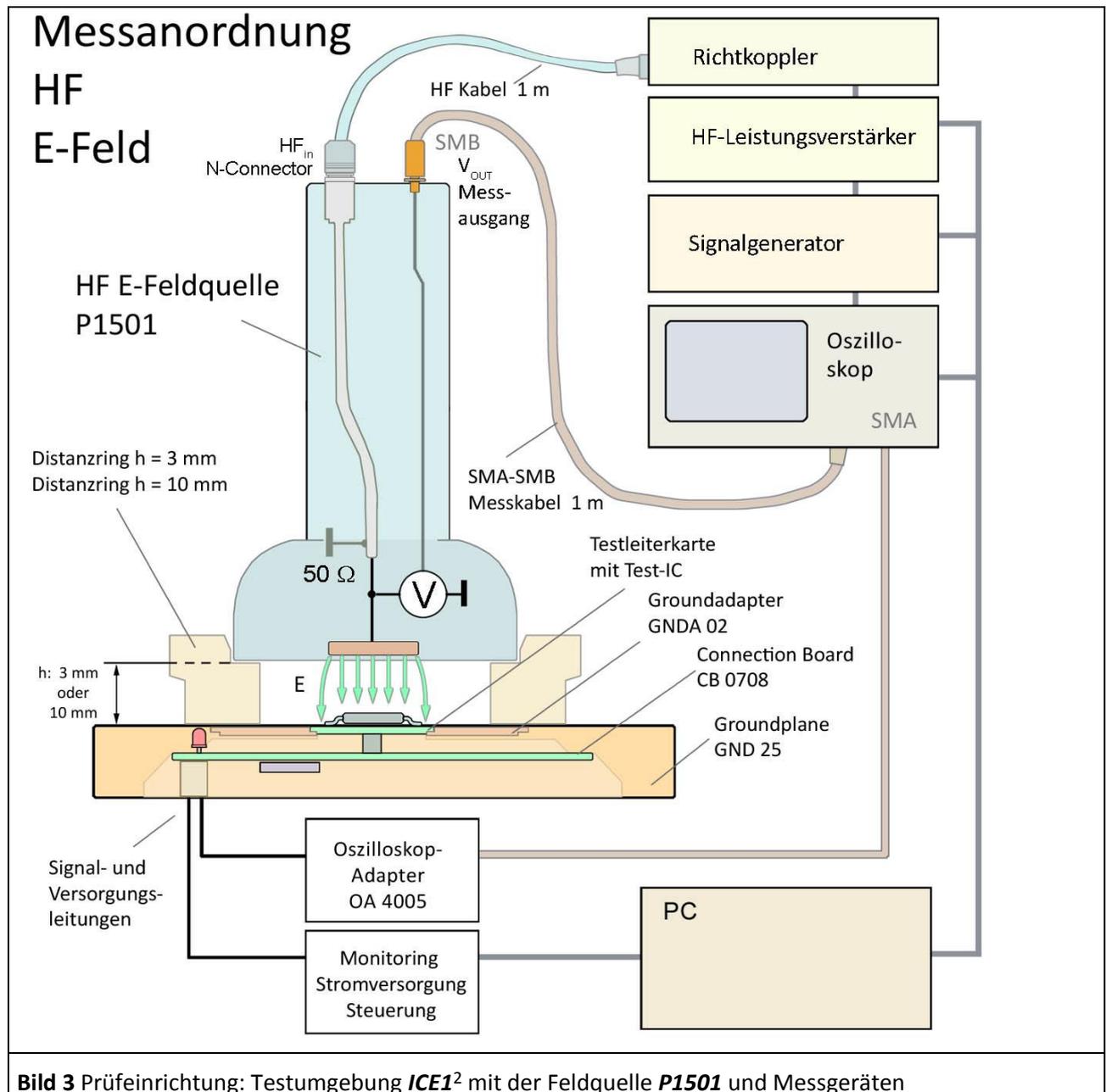
<p><b>Bild 1</b> Magnetfeldausbildung an Flachbaugruppen: Ein Leiter neben der Flachbaugruppe wird vom HF-Strom <math>i_{Stör}</math> durchflossen und erzeugt ein Störmagnetfeld <math>B</math>. Die Kupferlage richtet das Feld im Platzierungsraum parallel zur Oberfläche der Flachbaugruppe aus.</p>	<p><b>Bild 2</b> Magnetfeldausbildung an Flachbaugruppen: Die Flachbaugruppe wird vom HF-Strom <math>i_{Stör}</math> durchflossen und erzeugt ein Störmagnetfeld <math>B</math>. Die Metalllage (Kupferlage) richtet das Feld im Platzierungsraum parallel zur Oberfläche der Flachbaugruppe aus.</p>

Magnetfelder werden durch den Feldverdrängungseffekt (Feldauslöschung durch Wirbelstromfelder) parallel zur Flachbaugruppe ausgerichtet (**Bild 1** und **Bild 2**). Die ICs im Platzierungsraum sind diesen gerichteten Feldern ausgesetzt. Die Feldlinien sind parallel zum IC-Gehäuse orientiert. Diese Magnetfeldorientierung muss durch die Feldquellen nachgebildet werden (**Bild 5**). Dagegen kommen orthogonal zum IC-Gehäuse orientierte Feldlinien nur in Spezialfällen vor. Diese orthogonalen Felder können mit den Magnetfeldsonden der **Sets RF 1**, und **RF 2** und der speziellen Feldquelle **BS 06BD-s** der Langer EMV-Technik GmbH erzeugt werden.

Elektrische Felder treten immer orthogonal zu metallischen Flächen aus. Daraus folgt, dass Kupferlagen in einer Flachbaugruppe ein orthogonal orientiertes Feld erzwingen. E-Feldquellen müssen dieses orthogonal zur Flachbaugruppe und zum Test-IC gerichtete Feld nachbilden (**Bild 3**). Lokal können elektrische HF-Felder mit der E-Feldsonde **RF-E 05** der Langer EMV-Technik GmbH erzeugt werden.

Die Feldquellen **P1401** und **P1501** werden von einem Leistungsverstärker gespeist. Dabei entspricht der Zeitverlauf der Felder dem vom Leistungsverstärker eingespeistem Strom bzw. der angelegten Spannung. Der in die Feldquellen **P1401** eingespeiste Strom wird innerhalb der Feldquelle mit einem Shunt gemessen und steht als Messsignal am Messausgang zur Verfügung. Bei der Feldquelle **P1501** wird die in der Feldquelle anstehende Spannung innerhalb der Feldquelle gemessen. Das Messsignal steht am Messausgang der Feldquelle zur Verfügung.

**Dabei ist zu beachten, dass der Leistungsverstärker bei der Feldquelle P1401 im Kurzschluss und bei der P1501 im Leerlauf betrieben wird. Der verwendete Leistungsverstärker muss kurzschlussfest und leerlauffest sein.**



Die Prüfeinrichtung besteht aus einer Feldquelle des Probe Sets HF-Feldeinkopplung 1 GHz, der *IC-Testumgebung ICE1*<sup>3</sup> und Messgeräten.

Schreibweisen:

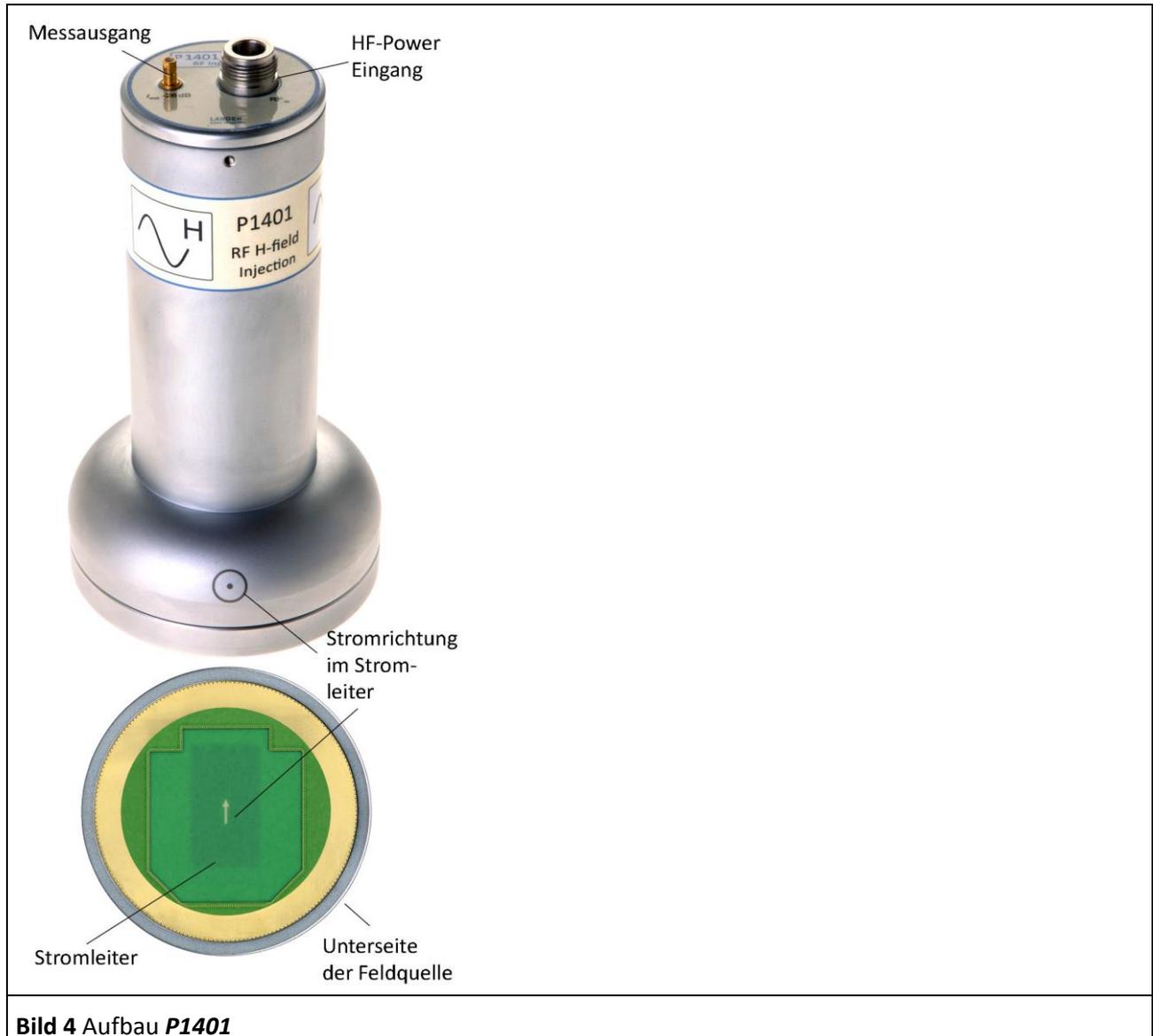
- $u, u(t), E(t)$ : Zeitverläufe
- $U, E$ : Effektivwerte
- $U_{MAX}, \hat{U}$ : Scheitelwerte
- $\text{dB} / \text{dt}$ :  $\dot{B}$

Der Messaufbau zur Einkopplung von HF- Magnetfeldern unterscheidet sich hierbei nur durch die verwendete Feldquelle.

<sup>2</sup> Groundadapter *GNDA 02*, Groundplane *GND 25* und Connection Board *CB 0708* sind in der *IC-Testumgebung ICE1* enthalten. [www.langer-emv.de](http://www.langer-emv.de) Die Testleiterkarte ist in der „Anleitung IC-Test“ beschrieben, mail@langer-emv.de.

<sup>3</sup> [www.langer-emv.de](http://www.langer-emv.de)

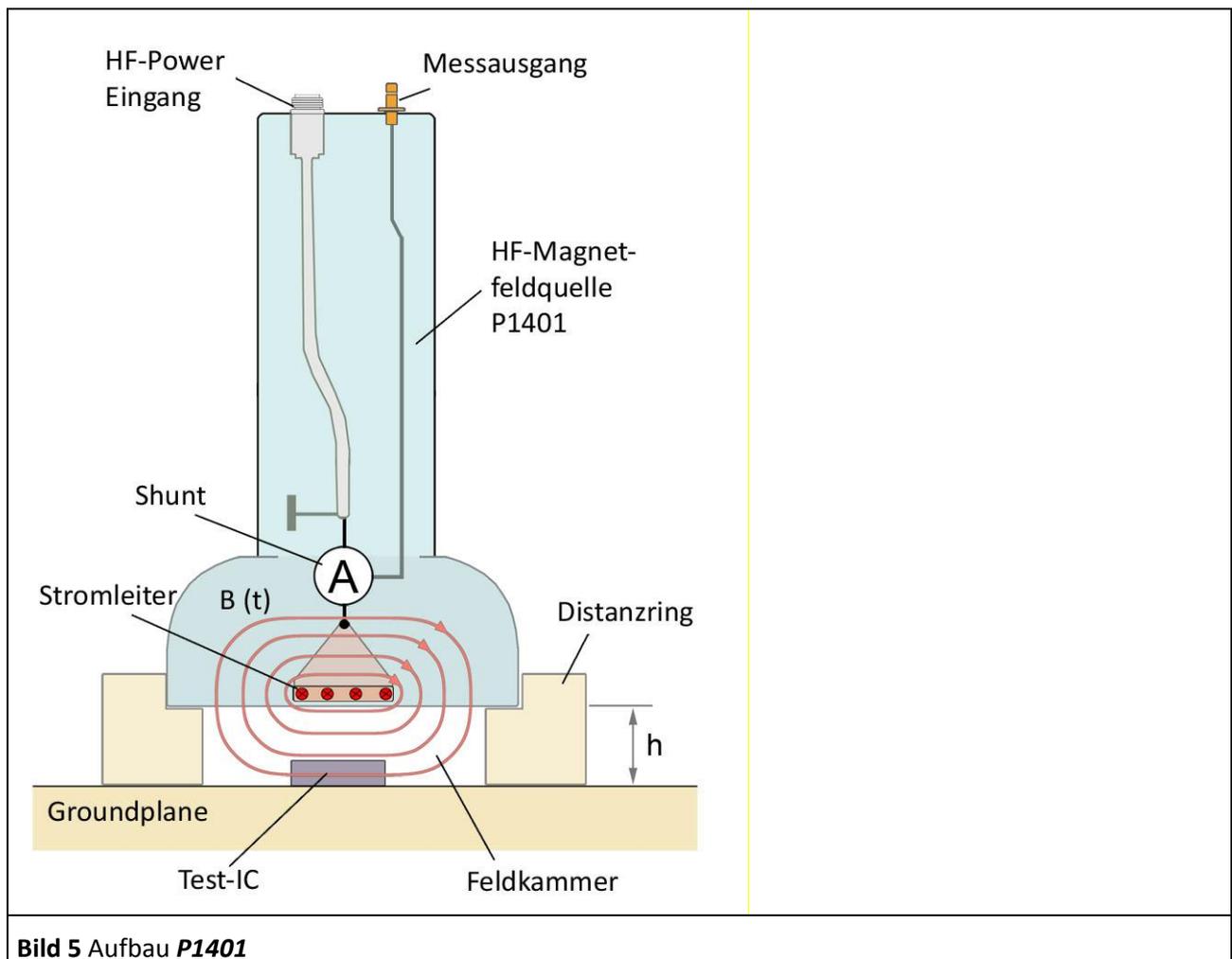
## 1.1 Aufbau der Magnetfeldquelle P1401



**Bild 4** Aufbau **P1401**

An der Oberseite besitzt die Feldquelle einen HF-Power Eingang (N-Connector) zum Anschluss eines HF-Leistungsverstärkers. Der HF-Power Eingang ist im Inneren der Feldquelle mit dem Stromleiter verbunden (**Bild 4**). Der Stromleiter befindet sich am Boden der Feldquelle. Dort ist das Ende des Stromleiters mit dem GND der Feldquelle verbunden und erzeugt damit einen Kurzschluss im HF-Stromweg. Der Kurzschlussstrom im Stromleiter erzeugt das HF-Prüf-Magnetfeld. Das HF-Magnetfeld tritt an der Unterseite der Feldquelle aus. Im Stromweg der Feldquelle befindet sich ein Strommesser (Shunt) zum Messen des HF-Stromes ( $I_p$ ) (**Bild 5**). Die Ausgangsspannung des Shunts steht am Messausgang der Feldquelle an. Der Messausgang ist in der Feldquelle mit  $50 \Omega$  abgeschlossen. Das vom Stromleiter der Feldquelle erzeugte Magnetfeld wird von der Feldkammer umschlossen. Die Feldkammer wird aus der Unterseite der Feldquelle, dem Distanzring und der Groundplane gebildet. Der Test-IC befindet sich in der Feldkammer. Er ist auf der Testleiterkarte aufgebracht (**Bild 3**). Die Testleiterkarte ist in den entsprechenden Groundadapter **GND A 02** eingesetzt. Der Groundadapter passt in die dafür vorgesehene Aussparung der Groundplane **GND 25**.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Groundadapter **GND A 02** und Groundplane **GND 25** sind in der **IC-Testumgebung ICE1** enthalten. [www.langer-emv.de](http://www.langer-emv.de) Die Testleiterkarte ist in der „Anleitung IC-Test“ beschrieben.



**Bild 5** Aufbau **P1401**

## 1.2 Funktion der Magnetfeldquelle P1401

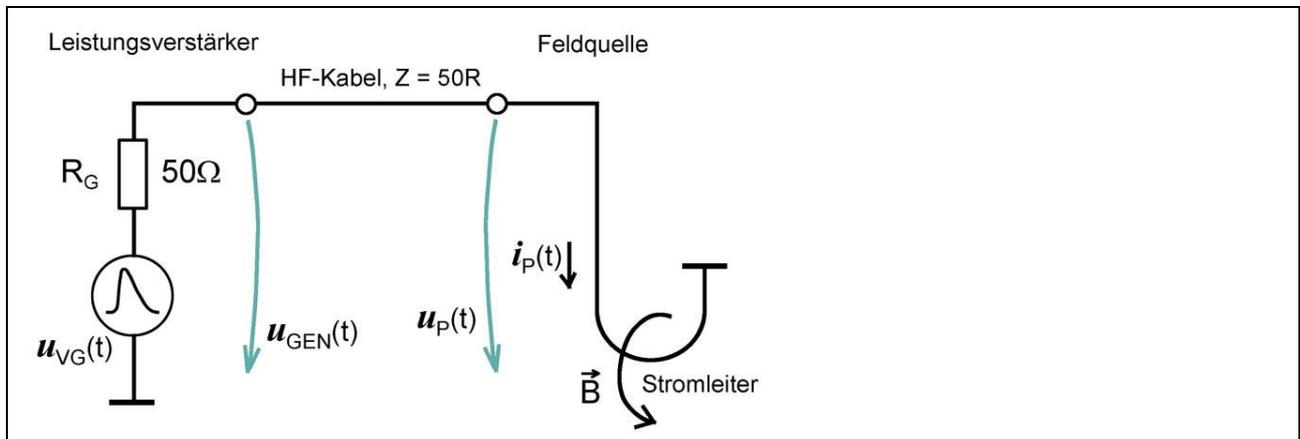
An den HF-Power Eingang wird über ein entsprechendes HF-Kabel der Leistungsverstärker angeschlossen (**Bild 3**). Der HF-Power-Stromweg führt vom Leistungsverstärker über das HF-Kabel zum HF-Power Eingang  $RF_{in}$ . Von dort führt der HF-Power-Stromweg zum Stromleiter und zum Shunt (Ersatzschaltbild **Bild 6**). Der HF-Strom erzeugt in der Umgebung des Stromleiters das Magnetfeld  $B$  mit dem der Test-IC getestet wird (**Bild 5**).

Die Stärke des Magnetfeldes und die induzierte Spannung im Test-IC lassen sich über folgende Wege ermitteln:

- Berechnung des Magnetischen Flusses im Bereich des Test-ICs aus dem gemessenen Strom  $i_p(t)$  und der Probekontanten  $K1$  der Feldquelle
- Berechnung der induzierten Spannung  $u_{ic}(t)$  im Test-IC aus der Koppelinduktivität  $L_h$  vom Stromleiter zum Test-IC und aus  $\omega i_p(t)$
- Berechnung des in den Test-IC übertragenen Stromes  $i_{ic}(t)$  aus dem Probestrom  $i_p(t)$  der Feldquelle und der Probekontanten  $K3$  (Koppelfaktor; siehe **Bild 23**)

### 1.2.1 Messung des Stromes $i_p$ im Stromleiter der Feldquelle

Der Probestrom  $i_p$  der Feldquelle wird zur Berechnung des Magnetfeldes benötigt.



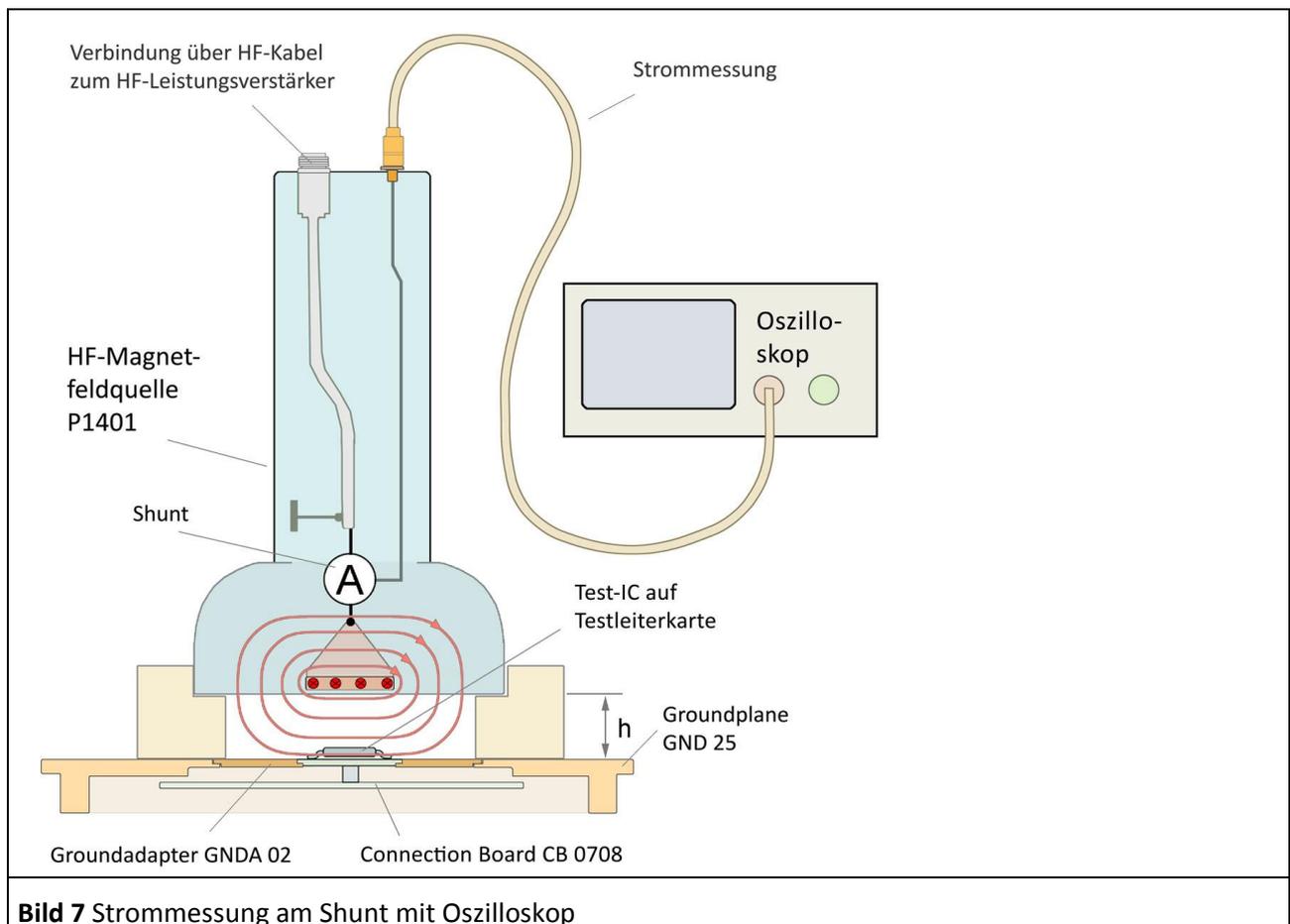
**Bild 6** Ersatzschaltbild mit der Feldquelle **P1401** und einem HF-Leistungsverstärker

Der Strom  $i_p(t)$  wird in der Feldquelle mit einem Shunt (0,1 Ohm) gemessen. Der Messausgang ist auf 50 Ohm angepasst. Um korrekte Messwerte zu erhalten, muss der Eingang des Oszilloskops auf 50 Ohm eingestellt werden. Der Messwert  $u_{AV}$  wird vom Messausgang der Feldquelle mit dem Messkabel SMA-SMB 1m an das Oszilloskop übertragen. Im Vertikalmenü bzw. den Tastkopfeinstellungen des Oszilloskops wird der Attenuator auf 26 dB gestellt (x20) (**Bild 8**). 26 dB ist der Korrekturfaktor des Shunts. Über den Frequenzbereich von 0 – 1 GHz ist die Toleranz des Korrekturfaktors kleiner 1 dB. Der Korrekturfaktor ( $1/ K4(f)$ ) entspricht der invertierten Übertragungsfunktion  $K4(f)$ . Die Übertragungsfunktion  $K4(f)$  des Shunts ist in **Bild 30** dargestellt. Aus **Bild 30** können genauere Korrekturwerte entnommen werden. Der Zusammenhang zwischen der Ausgangsspannung  $U_{AV}$  des Shunts und dem Strom  $I_p$  im Stromleiter ist in **Gl 1** dargestellt.

$$I_p = 1/ K4 * U_{AV}$$

Gl 1

**Es ist darauf zu achten, dass das Messsignal die maximal zulässige Eingangsspannung des Oszilloskops nicht überschreitet.** Gegebenenfalls ist ein externer Attenuator zu verwenden.



**Bild 7** Strommessung am Shunt mit Oszilloskop

### 1.2.2 Berechnung des Stromes $i_p$ aus der Vorwärtsleistung des Leistungsverstärkers

Zur Strommessung  $i_p(t)$  kann gleichzeitig mit einem Richtkoppler die Vorwärtsleistung  $P_{\text{vor}}$  und die Rückwärtsleistung  $P_{\text{rück}}$  gemessen werden. Aus den Messwerten des Richtkopplers lassen sich jedoch die Zeitverläufe nicht darstellen, um eventuell Oberschwingungen zu kontrollieren.

Aus der Vorwärtsleistung kann man den Effektivwert des (Kurzschluss-) Stromes  $I_p$  vereinfacht errechnen zu:

$$I_p = (2 P_{\text{vor}} / R_{\text{Gen}})^{-1/2} \quad \text{Gl 2}$$

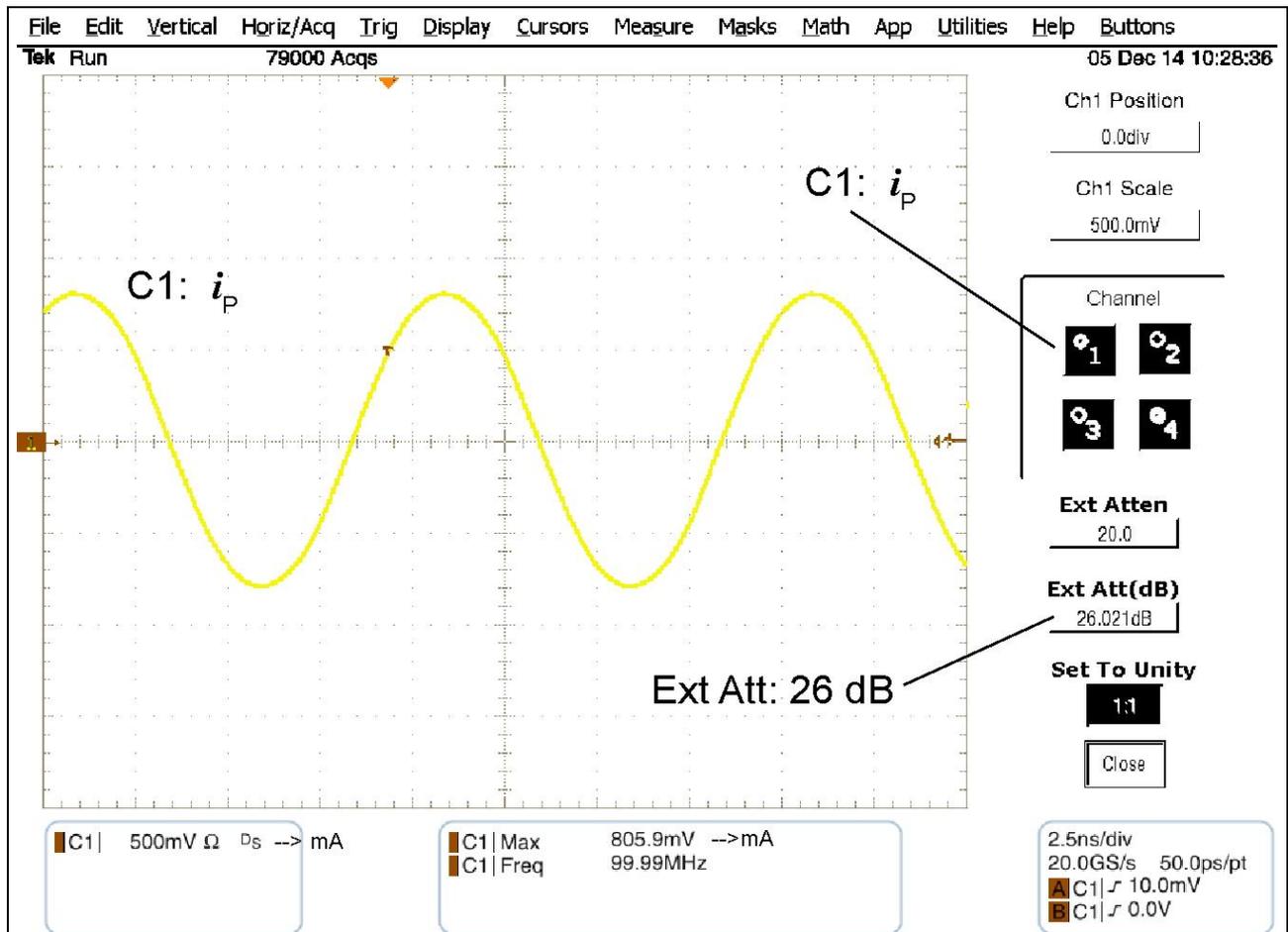
Der Stromverlauf  $i_p(t)$  **Bild 8** wurde bei einer Vorwärtsleistung von 5,4 W gemessen. Im Stromweg liegen nur die 50 Ohm Innenwiderstand  $R_{\text{Gen}}$  des Leistungsverstärkers. Damit lässt sich aus **Gl 2** der Effektivwert des Stromes berechnen:

$$I_p = (2 \cdot 5,4 \text{ W} / 50 \text{ Ohm})^{-1/2} = 460 \text{ mA} \quad \text{Gl 3}$$

Im **Bild 8** ist der gemessene Stromverlauf C1:  $i_p(t)$  dargestellt. Der Scheitelwert  $C1_{\text{Max}}$  ist im unteren mittleren Kasten eingetragen. Er muss in den Effektivwert umgerechnet werden, um ihn mit dem aus der Vorwärtsleistung ermittelten Wert zu vergleichen:

$$805,9 \text{ mA} / 1,414 = 569 \text{ mA}.$$

Der aus der Vorwärtsleistung vereinfacht berechnete Strom  $I_p$  (460 mA) ist ca. 20 % kleiner als der am Shunt der Feldquelle gemessene Strom  $I_p$  (569 mA). Der vereinfacht berechnete Strom ist aufgrund seiner geringen Genauigkeit nur für Abschätzungen verwendbar.



**Bild 8** Am Shunt (0,1 Ohm) gemessener Stromverlauf der Magnetfeldquelle **P1401** bei einer Vorwärtsleistung  $P_{\text{vor}}$  von 5,4 W. Rechts: Einstellung des Shunt-Korrekturfaktors 26 dB im Oszilloskop.

### 1.2.3 Zeitlicher und räumlicher Verlauf des Probestromes $i_p$

Die Feldquelle **P1401** besitzt keinen Abschlusswiderstand im HF-Stromweg. Dadurch ist sie nicht an den Leistungsverstärker angepasst. Durch den fehlenden Abschlusswiderstand  $R_p$  in der Feldquelle **P1401** entsteht bei gleicher treibender Generatorspannung ( $U_{VG}$ ) der doppelte Strom und damit die doppelte Störfähigkeit als üblicherweise in einem mit 50 Ohm abgeschlossenen System.

Durch den fehlenden Abschluss entstehen Reflexionsvorgänge, die stehende Stromwellen im Zuführungskabel zum Leistungsverstärker verursachen. **Der verwendete Leistungsverstärker muss Leerlauf- und Kurzschlussfest sein.**

Wenn die Frequenz hoch genug ist, können sich auf dem Stromleiter der Feldquelle **P1401** stehende Stromwellen ausbilden. Bis zur maximalen Frequenz der Feldquelle von 1 GHz ist dieser Effekt gering. Bei 1 GHz ist die viertel Wellenlänge der stehenden Stromwelle ca. 7,5 cm. Sie ist größer als die Länge des Stromleiters (4 cm). Damit ist die Stromverteilung über den Stromleiter bis 1 GHz hinreichend konstant. Beim Betreiben der Feldquelle über 1 GHz können Nullpunkte in der Stromwelle auf dem Stromleiter auftreten (**Bild 29**).

Der zeitliche und räumliche Verlauf des Störstroms übertragen sich proportional auf das Magnetfeld. Das bedeutet, dass bei ca. 1 GHz der Strom zwischen Mitte und Anfang des 4 cm langen Stromleiters leicht abnimmt.

### 1.2.4 Anpassung der Feldquelle

Die Feldquelle **P1401** ist nicht an den Leistungsverstärker angepasst. Der Leistungsverstärker arbeitet im Kurzschluss (**kurzschlussfester Leistungsverstärker erforderlich**). Durch den nicht vorhandenen 50 Ohm Abschluss in der Feldquelle **P1401** entstehen Reflexionsvorgänge. Diese Reflexionsvorgänge erzeugen stehende Strom- und Spannungswellen im HF-Stromweg der Feldquelle und auf dem Kabel zum Leistungsverstärker.

Durch den **nicht** vorhandenen Abschlusswiderstand  $R_p$  in der Feldquelle **P1401** kann der doppelte magnetische Fluss erzeugt werden als im 50 Ohm abgeschlossenen Betrieb. Weiterhin muss in der Feldquelle keine Verlustleistung abgeführt werden.

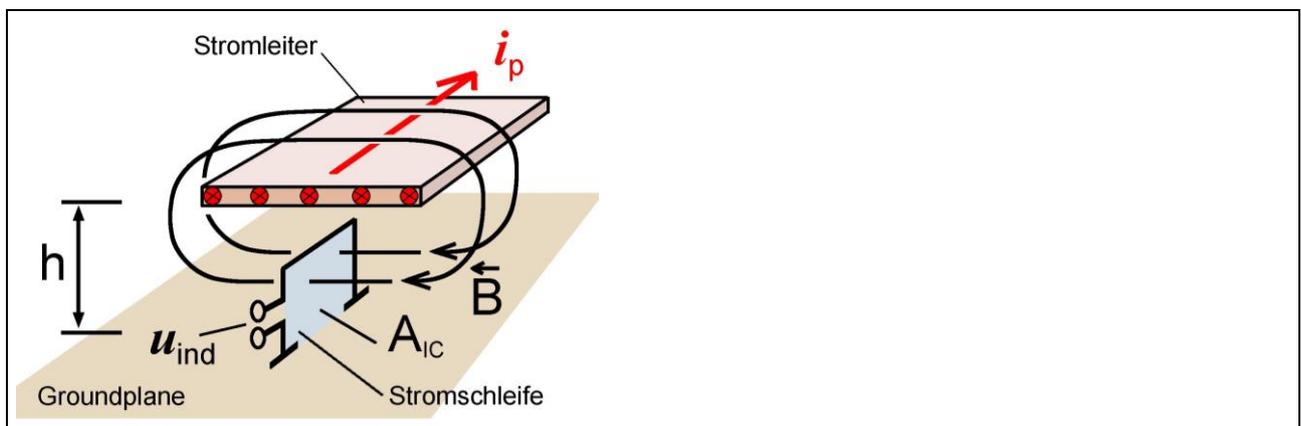
Der zeitliche Verlauf des Störstromes überträgt sich proportional auf das magnetische Feld.

### 1.2.5 Störmechanismus des Magnetfeldes B

Durch den HF-Stromfluss im Stromleiter der Feldquelle wird ein Wirbelmagnetfeld in der Feldkammer erzeugt. Das Wirbelmagnetfeld  $B$  durchsetzt den Test-IC (**Bild 4**).

Der Test-IC besitzt im Inneren Stromschleifen (**Bild 9**). Die größten Stromschleifen des Test-ICs werden aus den Bestandteilen: Pins, Bonddrähte, Leadframes, Die und der Groundplane gebildet.  $A_{IC}$  ist der Querschnitt der Stromschleife. Das Wirbelmagnetfeld  $B$  durchsetzt die Stromschleife und induziert in ihr die Störspannung  $u_{ind}$ .

Die induzierte Störspannung  $u_{ind}$  kann im Test-IC direkt auf Signale wirken oder einen Störstrom durch den Test-IC treiben. Der Störstrom kann auf Vdd / Vss Versorgungssysteme einwirken und Fehler auslösen bzw. Spannungsdifferenzen zwischen verschiedenen Schaltungskomplexen erzeugen.



**Bild 9** Wirkprinzip der Feldeinkopplung in den Test-IC

Die im **Bild 9** dargestellte offene IC-Schleife ist mit dem Widerstand  $R_{IC}$  (nicht abgebildet) geschlossen. Der Widerstand  $R_{IC}$  wird aus Pull-up / Pull-down-, Treiber- und IC-internen Widerständen gebildet. Bei Versorgungsschleifen wird der Widerstand aus dem ohmschen Widerstand des Leitungsnetzes gebildet (**Bild 23**).

Die IC-Schleife des Test-ICs wird am wirkungsvollsten vom Magnetfeld beaufschlagt, wenn das Magnetfeld  $B$  die Schleife orthogonal durchsetzt. Die Schleifen im IC können unterschiedlich orientiert sein. Dies erfordert eine Änderung der Richtung des Magnetfeldes um alle kritischen Schleifen auffinden zu können. Aus diesem Grund kann die Feldquelle innerhalb des Distanzringes gedreht werden. Durch das Drehen wird die Richtung des Magnetfeldes in der Feldkammer entsprechend verändert. Damit können alle relevanten Schleifen des Test-ICs beaufschlagt werden.

Die Richtungen des Störmagnetfeldes sind stufenlos einstellbar. Damit können die über die Pin-Anschlüsse oder im Die unterschiedlich gerichteten Schleifen des Test-ICs je nach Einstellung maximal mit Feld beaufschlagt werden. Damit lässt sich auch die Orientierung kritischer Schleifen des Test-ICs bestimmen.

Die Höhe der induzierten Spannung und die daraus resultierende Störwirkung hängen unter anderem von folgenden Parametern ab:

- die Höhe der eingestellten Vorwärtsleistung des Leistungsverstärkers ( $P_{\text{vor}}$ ,  $U_{\text{VG}}$ )
- Größe der Leiterschleife im Test-IC ( $A_{\text{IC}}$ )
- Abstand ( $h$ ) der Groundplane zum Stromleiter der Feldquelle
- Winkel des Stromleiters zur Leiterschleife

### 1.2.6 Berechnung des Magnetfeldes B

Der vom Stromleiter der Feldquelle erzeugte magnetische Fluss  $\Phi$  ist proportional zum Probestrom  $i_p$ . Dabei ist die Induktivität  $L$  des Stromleiters der Proportionalitätsfaktor.

$$\Phi(t) = L \cdot i(t) \quad \text{Gl 4}$$

Wenn man annimmt, dass die Flussdichte  $B$  unter dem Stromleiter der Feldquelle konstant ist und dort ein Flächenelement  $A_{\text{IC}}$  mit dem zugehörigen Fluss  $\Phi_{\text{IC}}$  betrachtet wird (**Bild 9**), ergibt sich:

$$B(t) = \Phi_{\text{IC}}(t) / A_{\text{IC}} = L_{\text{IC}} \cdot i_p(t) / A_{\text{IC}} = L' \cdot i(t) \quad \text{Gl 5}$$

Dabei ist

$$L' = L_{\text{IC}} / A_{\text{IC}} = K1 \quad \text{Gl 6}$$

der Induktivitätsbelag der Feldkammer unter dem Stromleiter.  
Dieser Induktivitätsbelag ist identisch mit der Probekonstanten  $K1$ .

Der magnetische Fluss im Bereich des Test-ICs lässt sich mit der Probekonstanten  $K1$  analog **Gl 5** mit folgender Gleichung berechnen:

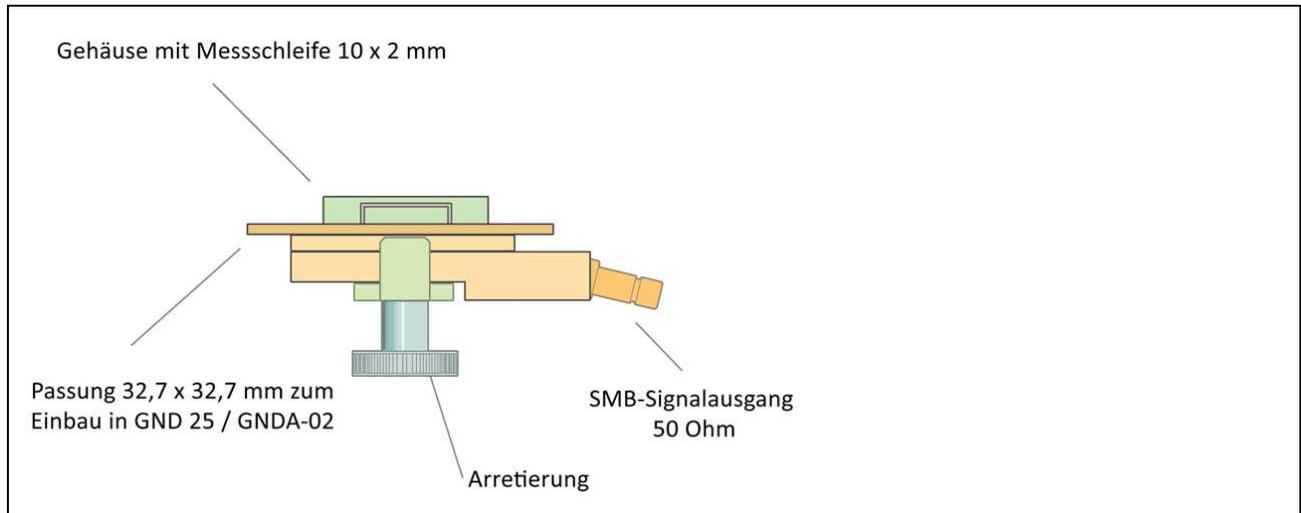
$$B [\mu\text{T}] = K1 \cdot I_p [\text{A}] \quad \text{Gl 7}$$

Dabei ist  $K1$  von der metallischen Gestalt der Feldkammer und des Stromleiters abhängig (**Bild 5**). Die Höhe der Feldkammer kann mit Hilfe der Distanzringe in zwei Höhen (3 mm, 10 mm) eingestellt werden. Alle anderen Abmessungen der Feldkammer und des Stromleiters sind für alle Feldquellen gleich. Dadurch ergeben sich zwei Werte der Probekonstanten  $K1$  der Feldquellen, für die Höhen 3 mm und 10 mm (**Tabelle 2**). In **Tabelle 3** sind Richtwerte der magnetischen Flussdichte aufgelistet.

Diese Konstante  $K1$  ist für alle Magnetfeldquellen (Burst, ESD, HF) des IC-Testsystems der Langer EMV-Technik GmbH gleich.

### 1.2.7 Messung des Magnetfeldes B

Die magnetische Flussdichte B in der Feldkammer am Ort des Test-ICs kann mit dem B-Feldmesser **BFM 02**<sup>5</sup> gemessen werden (**Bild 10**). Der B-Feldmesser wird anstelle der Testleiterkarte in den Groundadapter **GND A 02**<sup>6</sup> eingesetzt. Weiterhin ist der Groundadapter in die Groundplane **GND 25**<sup>7</sup> einzusetzen (siehe Benutzerhandbuch **IC-Testumgebung ICE1**).



**Bild 10** B-Feldmesser zur Messung des magnetischen Flusses B

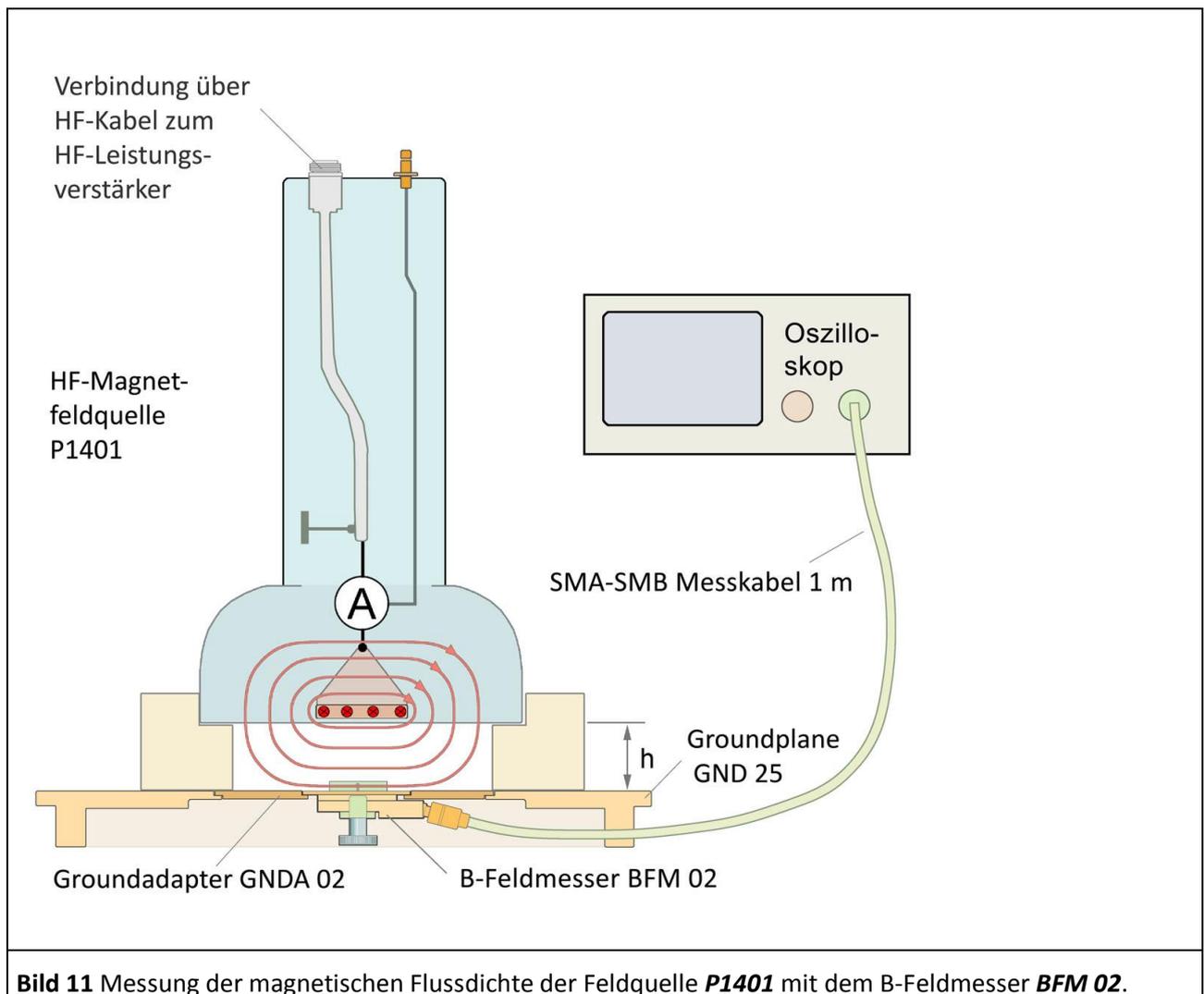
Der SMB-Ausgang des B-Feldmessers wird mittels dem 50 Ohm SMA-SMB Messkabel mit dem Eingang des Oszilloskops verbunden (**Bild 11**). Der Messausgang ist auf 50 Ohm angepasst. Um korrekte Messwerte zu erhalten, muss der Eingang des Oszilloskops auf 50 Ohm eingestellt werden. Der auf dem B-Feldmesser angegebene Attenuatorwert wird im Vertikalmenü oder in den Kanaleinstellungen des Oszilloskops eingetragen. Durch den verwendeten Attenuatorwert wird die Flussdichte im Oszilloskop im  $\mu\text{T}$  angezeigt (oder  $\text{pVs}/\text{mm}^2$ ).

**Es ist darauf zu achten, dass das Messsignal die maximal zulässige Eingangsspannung des Oszilloskops nicht überschreitet.** Gegebenenfalls ist ein externer Attenuator zu verwenden. Bei zu schwachem Signal kann ein Vorverstärker verwendet werden (z.B. **PA 303**, 30 dB; [www.langer-emv.de](http://www.langer-emv.de)).

<sup>5</sup> **BFM 02** nicht im Lieferumfang des Probe Sets enthalten; kann gesondert bestellt werden [www.langer-emv.de](http://www.langer-emv.de)

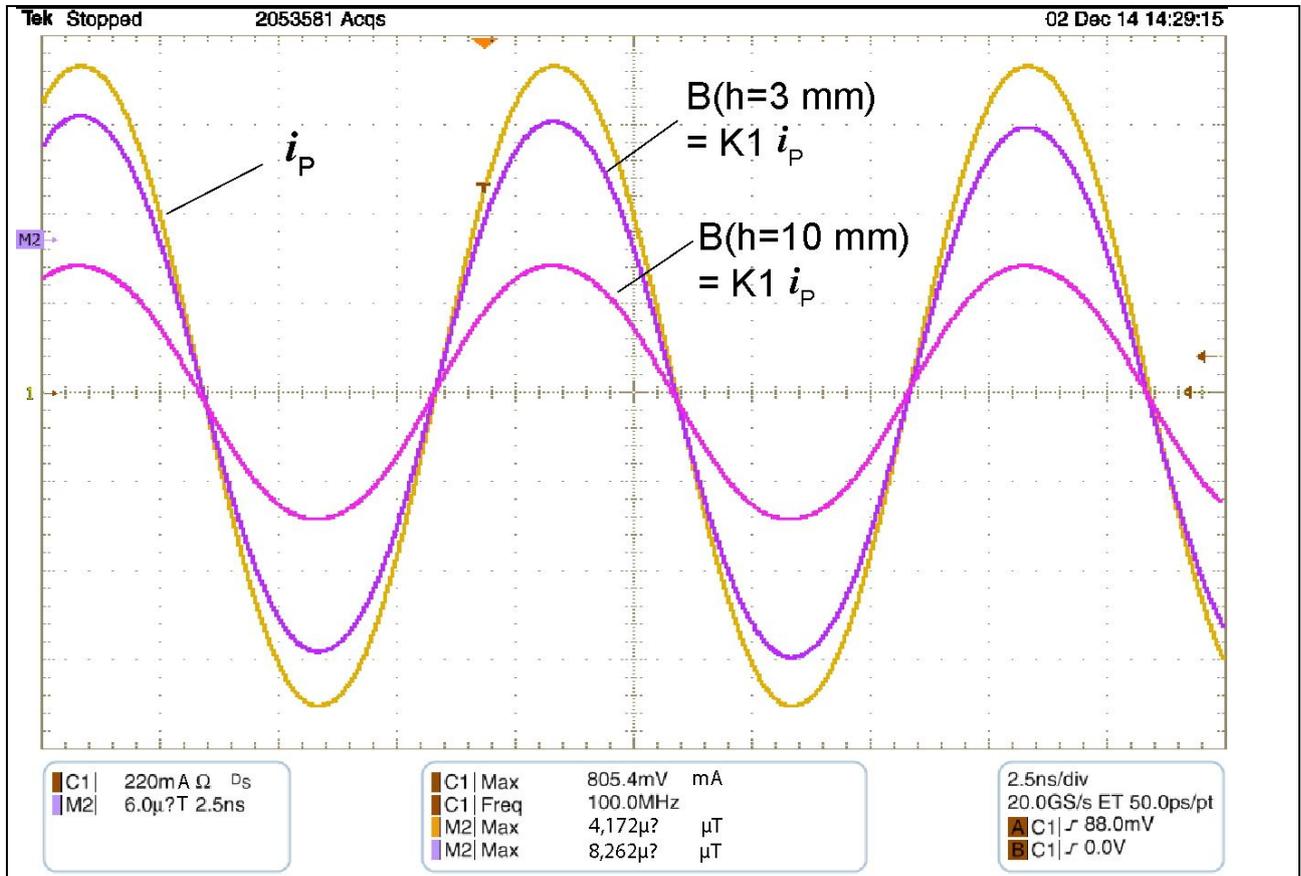
<sup>6</sup> Der **GND A 02** ist im Lieferumfang des **ICE1** enthalten. [www.langer-emv.de](http://www.langer-emv.de)

<sup>7</sup> Die **GND 25** ist im Lieferumfang des **ICE1** enthalten. [www.langer-emv.de](http://www.langer-emv.de)



**Bild 11** Messung der magnetischen Flussdichte der Feldquelle **P1401** mit dem B-Feldmesser **BFM 02**.

Im **Bild 12** sind die Flussdichteverläufe für einen Strom  $I_{pmax} = 805 \text{ mA}$  ( $P_{vor}$  von 5,4 W) und für Distanzring 3 mm und 10 mm dargestellt.



**Bild 12** Flussdichteverlauf B in der Feldkammer am Ort des Test-ICs bei Distanzring 3 mm und 10 mm für die Feldquelle **P1401**.

### 1.2.8 Messung der Induktion dB / dt

Der Wert von  $dB / dt = \dot{B}$  in der Feldkammer am Ort des Test-ICs kann mit dem  $\dot{B}$ -Feldmesser **BPM 02** gemessen werden (**Bild 13**) (technische Daten **Tabelle 5**). Aus  $dB/dt$  ( $\dot{B}$ ) und dem Querschnitt  $A_{IC}$  der Stromschleife des Test-ICs lässt sich die Flussänderung  $d\Phi/dt$  in der IC-Stromschleife des Test-ICs und die im Test-IC induzierte Spannung  $u_{ind}$  errechnen:

$$A_{IC} \cdot dB / dt = d\Phi_{IC} / dt = -u_{ind} = -U_{IC} \quad \text{Gl 8}$$

Im Komplexen gilt:

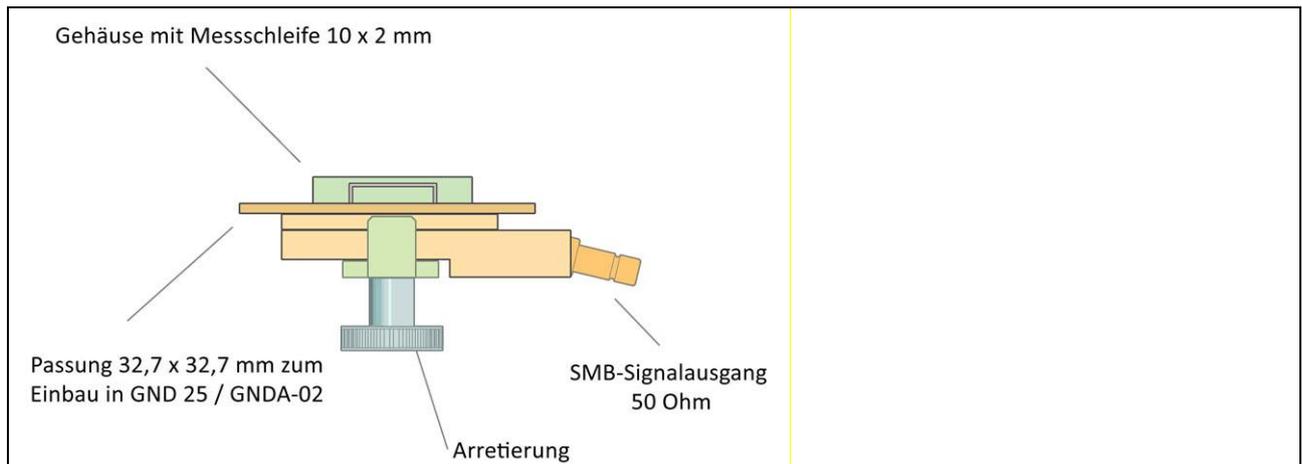
$$A_{IC} \cdot \omega \cdot B = \omega \cdot \Phi_{IC} = -U_{ind} = -U_{IC} \quad \text{Gl 9}$$

Dabei ist  $\Phi_{IC}$  der magnetische Fluss, der die IC-Stromschleife durchsetzt.

Der  $\dot{B}$ -Feldmesser **BPM 02** wird anstelle der Testleiterkarte in den Groundadapter **GND A 02<sup>8</sup>** eingesetzt. Weiterhin ist der Groundadapter in die Groundplane **GND 25<sup>9</sup>** einzusetzen (siehe Benutzerhandbuch **IC-Testumgebung ICE1**).

<sup>8</sup> Der **GND A 02** ist im Lieferumfang des **ICE1** enthalten. [www.langer-emv.de](http://www.langer-emv.de)

<sup>9</sup> Die **GND 25** ist im Lieferumfang des **ICE1** enthalten. [www.langer-emv.de](http://www.langer-emv.de)

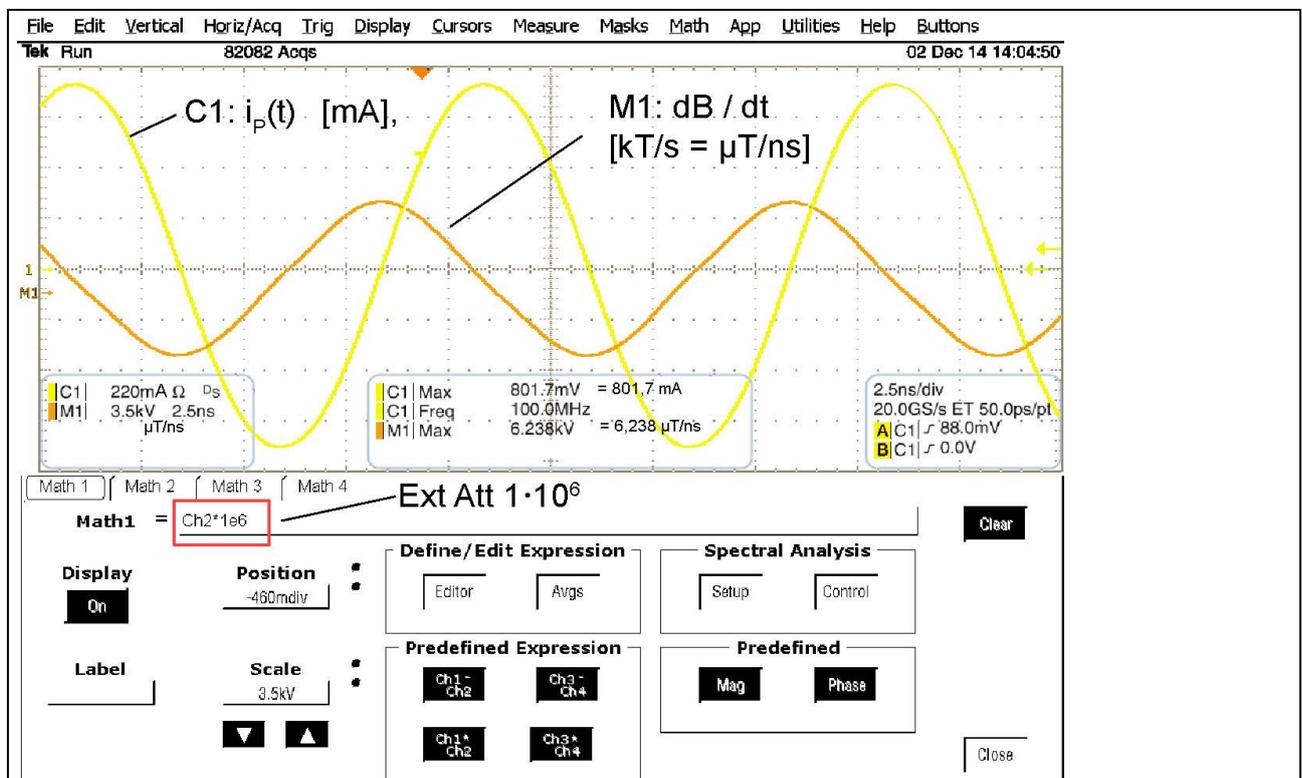


**Bild 13**  $\dot{B}$ -Feldmesser zur Messung des magnetischen Flussdichteänderung  $\dot{B}$

Der SMB-Ausgang des  $\dot{B}$ -Feldmessers wird mit dem 50 Ohm SMA-SMB Messkabel mit dem Eingang des Oszilloskops verbunden (**Bild 15**). Der Messausgang ist auf 50 Ohm angepasst. Um korrekte Messwerte zu erhalten, muss der Eingang des Oszilloskops auf 50 Ohm eingestellt werden. Die im Oszilloskop anstehende Spannung  $U_{AV}$  wird für den  $\dot{B}$ -Feldmesser **BPM 02** mit folgender Gleichung in  $\dot{B}$  umgerechnet (Beträge):

$$\dot{B} = 1 \cdot 10^6 \cdot U_{AV} \quad [T/s] \quad \text{Gl 10}$$

In der Kanaleinstellungen oder in den Mathematikkanal des Oszilloskops muss der Attenuatorwert  $1 \cdot 10^6$  eingetragen werden. Wenn wie im **Bild 14** der Mathematikkanal verwendet wird, muss im Vertikalmenü bzw. den Kanaleinstellungen des angeschlossenen Kanals 0 dB oder x1 eingetragen werden.

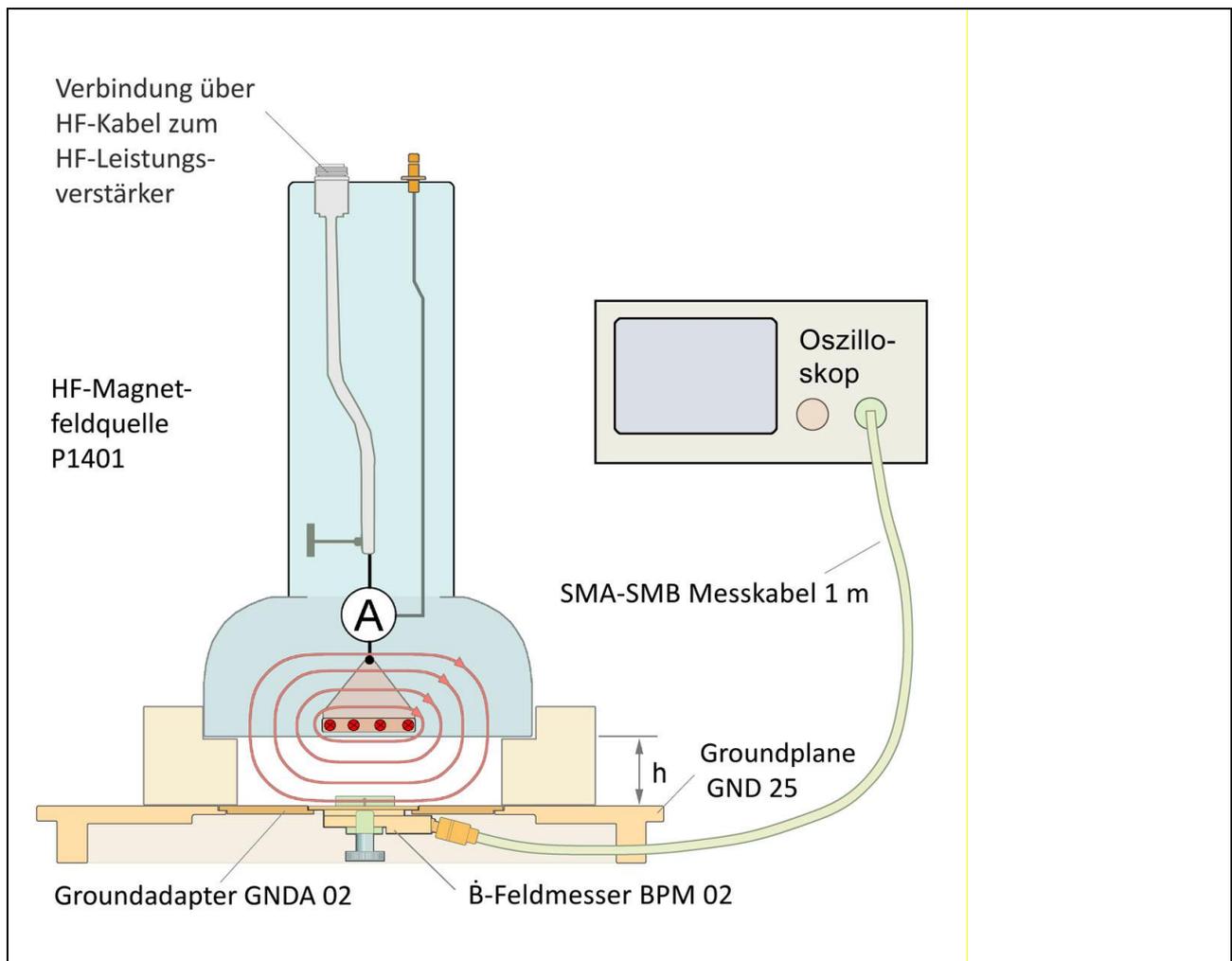


**Bild 14** Einstellung des Attenuatorwertes für den  $\dot{B}$ -Feldmesser **BPM 02** im Mathematikkanal des Oszilloskops, Maßeinheit [T/s]

Die  $\dot{B}$ -Feldmesser der Langer EMV-Technik GmbH werden aufbaubedingt kalibriert. Daher besitzt jeder  $\dot{B}$ -Feldmesser einen eigenen Attenuatorwert. Dieser auf dem  $\dot{B}$ -Feldmesser verzeichnete Attenuatorwert ist zu verwenden.

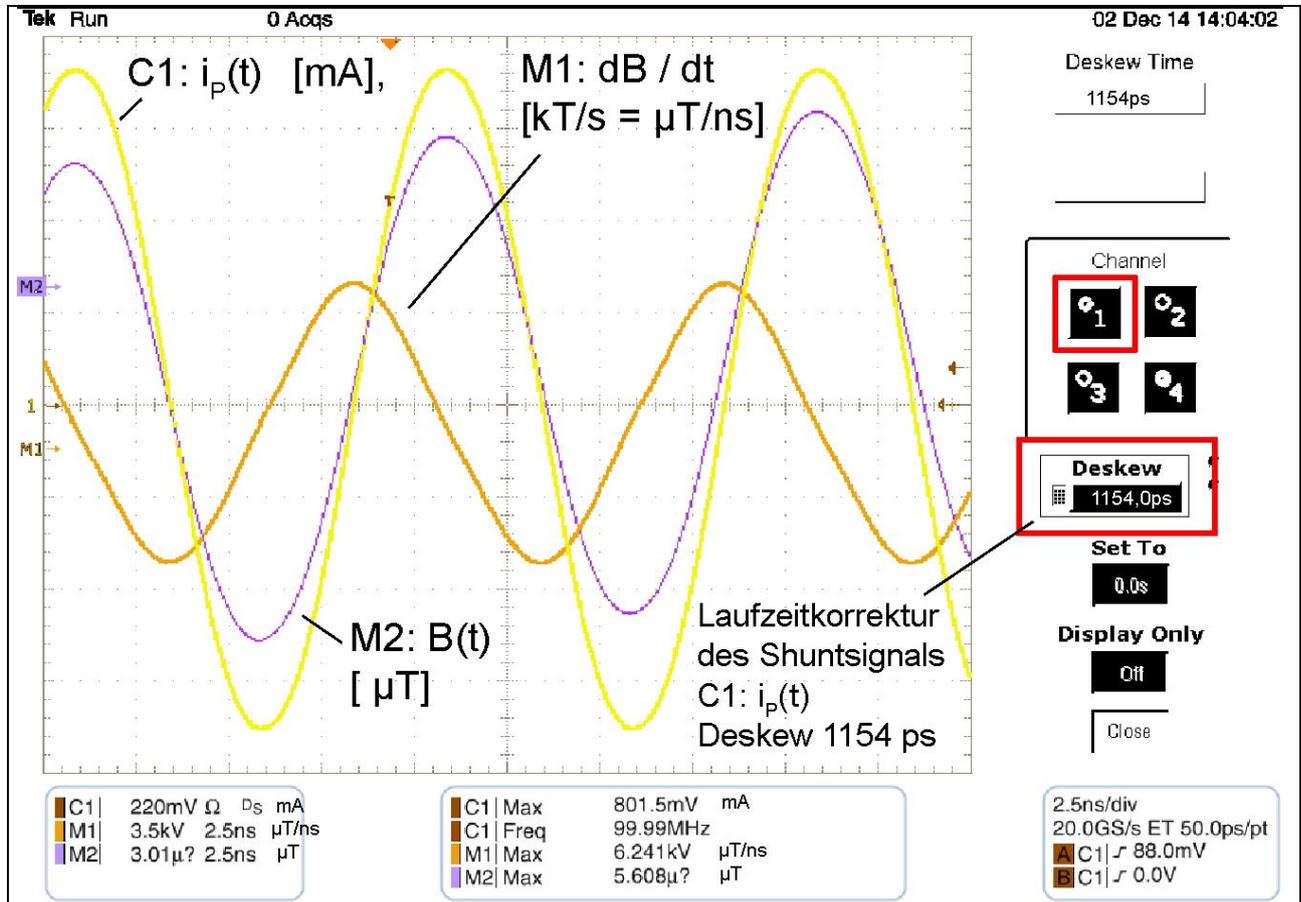
Mit dem verwendeten Attenuatorwert wird  $\dot{B}$  im Oszilloskop in T/s angezeigt. Wenn im Kanal des Oszilloskops die Maßeinheit T oder  $\mu\text{T}$  anstelle von V (Volt) nicht eingestellt wird, erfolgt die Anzeige in V (Volt) bzw. in kV (**Bild 14**). Es wird z.B.  $\dot{B} = 6,238 \text{ kV}$  angezeigt. Diese Darstellung muss mit den entsprechenden Größen im „Meter-Kilogramm-Sekunde-Amper-System“ (MKSA-System) umgewandelt werden, so dass T/s entsteht. T/s lässt sich auflösen in  $\text{Vs}/\text{m}^2 \text{ s}$ . Dabei wird k von kV in  $\mu/\text{n}$  gewandelt. Es entsteht  $\mu\text{Vs}/\text{m}^2 \text{ ns} = \mu\text{T}/\text{ns}$  als Maßeinheit des Kanals.

Es ist darauf zu achten, dass das Messsignal die maximal zulässige Eingangsspannung des Oszilloskops nicht überschreitet. Gegebenenfalls ist ein externer Attenuator zu verwenden. Bei zu schwachem Signal kann ein Vorverstärker verwendet werden (z.B. **PA 303**, 30 dB, www.langer-emv.de).



**Bild 15** Messung von  $\dot{B}$  der Feldquelle **P1401** mit dem  $\dot{B}$ -Feldmesser **BPM 02**.

Wenn zwischen Probestrom  $i_p(t)$  und  $\dot{B}$  im Oszilloskop ein Phasenbezug hergestellt werden soll, sind die Laufzeitverzögerungen des Messzweiges der Feldquelle und des **BPM 02** in die Kanaleinstellungen als Deskew einzutragen. In **Bild 16** ist die Eintragung der Laufzeitverzögerung des Shunt Messzweiges im entsprechenden Menü dargestellt.



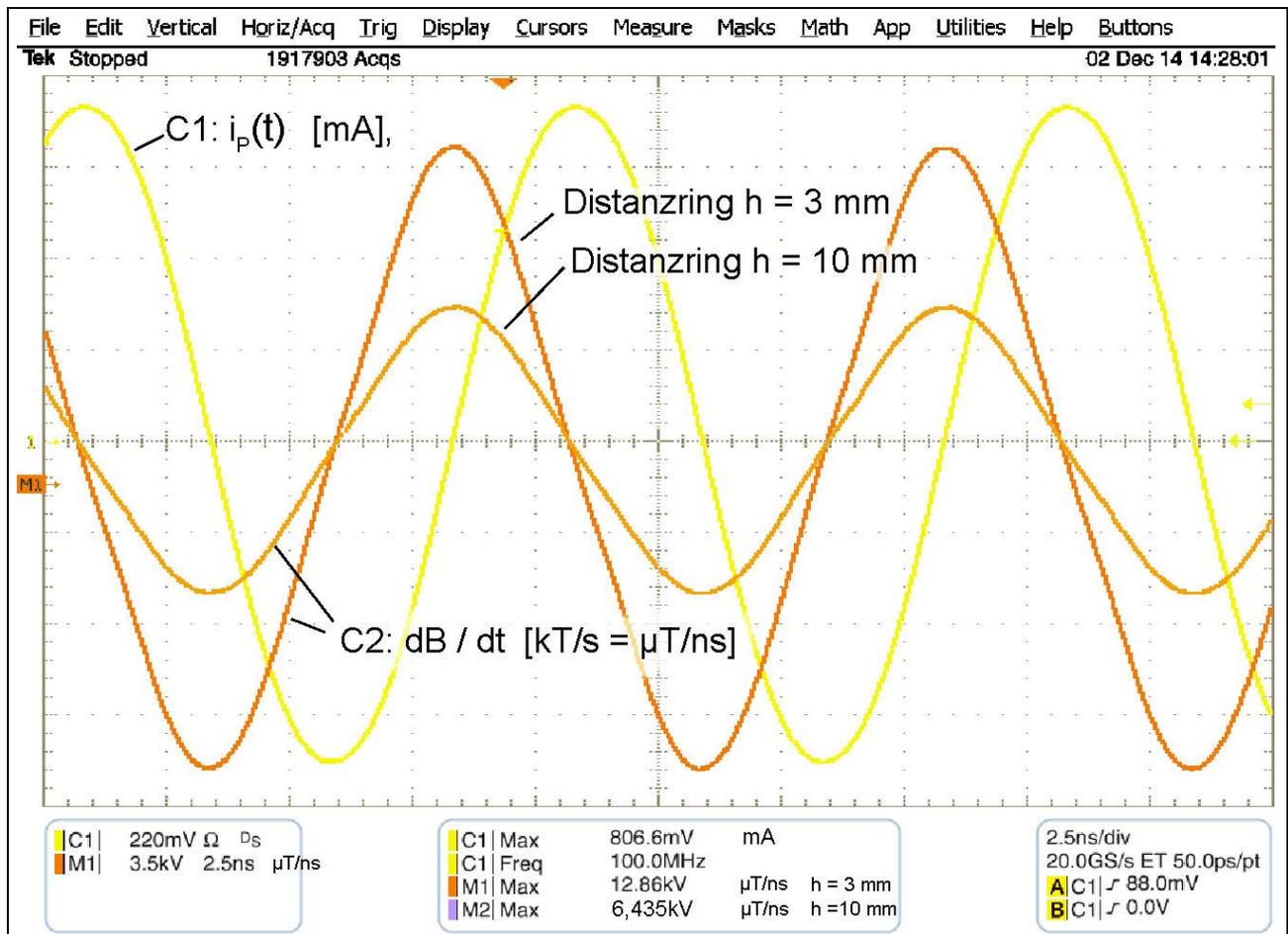
**Bild 16** Laufzeitverzögerungen des Messzweiges vom B-Feld der Feldquelle zum  $U_{AV}$  Ausgang des Shunts werden in das Vertikalmenü als Deskew eingetragen.

Die Laufzeitverzögerung des **BPM 02** (Tabelle 5) wird im zugehörigen Messkanal des Oszilloskops eingetragen. In diesem Fall ist das der Kanal C2. Es wird analog verfahren wie mit Kanal C1. Im **Bild 16** war bereits für den **BPM 02** die Laufzeitverzögerung von 144 ps in das Vertikalmenü bzw. den Kanaleinstellungen von Kanal C2 eingetragen. Damit werden die Phasenbezüge im Oszilloskop korrekt abgebildet. Das ist erkennbar an der 90° Phasenverschiebung von  $dB/dt(t)$  zu  $i_p(t)$  und der Phasengleichheit von  $B(t)$  zu  $i_p(t)$ .

Wenn der Vorverstärker **PA 303**<sup>10</sup> in einen Messkanal eingefügt wird, entsteht eine zusätzliche Signalverzögerung von 440 ps. Für phasenrichtiges Messen ist diese Verzögerung in den Einstellungen des Oszilloskops zu berücksichtigen. In der Praxis kann es erforderlich werden, jeden Messplatz phasenrichtig abzugleichen. Für die Messungen sind gleiche Kabeltypen zu verwenden.

<sup>10</sup> Der Vorverstärker **PA 303** ist nicht im Probe Set enthalten. [www.langer-emv.de](http://www.langer-emv.de)

Im **Bild 17** sind die  $\dot{B}$ -Verläufe für eine Vorwärtsleistung  $P_{\text{vor}}$  von 5,4 W und einem Strom  $I_{\text{pMax}} = 806 \text{ mA}$  für Distanzring 3 mm und 10 mm dargestellt.



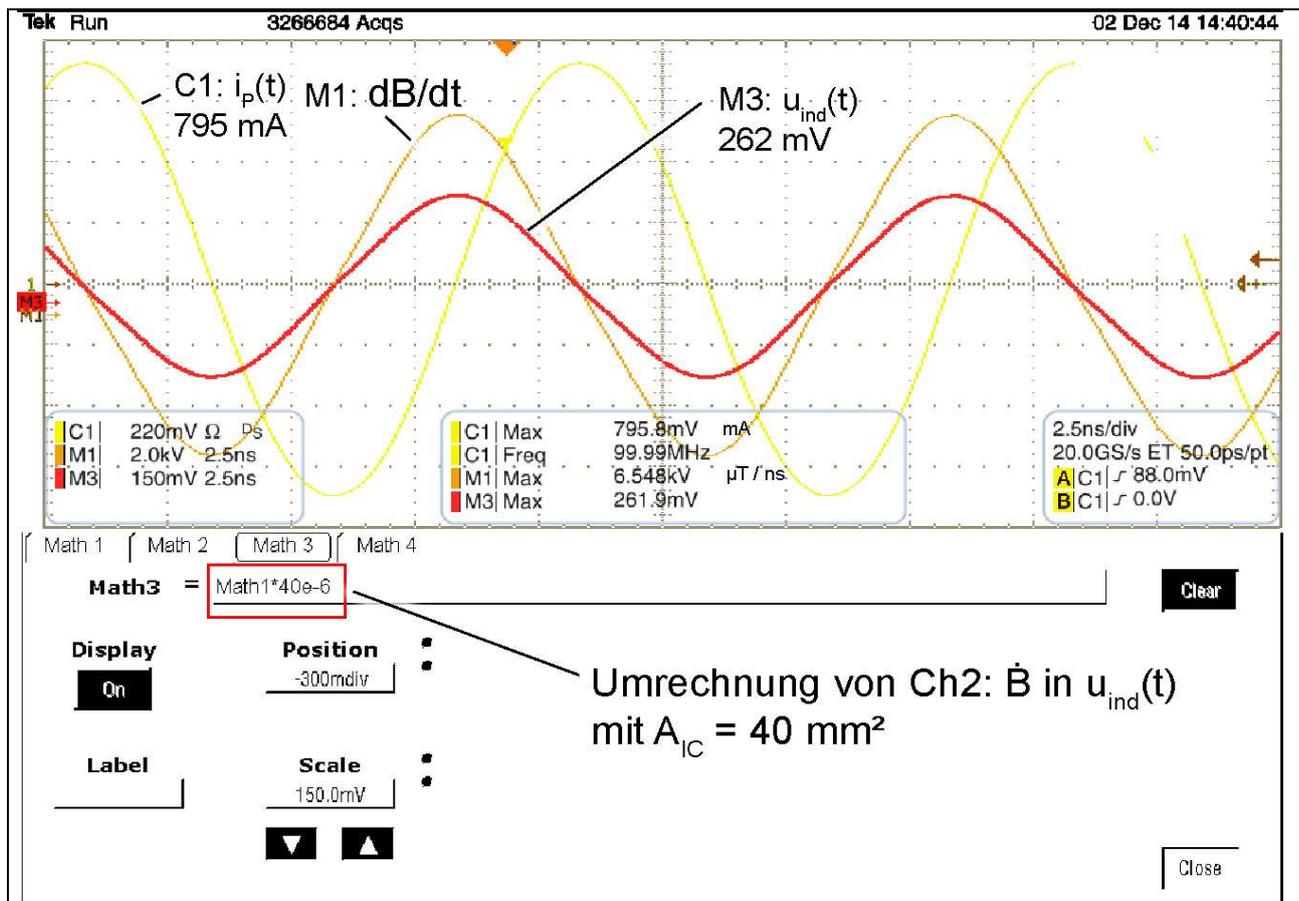
**Bild 17**  $\dot{B}$ -Feldverlauf in der Feldkammer am Ort des Test-ICs bei Distanzring 3 mm und 10 mm für die Feldquelle **P1401**.

Die im IC induzierte Spannung kann ermittelt werden, wenn der wirksame Querschnitt  $A_{\text{IC}}$  der IC-Schleife bekannt ist.

$$U_{\text{ind}} = A_{\text{IC}} [\text{mm}^2] 10^{-6} \cdot \omega \cdot B \text{ (Betragsmäßig)}$$

Gl 11

$u_{\text{ind}}$  kann über eine Mathematikfunktion im Oszilloskop aus  $\dot{B}$  berechnet werden (**Bild 18**).



**Bild 18** Aus  $\dot{B}$  berechnete induzierte Spannung  $u_{ind}$ . Dabei ist:  $A_{IC} = 2 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} = 40 \text{ mm}^2$  der Querschnitt der IC-Schleife,  $\dot{B}$  wird mit der Feldquelle **P1401** erzeugt die Distanzringhöhe beträgt 10 mm, der Leistungsverstärker speist  $i_p = 795 \text{ mA}$  in die Feldquelle ( $P_{vor} 5,16 \text{ W}$ ;  $P_{rück} 4,54 \text{ W}$ ). Es wird eine Spannung von 262 mV in der IC-Schleife induziert

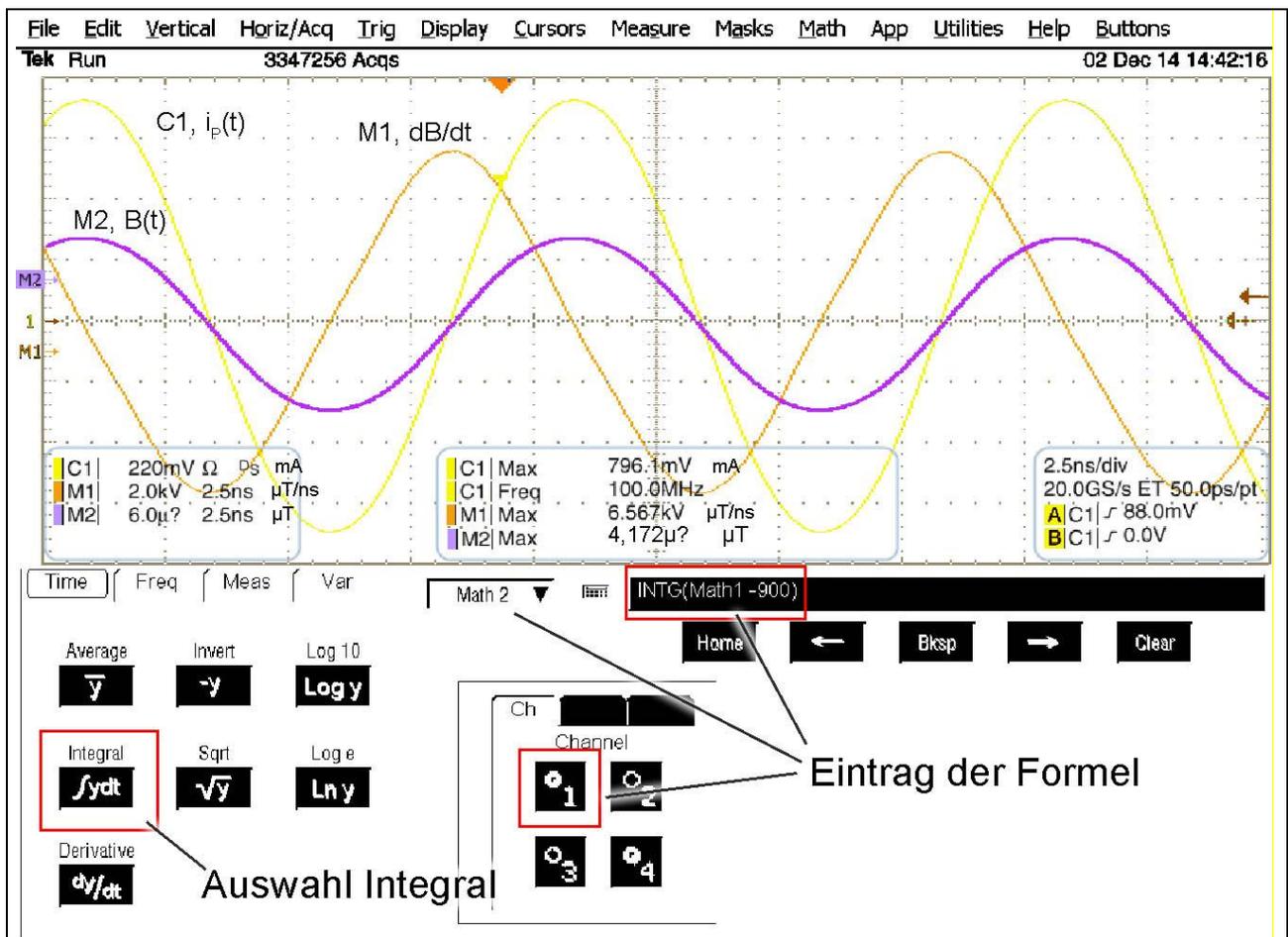
Die größten IC-Stromschleifen werden aus den Pins und Bonddrähten und dem Die gebildet. In einer Schleife von 2 mm x 20 mm wird bei 795 mA HF-Strom ( $P_{vor} 5,16 \text{ W}$ ) und einer Distanzringhöhe von  $h = 10 \text{ mm}$  eine Spannung von 262 mV induziert.

Durch Integration kann der  $\dot{B}$ -Verlauf in die Flussdichte  $B$  umgerechnet werden.

$$B(t) = \int \dot{B}(t) dt + C, \quad B = (1/\omega) \dot{B} (+C) \quad \text{Gl 12}$$

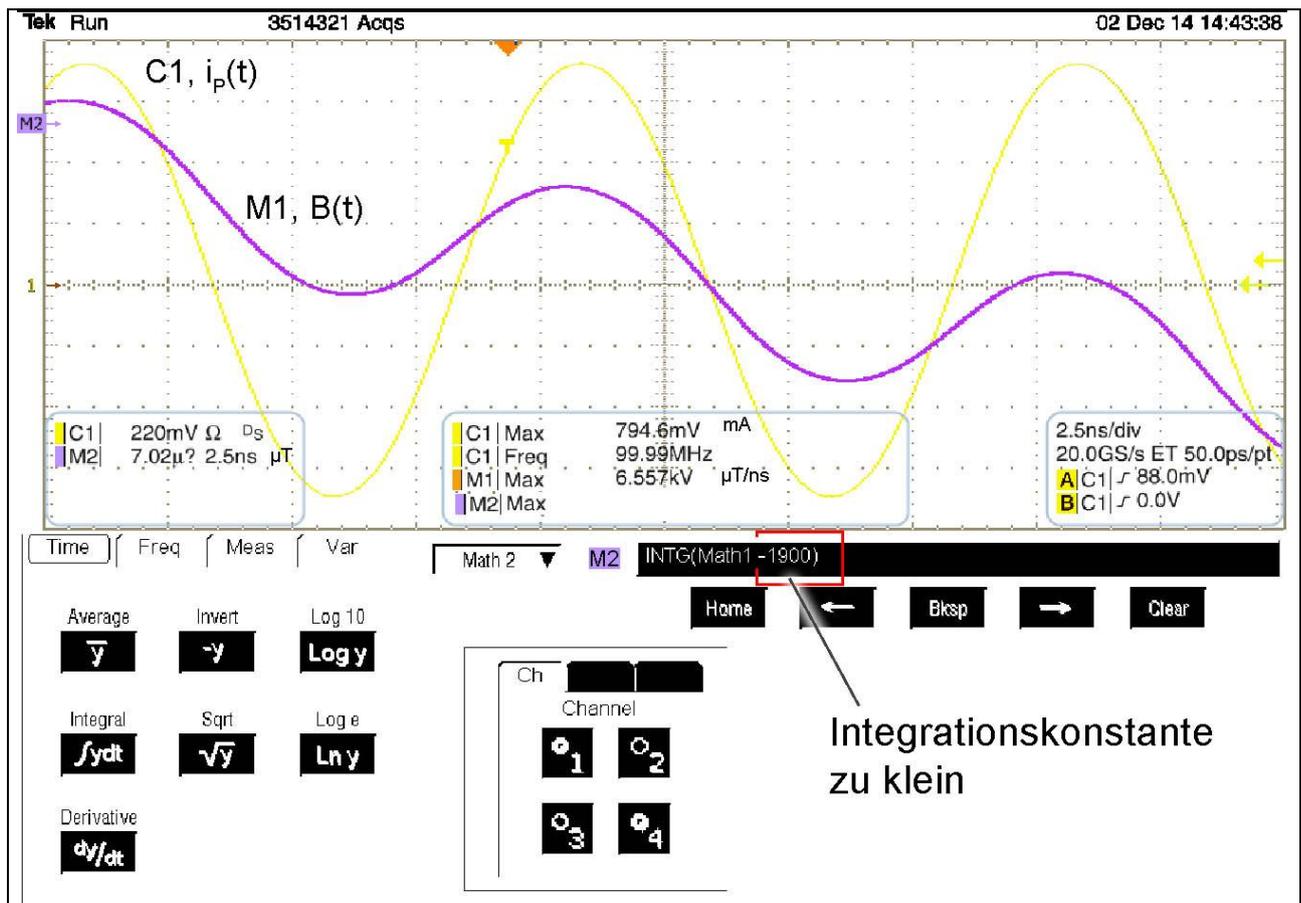
Dabei ist  $C$  die Integrationskonstante. Die Integration kann im Oszilloskop durchgeführt werden (**Bild 19**).

Das Ergebnis im Oszilloskop besitzt die Maßeinheit T.

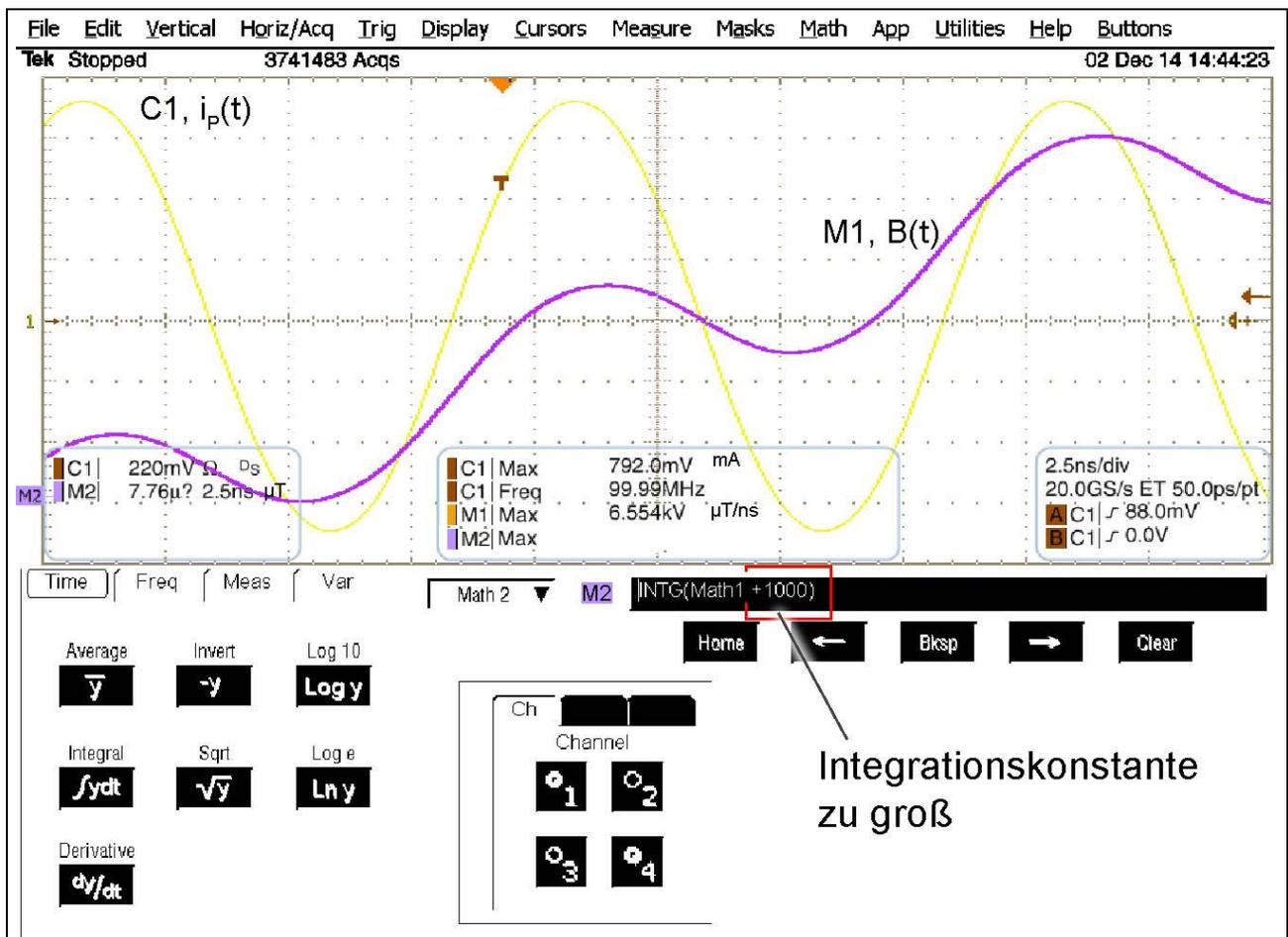


**Bild 19** Eintrag der Integrationsformel in das Mathematikmenü des Oszilloskops, C1:  $i_p(t)$ , M1:  $\dot{B}(t)$ , M2:  $B(t)$

Der Wert der Integrationskonstante C muss von Hand in die Gleichung des Oszilloskops eingetragen werden. Der Endwert der Integrationskonstanten wird durch Iteration ermittelt. Als Startwert kann z.B. 0 verwendet werden. Wenn die Integrationskonstante C in ihrem Wert zu klein ist, fällt die Messkurve gegenüber dem erwarteten Verlauf ab (**Bild 20**). Der erwartete Verlauf ist proportional dem Verlauf des Stromes  $i_p(t)$  im Stromleiter **Bild 19**. Wenn davon abweichend die Messkurve abfällt, muss die Integrationskonstante C erhöht werden. Wenn aber die Messkurve ansteigt ist die Integrationskonstante C in ihrem Wert zu groß (**Bild 20**). Sie muss dann von Hand verringert werden. Der Wert der Integrationskonstanten ist von Hand schrittweise so anzupassen, dass der Verlauf C2:  $B(t)$  dem Strom C1:  $i_p(t)$  proportional entspricht (**Bild 19**). Die folgenden Bilder zeigen beispielhaft die Ermittlung des richtigen Wertes der Integrationskonstanten.



**Bild 20** Durch Integration aus M1 berechneter B-Feldverlauf M2. Die Flussdichte B(t) sollte proportional zum Strom  $i_p(t)$  sein. Abweichend fällt B(t) (M2) gegenüber  $i_p(t)$  (C1) ab. Ursache ist die zu kleine Integrationskonstante -1900. Die integrationskonstante muss verringert werden z.B. auf -900.



**Bild 21** Durch Integration aus C2 berechneter B-Feldverlauf M2. Die Flussdichte B(t) sollte proportional zum Strom  $i_p(t)$  sein. Abweichend steigt B(t) (M2) gegenüber  $i_p(t)$  (C1) an. Ursache ist die zu große Integrationskonstante 1000. Die integrationskonstante muss verringert werden z.B. auf -900.

Wenn der im Oszilloskop eingegebene Attenuatorwert das Messsignal  $u_{AV}(t)$  in T/ns umrechnet, muss  $A_{IC}$  in  $m^2$  in die Gleichung des Oszilloskops eingegeben werden. Dann erhält man als Ergebnis im Oszilloskop die Maßeinheit T.

Wenn der im Oszilloskop eingegebene Attenuatorwert das Messsignal  $u_{AV}(t)$  in mV/mm<sup>2</sup> umrechnet, muss  $A_{IC}$  in mm<sup>2</sup> in die Gleichung des Oszilloskops eingegeben werden. Dann erhält man als Ergebnis im Oszilloskop die Maßeinheit Vs/mm<sup>2</sup>.

Wenn  $\dot{B}$  mit einem Spektrumanalysator logarithmisch (in dB) gemessen wird, kann B wie folgt integriert werden:

$$B = \dot{B} \cdot -20 \log \omega$$

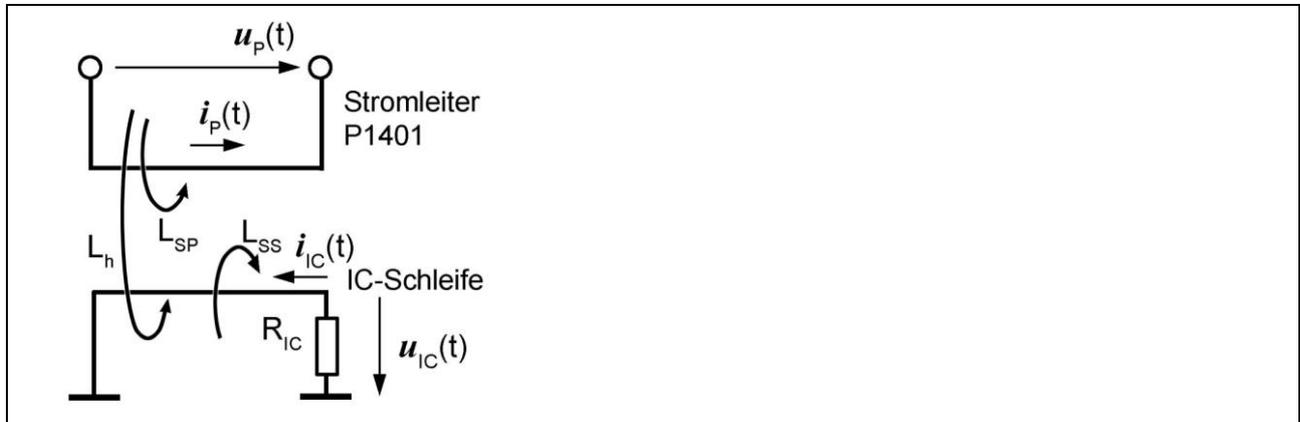
Gl 13

Korrektur des Messsignals mit  $20 \log \omega$  kann mit der Software **ChipScan ESA**<sup>11</sup> erfolgen.

<sup>11</sup> Die Software **ChipScan-ESA** der Langer EMV-Technik GmbH ist für die übersichtliche und vergleichbare Erfassung, Dokumentation und Analyse von Messkurven eines Spektrumanalysators entwickelt. [www.langer-emv.de](http://www.langer-emv.de).

### 1.2.9 Induktiver Koppelmechanismus der Feldquelle P1401 zum Test IC

Es gibt zwei Hauptarten der induktiven Verkopplung des Stromleiters der Feldquelle mit Schleifen des Test-ICs (**Bild 9**). Abgeleitet werden die Kopplungen aus dem im **Bild 22** dargestellten Wirkzusammenhang.



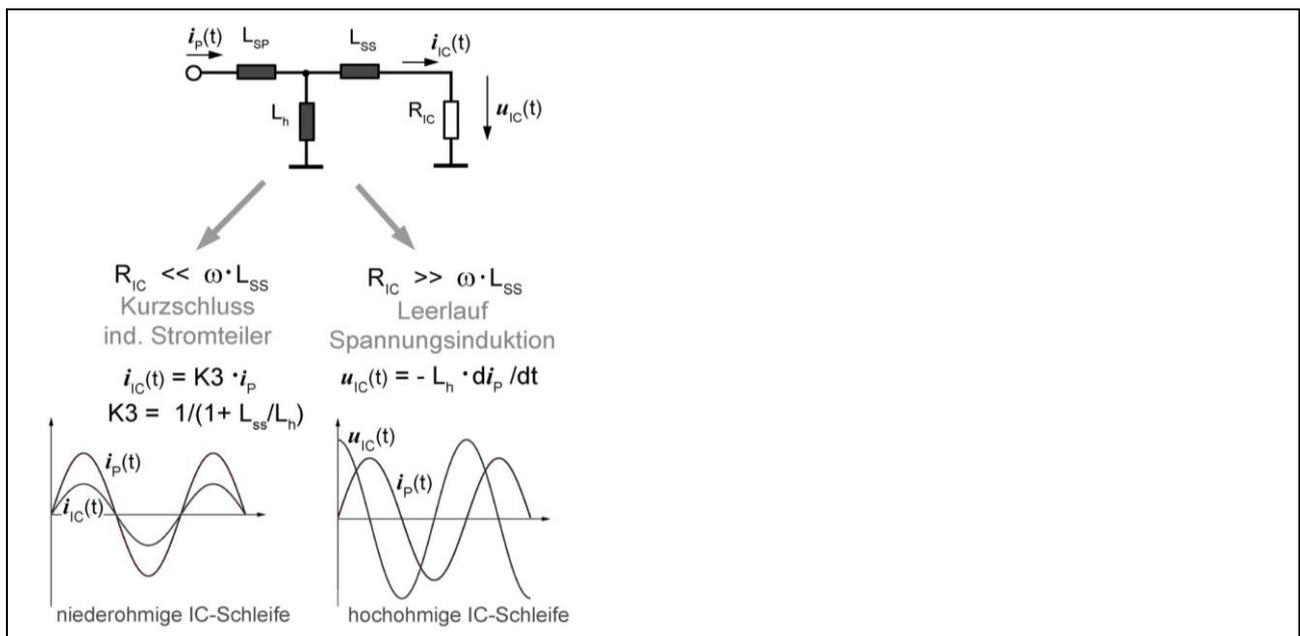
**Bild 22** Wirkzusammenhang des Magnetfeldes zwischen dem Stromleiter der Feldquelle **P1401** und der IC-Schleife

Der Strom  $i_p(t)$  im Stromleiter erzeugt ein Wirbelmagnetfeld. Der Anteil des Wirbelmagnetfeldes, der die IC-Schleife durchsetzt, wird der Hauptinduktivität  $L_h$  zugeordnet. Die Hauptinduktivität  $L_h$  vermittelt zwischen Strom  $i_p(t)$  der Feldquelle und der in der IC-Schleife induzierten Spannung  $u_{ind}(t)$ .

$$u_{ind}(t) = -L_h \cdot di_p / dt \quad \text{Gl 14}$$

$$U_{ind}(t) = -L_h \cdot \omega \cdot I_p \quad \text{Gl 15}$$

Die IC-Schleife besitzt die Selbstinduktivität  $L_{SS}$ . Der Wirkzusammenhang (**Bild 22**) lässt sich in ein Transformator-Ersatzschaltbild bestehend aus konzentrierten Elementen überführen (**Bild 23**).



**Bild 23** Transformatorersatzschaltbild der Kopplung des Stromleiters der Feldquelle **P1401** und der IC-Schleife, Hauptarten der induktiven Kopplung durch Fallunterscheidung

### 1.2.10 Ermittlung der Hauptarten der induktiven Kopplung durch Fallunterscheidung:

#### 1. Stromkopplung

Bei  $R_{IC} \ll \omega L_{SS}$  arbeitet die Schaltung im Kurzschluss. Die Induktivitäten  $L_h$  und  $L_{SS}$  bilden einen Stromteiler. Die Ströme teilen sich frequenzunabhängig im Verhältnis  $L_h/L_{SS}$  (Vereinfachung  $L_{SS} \gg L_h$ :  $1/(1+L_{SS}/L_h) = L_h/L_{SS}$ ). Im Test-IC fließt ein proportionaler sinusförmiger phasengleicher Strom  $i_{IC}(t)$  wie im Stromleiter der Feldquelle **P1401**. Der Scheitelwert bzw. Effektivwert wird mit dem Koppelfaktor  $K3$  (**Bild 23**) abgeschwächt.

Der Effekt der Stromkopplung wirkt im Allgemeinen ( $R_{IC} \ll \omega L_{SS}$ ), wenn  $R_{IC}$  im Bereich von 0,1 Ohm liegt. Das tritt praktisch bei Vdd/Vss Schleifen auf.

#### 2. Spannungskopplung

Bei  $R_{IC} \gg \omega L_{SS}$  arbeitet die Schaltung im Leerlauf wie ein Spannungsübertrager. Im IC steht die an der Induktivität  $L_h$  induzierte Spannung an (Leerlaufspannung). Sie folgt frequenzabhängig dem Induktionsgesetz.

$$u_{ind}(t) = -\omega \cdot L_h \cdot i_p(t)$$

Gl 16

Stromanteile mit höheren Frequenzen erzeugen mehr Spannung. Der Strom  $i_p(t)$  wird differenziert. Es entsteht eine Phasenverschiebung um  $90^\circ$  (**Bild 18, Bild 23**). Der Effekt der Spannungseinkopplung wirkt im Allgemeinen ( $R_{IC} \gg \omega L_{SS}$ ), wenn  $R_{IC}$  im Bereich  $> 5$  Ohm liegt.

### 1.2.11 Stromeinkopplung in den IC

Das Verhältnis  $L_h$  zu  $L_s$  (Vereinfachung  $L_{SS} \gg L_h$ :  $1/(1+L_{SS}/L_h) = L_h/L_s$ ) bestimmt die Stromeinkopplung in eine IC-Schleife (**Bild 23**). Das Verhältnis wird durch Längenänderung einer Stromschleife praktisch nicht geändert. Eine Änderung der Schleifenhöhe und eine Änderung des Leitungsdurchmessers würde  $L_{SS}$  ändern. Damit ist  $L_{SS}$  nicht eindeutig von der Fläche  $A_{IC}$  der Schleife abhängig. Eine Normierung könnte nur unter den angegebenen Bedingungen erfolgen und wird hier nicht durchgeführt.

Der Widerstand  $R_{IC}$  bestimmt wesentlich die Wirksamkeit der Stromeinkopplung. Für Versorgungsschleifen kann auf Grund ihrer Niederohmigkeit die Stromeinkopplung wirken.

Für Berechnungen lässt sich  $L_h$  aus dem Induktivitätsbelag  $L'$  und  $A_{IC}$  bestimmen.  $L_{SS}$  muss aus der Konstruktion des ICs ermittelt werden.

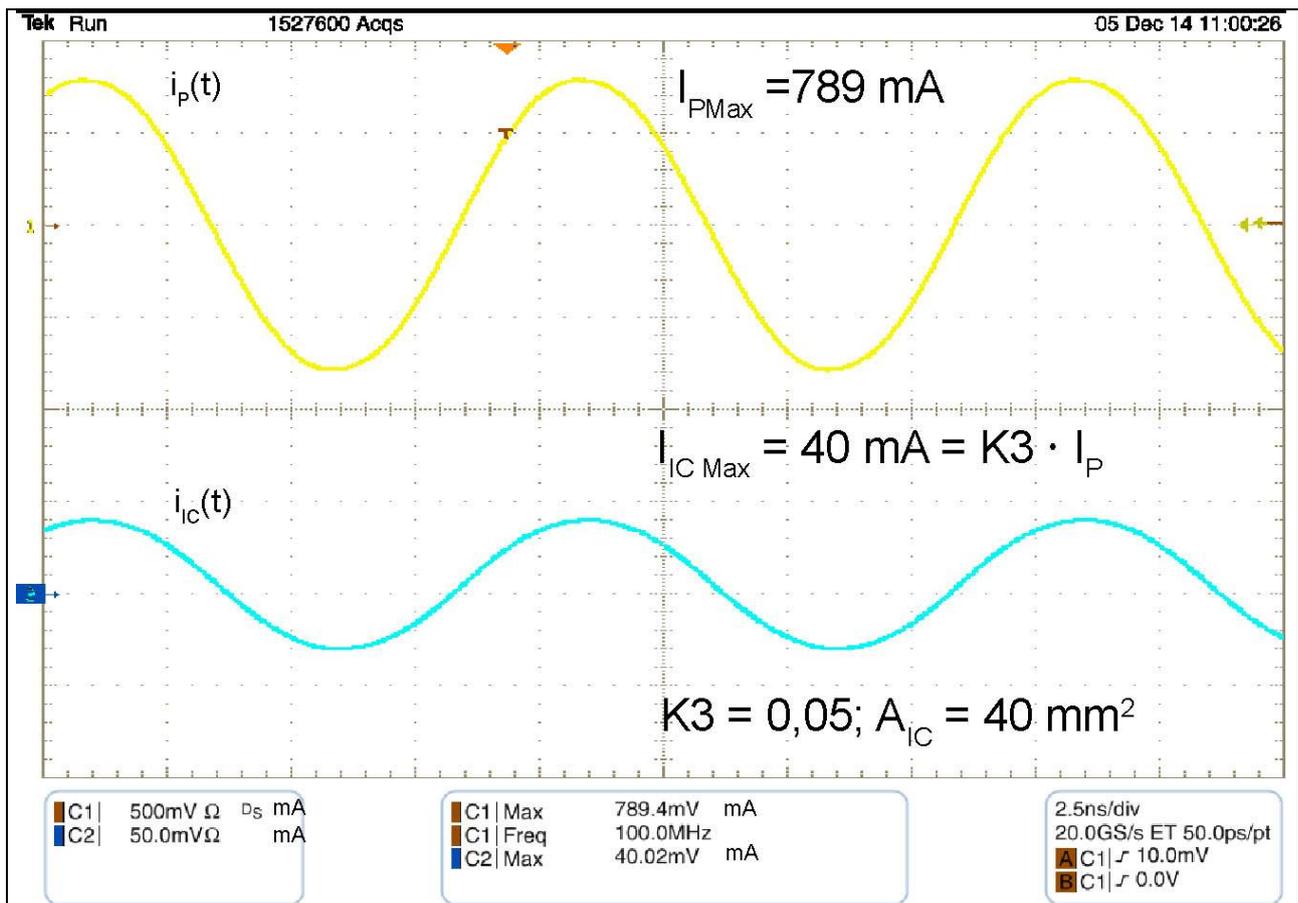
$$i_{IC} = K3 \cdot i_p$$

Gl 17

In **Bild 24** wurde die Stromkopplung in eine IC-Schleife messtechnisch ermittelt. Die IC-Schleife hat die Abmessungen  $2 \times 20$  mm ( $A_{IC} = 40$  mm<sup>2</sup>). Der Stromleiter der Feldquelle war  $h = 10$  mm über GND angeordnet. Aus dem Leistungsverstärker wurde eine Vorwärtsleistung von  $P_{Vor} = 5,41$  W in den Stromleiter gespeist. Mit dem Shunt wurde der Strom (Primärseite) des Stromleiters mit  $I_{PMax} = 789$  mA gemessen. Auf der Sekundärseite in der IC-Stromschleife wird ein Strom  $I_{ICMax} = 40$  mA gekoppelt. Der Koppelfaktor berechnet sich zu (**Gl 17**):

$$K3 = I_{ICMax} / I_{PMax} = 40 \text{ mA} / 789 \text{ mA} = 0,05$$

Gl 18



**Bild 24** Stromübertragung in eine IC-Schleife von  $A_{IC} = 40 \text{ mm}^2$  und Distanzringhöhe 10 mm,  $P_{\text{vor}} = 5,41 \text{ W}$ .  $i_p(t)$ , Kanal C1 ist der Strom im Stromleiter der Feldquelle.  $i_{IC}(t)$ , Kanal C2 ist der in die IC-Schleife transformatorisch übertragene Strom.

### 1.2.12 Spannungseinkopplung in den IC

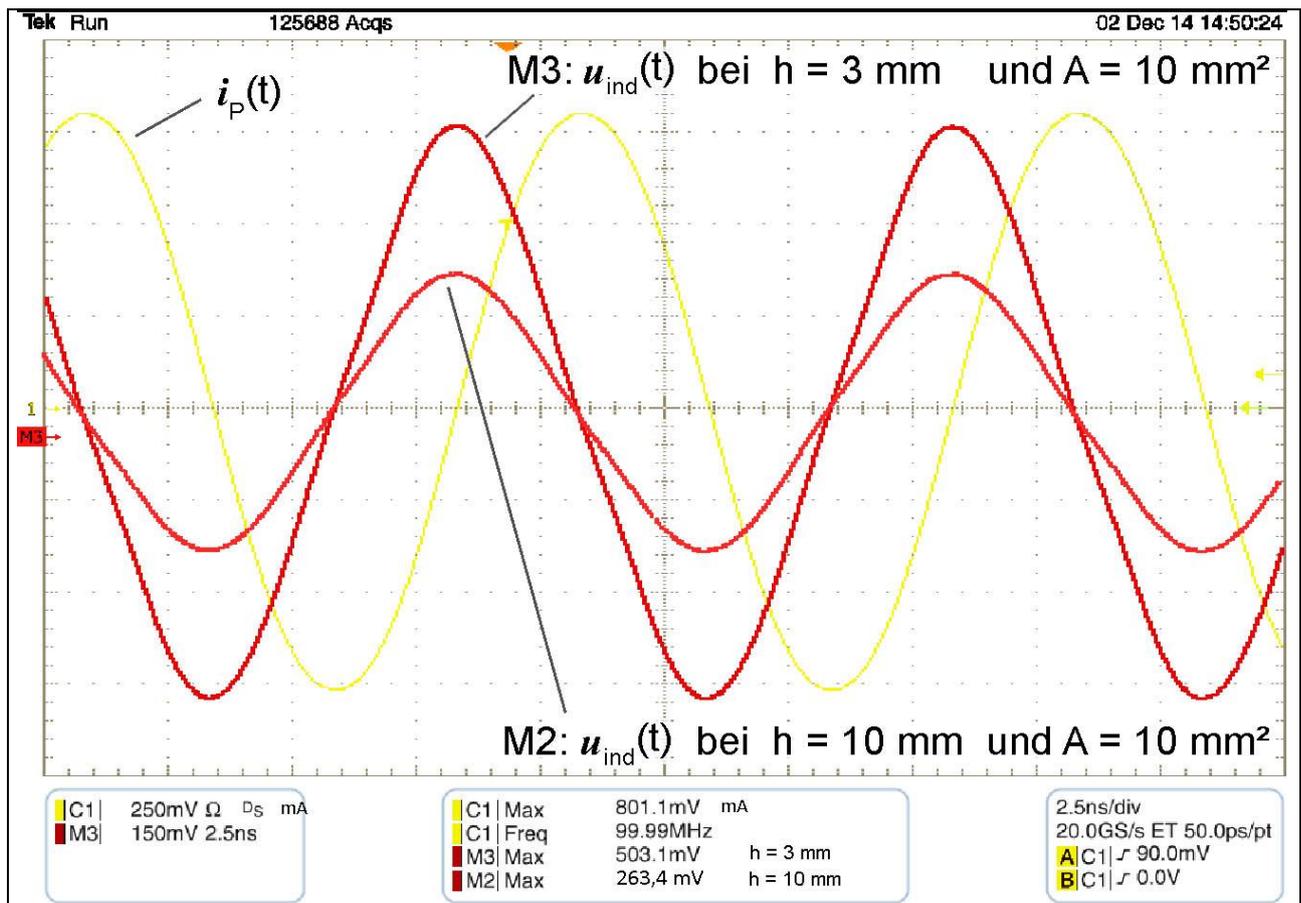
Der Stromleiter in der Feldquelle besitzt eine induktive Verkopplung zur Leiterschleife im Test-IC. Die Wirkung der Verkopplung wird mit dem Induktionsgesetz beschrieben.

$$U_{\text{ind}} = -j\omega \cdot L_h \cdot I_p \quad (\text{komplexe Form}) \quad \text{Gl 19}$$

$$u_{\text{ind}}(t) = -L_h' \cdot A_{IC} \cdot di_p / dt \quad (\text{Zeitbereich}) \quad \text{Gl 20}$$

Dabei ist die Induktivität  $L_h$  das Maß der Verkopplung zwischen Stromleiter und Schleife des Test-ICs. Die spezifische Induktivität  $L_h'$  ( $= K1$ ) ist das Verhältnis zwischen Induktivität  $L_h$  und der wirksamen Fläche  $A_{IC}$  der Schleife des Test-ICs.

Sie ist in **Tabelle 2** für 3 mm und 10 mm Feldkammerhöhe  $h$  angegeben. Die Querschnitte  $A_{IC}$  der Schleifen im Test-IC können aus seiner Konstruktion ermittelt werden. Mit diesem Wert, dem Induktivitätsbelag und  $j\omega I_p$  kann die induzierte Spannung in der Schleife des Test-ICs zum Beispiel im Komplexen berechnet werden. Diese Werte können für Simulation am IC benutzt werden.



**Bild 25** Induzierte Spannung in der Leiterschleife eines Test-ICs bei Distanzring 3 mm und 10 mm und Feldquelle **P1401**.

Im **Bild 25** sind die zeitlichen Verläufe der induzierten Spannungen für eine Testleiterschleife von  $A_{IC} = 10 \text{ mm}^2$  dargestellt. Bei Verwendung des Distanzrings 3 mm wird die doppelte Spannung induziert, als bei Verwendung des Distanzrings 10 mm. Bei Distanzring 3 mm wird ein Test-IC das Feld stärker verzerren als bei Distanzring 10 mm.

Die induzierte Spannung kann auch direkt aus der Flussdichte im Bereich des Test-ICs berechnet werden.

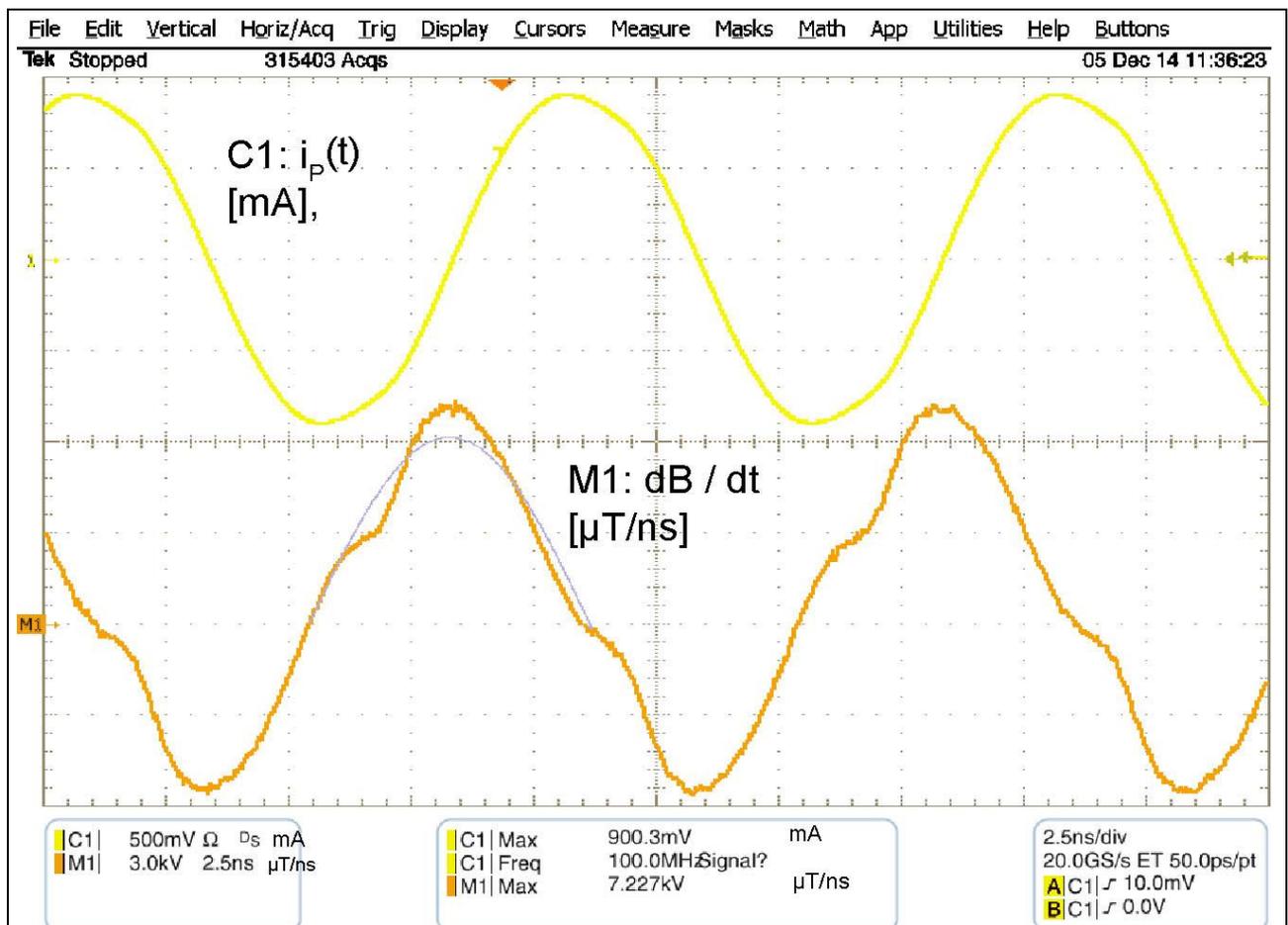
$$u_{ind}(t) = -A_{IC} \cdot dB(t) / dt$$

Gl 21

Diese Gleichung stellt die direkte Verbindung zwischen Magnetfeld B und der induzierten Spannung  $u_{ind}(t)$  her.

### 1.2.13 Oberschwingungen

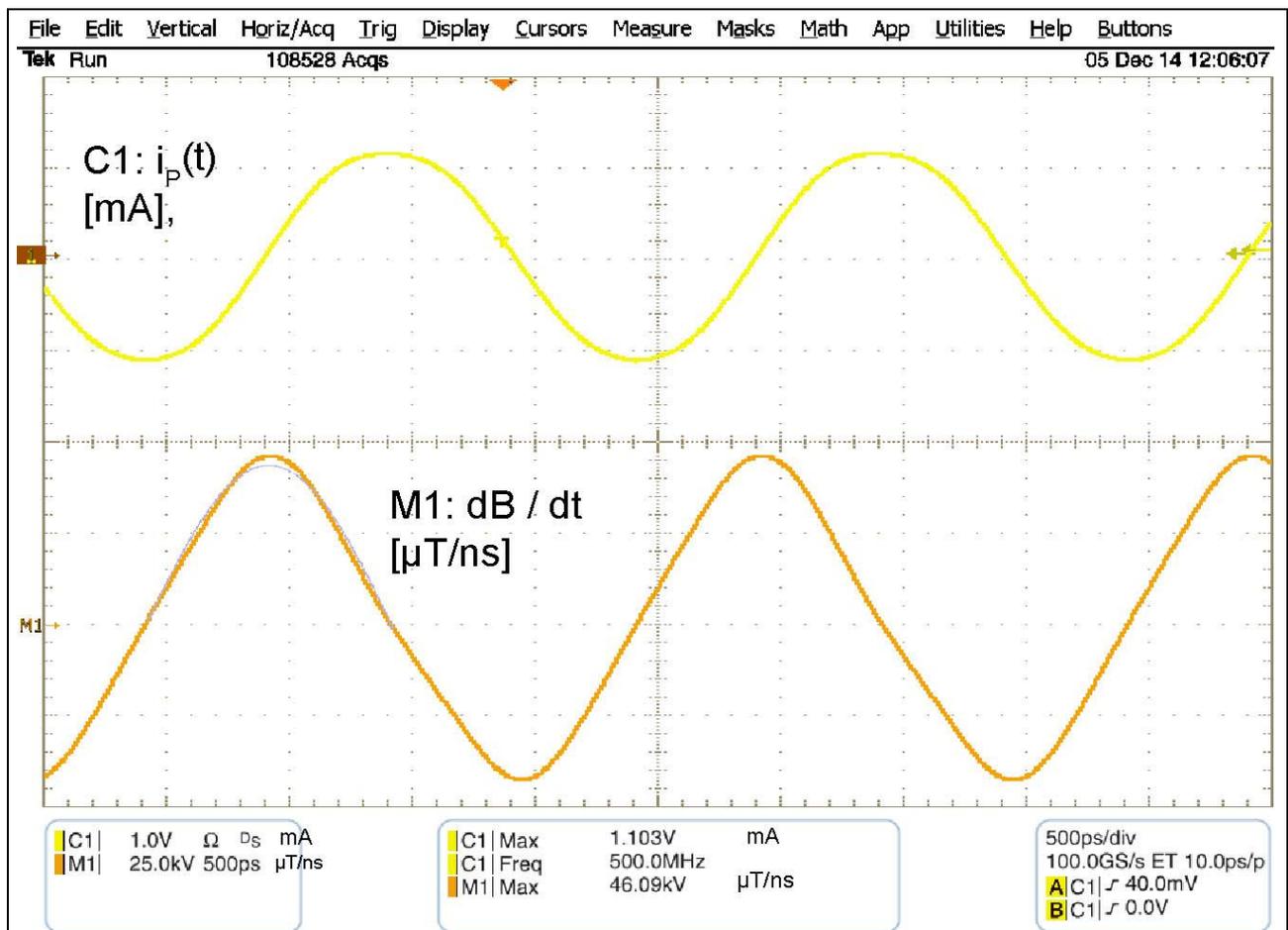
In Abhängigkeit von Frequenz und Aussteuerung kann der Leistungsverstärker Oberschwingungen erzeugen. Im **Bild 26** ist ein Stromverlauf  $i_p(t)$  mit Oberschwingungen dargestellt. Der Strom wurde mit dem Shunt der Feldquelle **P1401** gemessen. Der verwendete 30 W 1 GHz Leistungsverstärker wurde bei einer Frequenz von 100 MHz und einer Vorwärtsleistung 6,88 W betrieben. Durch Differenzieren des Stromes  $i_p(t)$  entsteht eine Überhöhung bei  $dB/dt$  und daraus eine Überhöhung von  $u_{ind}(t)$ .



**Bild 26** Mit Oberschwingungen behafteter Strom und  $dB/dt$  Verlauf bei Distanzring 3 mm und 10 mm und Feldquelle **P1401**.

Die Oberschwingungen im Strom  $i_p(t)$  erzeugen höhere induzierte Spannung  $u_{ind}(t)$  im IC (proportional  $dB/dt$ ). Durch Messung des Stromverlaufes mit dem Shunt der Feldquelle können am Oszilloskop störende Oberschwingungen erkannt werden.

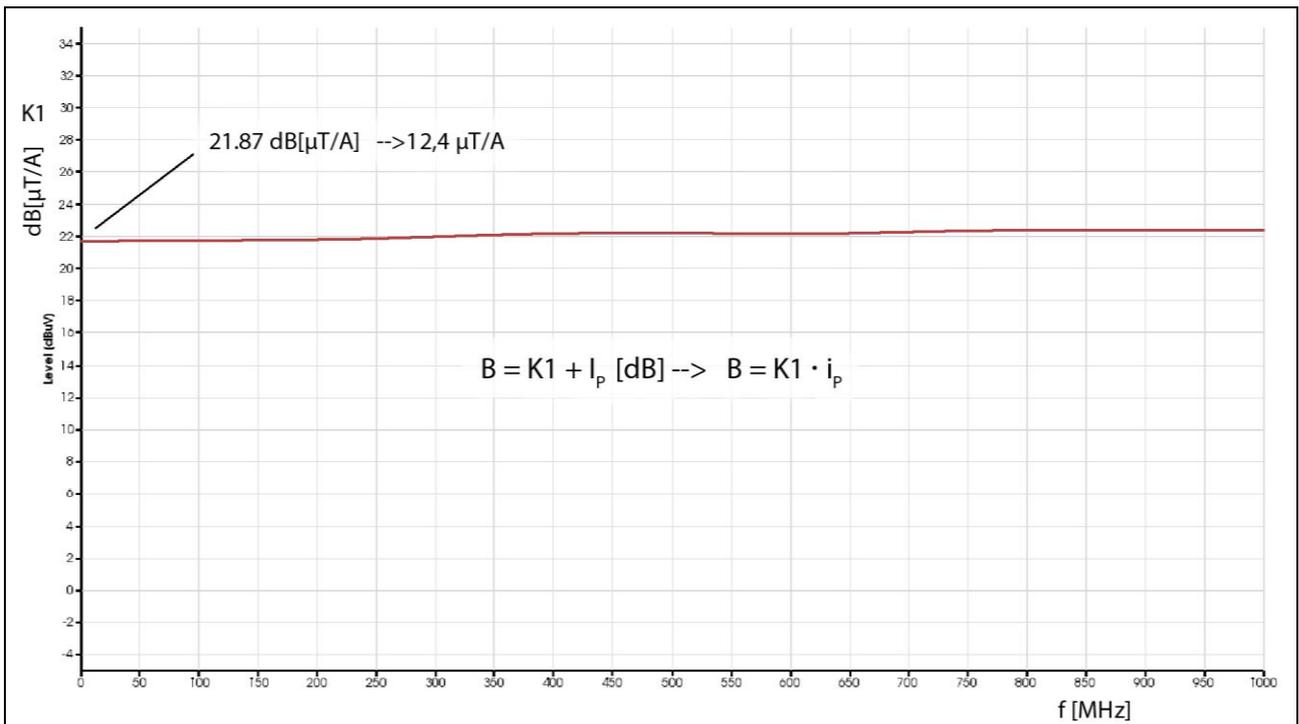
Im **Bild 27** wurde die Messung mit einer Einstellung 500 MHz und  $P_{vor} = 25$  W wiederholt. Trotz der höheren Leistung und der höheren Frequenz treten weniger Oberschwingungen auf.



**Bild 27** Der Leistungsverstärker erzeugt einstellungsabhängig Oberschwingungen. Diese sind in  $i_p(t)$  enthalten. Sie erzeugen auch Oberschwingungen in  $dB/dt$ . Bei  $P_{\text{vor}} = 25 \text{ W}$ ,  $f = 500 \text{ MHz}$  und  $h = 10 \text{ mm}$ .

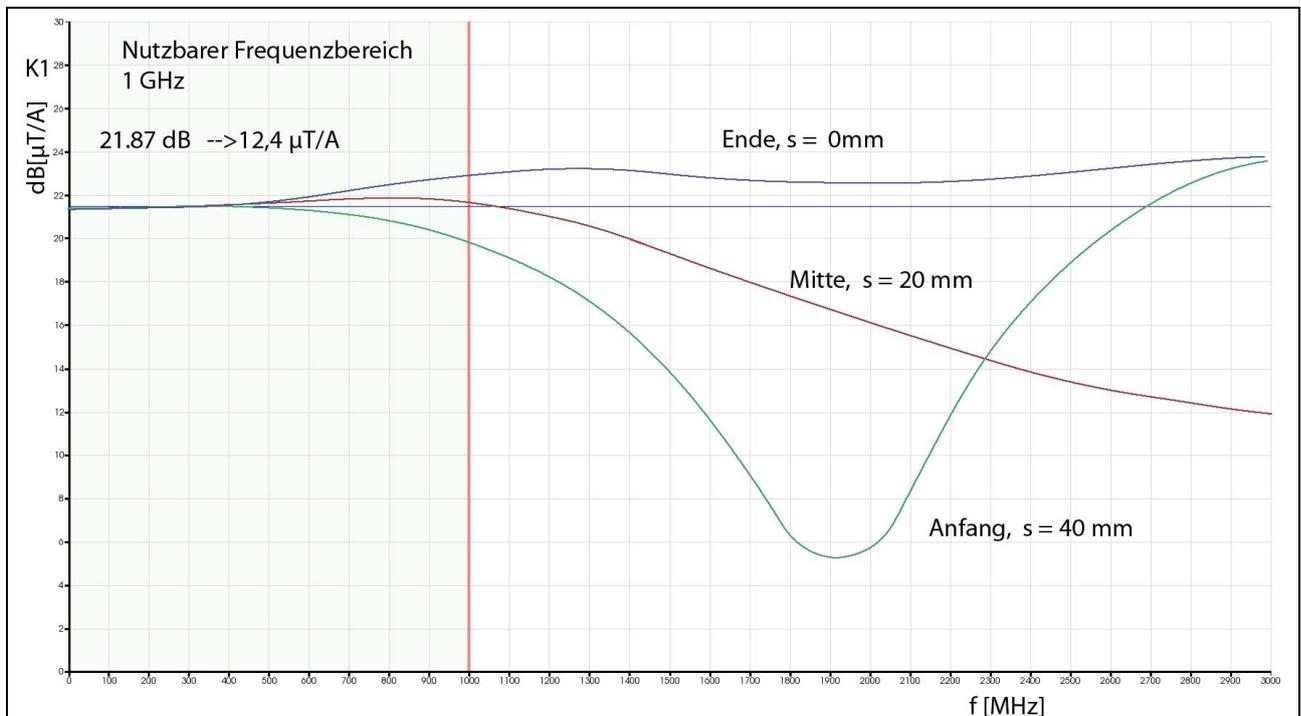
### 1.2.14 Frequenzgang der HF-Magnetfeldquelle

Im **Bild 29** ist der Frequenzgang  $K1(f)$  vom Strom  $I_p$  im Stromleiter zur Flussdichte  $B$  dargestellt. Der Frequenzgang  $K1(f)$  liegt im Arbeitsbereich bis 1 GHz nahezu konstant bei  $12,4 \mu\text{T/A}$ . Die Abweichungen sind  $< 0,5 \text{ dB}$ . Die Feldquelle arbeitet linear. Ursachen für die geringe Frequenzabhängigkeit von  $K1$  ist der Eintritt in den Übergang von elektrisch kurz zu elektrisch lang auf dem Stromleiter der Feldquelle. Aus **Bild 26** und **Bild 27** lässt sich ableiten, dass Stromüberschwingungen des Leistungsverstärkers außerhalb des Arbeitsbereichs bei Frequenzen  $> 1 \text{ GHz}$  liegen können. Wenn in dem Bereich der Frequenzgang  $K1(f)$  der Feldquelle nicht konstant bleibt und z.B. um 6 dB ansteigt, verdoppelt sich der Scheitelwert der Oberschwingung der Flussdichte  $B$ . Damit erhöht sich die Störfähigkeit der Feldquelle. Es muss sichergestellt sein, dass der Frequenzgang  $K1(f)$  im Bereich  $> 1 \text{ GHz}$  nicht wesentlich ansteigt. Im **Bild 29** ist der Frequenzgang bis 3 GHz dargestellt (erfasst ist die 3. Oberschwingung bei Grundschwingung 1 GHz). Der Frequenzgang ist für den Anfang, Mitte und Ende des 4 cm langen Stromleiters angegeben. In allen Bereichen steigt der Frequenzgang weniger als 2 dB an. Ein Abfall des Frequenzgangs (Stehende Welle Stromminima) hat keine negativen Folgen.

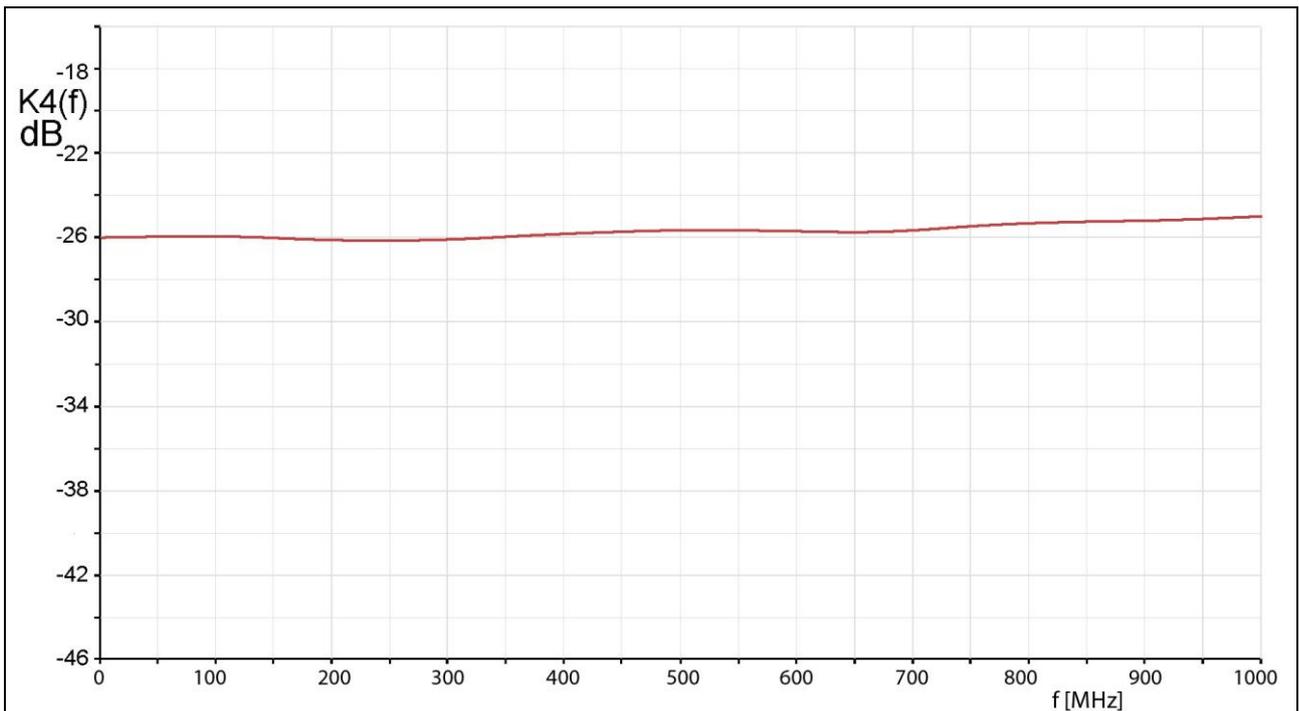


**Bild 28** Frequenzgang **P1401**  $K1 = B/I_p$ , frequenzabhängige Wandlung des HF Stroms  $I_p$  in Flussdichte B

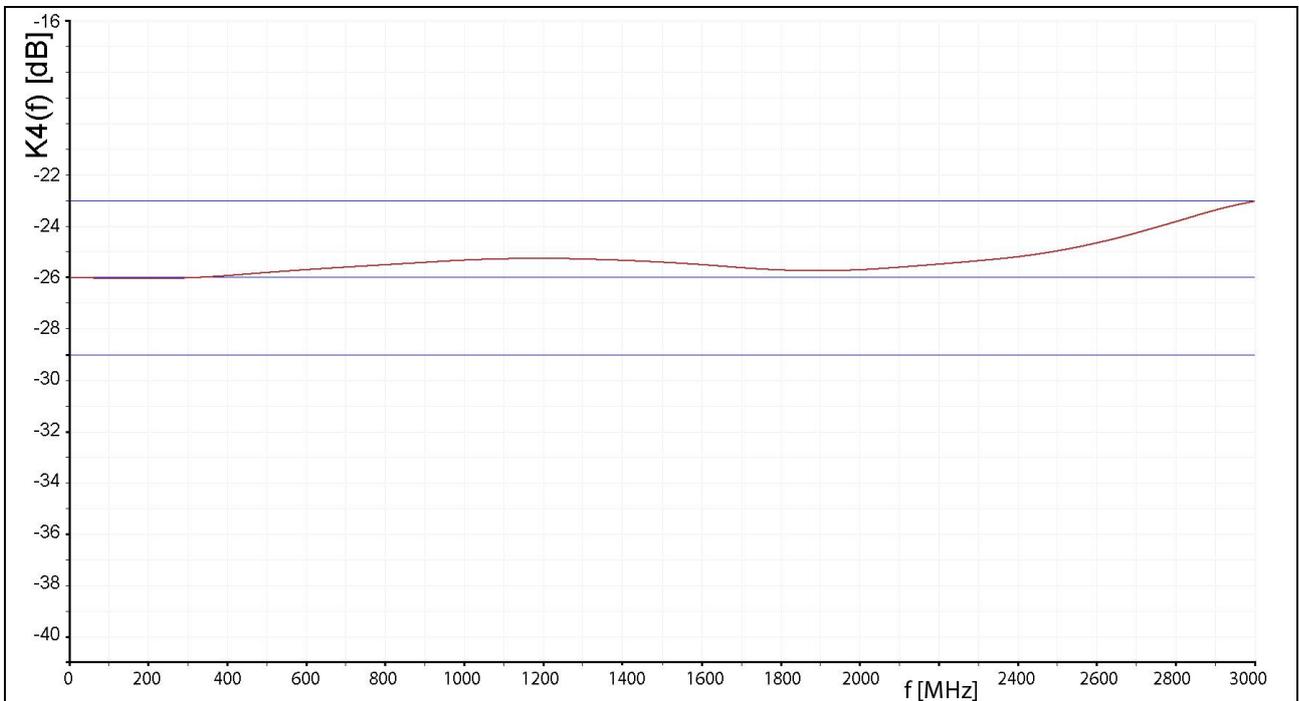
Der Frequenzgang  $K4(f)$  des 0,1 Ohm Shunt bis 1 GHz ist in **Bild 30** dargestellt. Für den Frequenzgang des Shunts gilt Ähnliches wie für den Frequenzgang  $K1(f)$ . Aus **Bild 31** ist ersichtlich, dass der Frequenzgang des Shunts bis 3 GHz nicht über 3 dB ansteigt



**Bild 29** Frequenzgang  $K1 = B/I_p$ , frequenzabhängige Wandlung des HF Stroms  $I_p$  in Flussdichte B bis 3 GHz



**Bild 30** Frequenzgang des 0,1 Ohm Shunts  $K_4(f)$ , Probestrom  $I_p$  zur Ausgangsspannung  $u_{AV}$  des Shunts bis 1 GHz

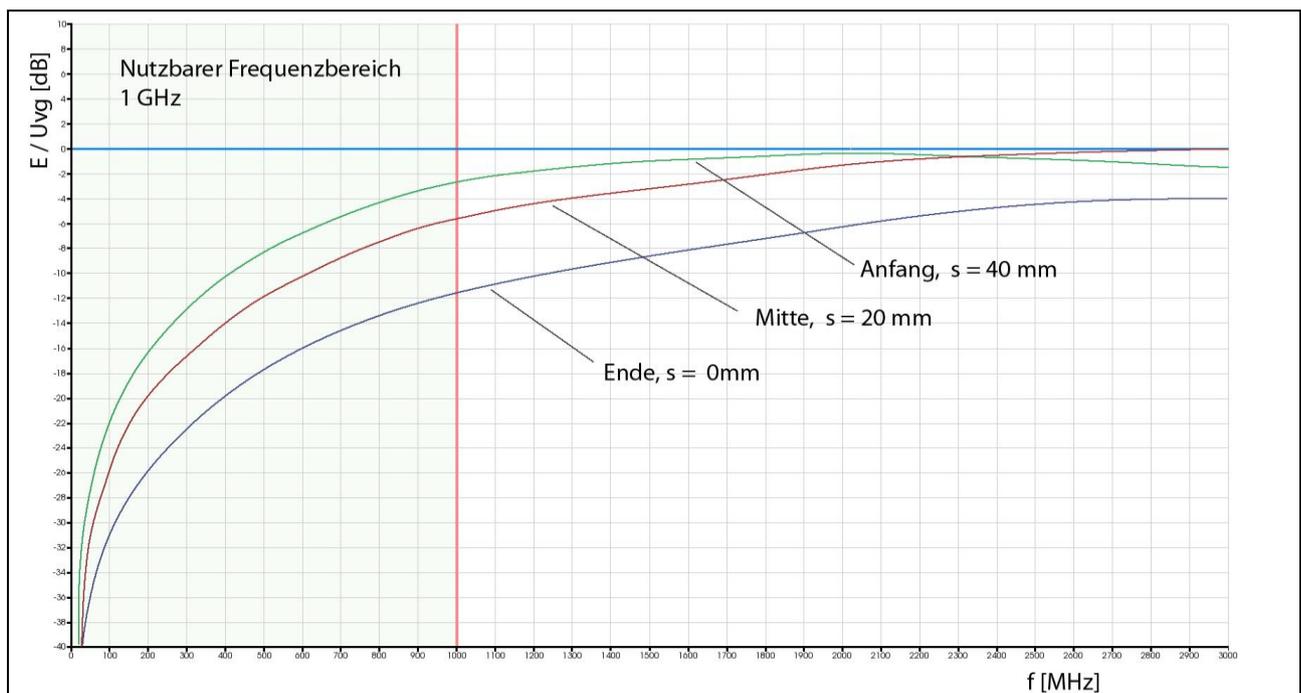


**Bild 31** Frequenzgang des 0,1 Ohm Shunt  $K_4(f)$ , Probestrom  $I_p$  zur Ausgangsspannung  $u_{AV}$  des Shunts bis 3 GHz

### 1.2.15 E-Feldunterdrückung der HF-Magnetfeldquelle

In der Feldquelle **P1401** entsteht bei Speisung mit HF in der Feldkammer als Nebeneffekt ein schwaches elektrisches Feld  $E_p$  (**Bild 32**). Das elektrische Feld ist von der Höhe des verwendeten Distanzringes  $h$  linear abhängig. Es wird entweder vom Spannungsabfall an der Induktivität des Stromleiters („elektrisch kurz“) oder von stehenden Spannungswellen auf dem Stromleiter („elektrisch lang“) verursacht. Die stehenden Spannungswellen können in ihrem Wert maximal die Generatorvorwärtsspannung  $U_{VG}$  erreichen. Das entsteht nur für Orte auf dem Stromleiter, die den Abstand von einer viertel Wellenlänge vom Kurzschlusspunkt besitzen. Für eine Frequenz  $< 1$  GHz liegt das außerhalb des Stromleiters im Zuführungskabel. Jedoch ist der Anfang der Spannungswelle im Bereich 1 GHz auf dem Stromleiter bemerkbar. Die Spannung steigt vom Ende (Kurzschlusspunkt) über die Mitte bis zum Anfang des Stromleiters an. Im **Bild 32** ist der Frequenzgang des Feldes zur Generatorspannung  $U_{VG}$  dargestellt. Das elektrische Feld wurde am Boden der Feldkammer im Abstand von  $h = 10$  mm gemessen. Am Ende des Stromleiters bei  $s = 0$  ist das Feld nicht null, da von der Mitte des Stromleiters Feldlinien nach außen gelangen. Die Maßeinheit des elektrischen Feldes ist V/cm. Bei Distanzringhöhe 10 mm ist der Zahlenwert des elektrischen Feldes gleich der am Stromleiter anstehenden Spannung.

In der Mitte der Feldkammer ist  $20 \log E/U_{VG}$  bei 1 GHz  $-5,5$  dB oder  $E/U_{VG} = 0,53$ . Das bedeutet, dass bei 1 GHz 53 % der Generatorspannung  $U_{VG}$  gegen den Boden der Feldkammer anstehen.



**Bild 32** Bei Speisung der Feldquelle **P1401** mit Strom  $I_p$  entsteht in der Feldkammer ein elektrisches Feld  $E_p$ . Distanzringhöhe  $h = 10$  mm.

Die Abhängigkeit vom Strom („elektrisch kurz“) ergibt sich aus

$$U_F = \omega \cdot L \cdot I_p$$

Gl 22

Dabei ist  $L$  für die Mitte der Feldkammer ca. 4 nH

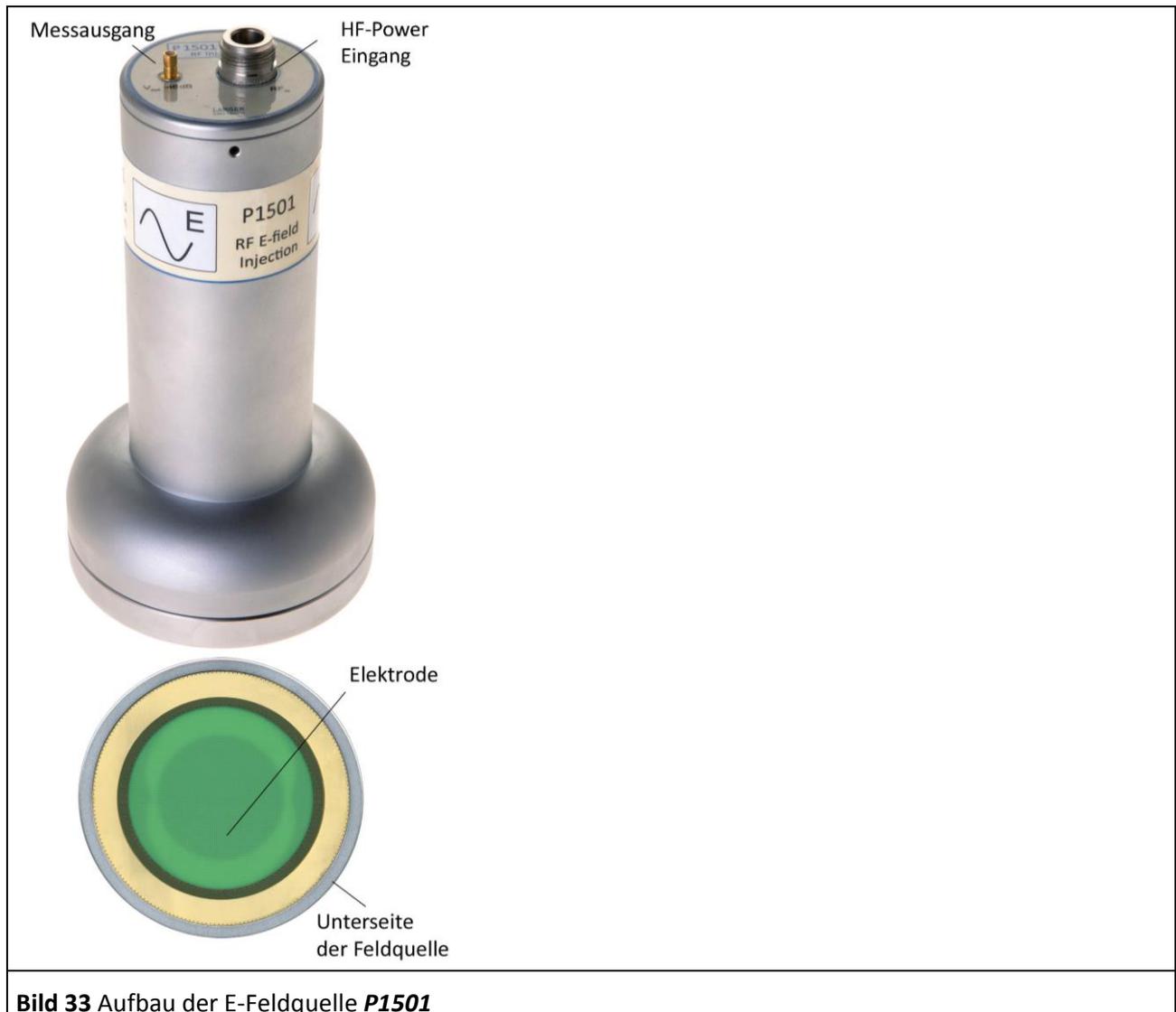
Bei 1 GHz entsteht:

$$U_F = 26 \text{ V/A} \cdot I_p$$

Gl 23

(Tabelle 6)

### 1.3 Aufbau der E-Feldquelle P1501



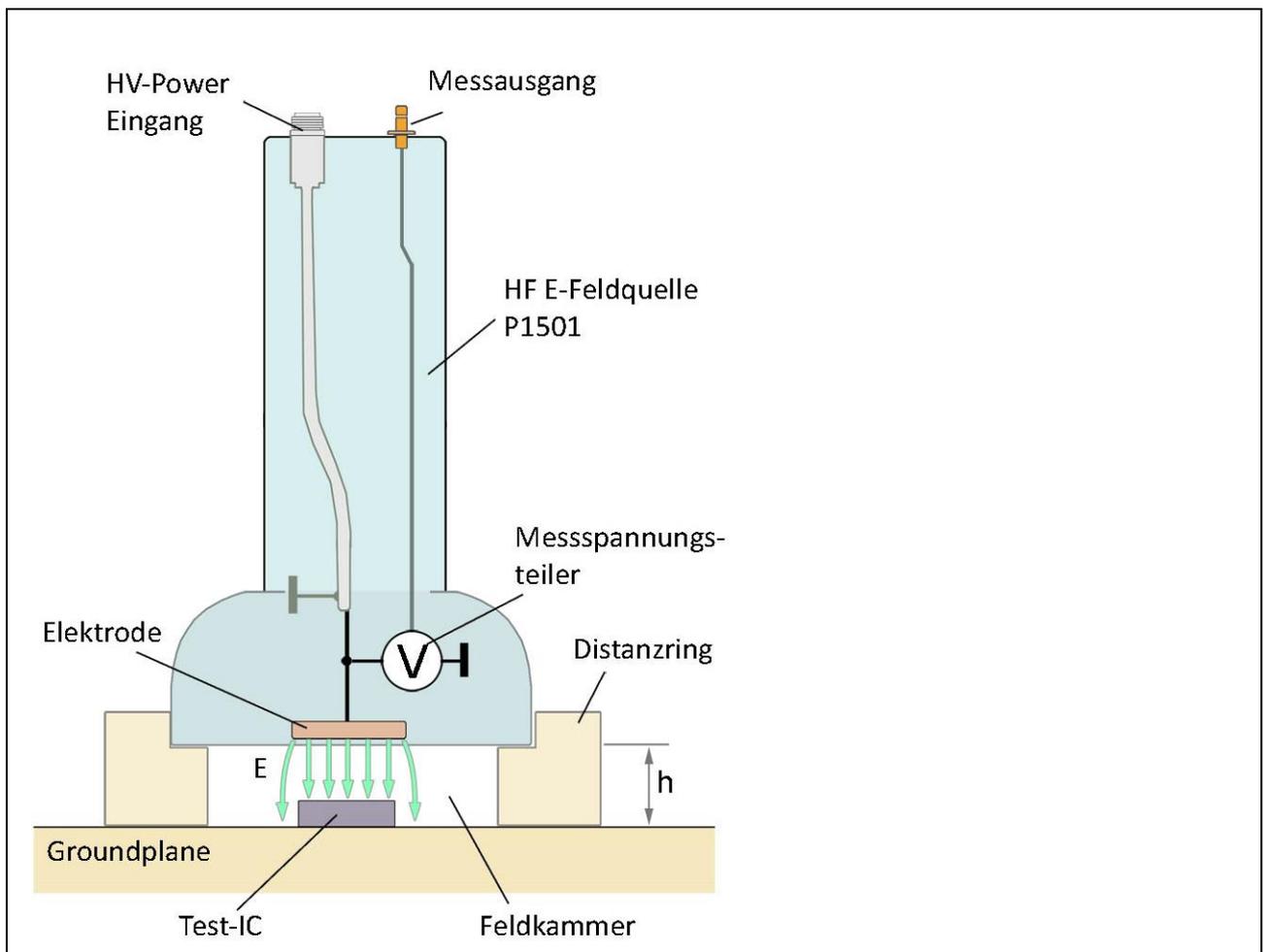
**Bild 33** Aufbau der E-Feldquelle **P1501**

An der Oberseite besitzt die Feldquelle einen HF-Power Eingang (N-Connector) zum Anschluss eines HF-Leistungsverstärkers. Der HF-Power Eingang ist im Inneren der Feldquelle mit der Elektrode verbunden (**Bild 33**). Die Elektrode befindet sich am Boden der Feldquelle. Sie erzeugt das elektrische HF-Feld für die Prüfung des Test-ICs.

Das elektrische HF-Feld tritt an der Unterseite der Feldquelle aus der Elektrode orthogonal aus. Im HF-Stromweg der Feldquelle befindet sich ein Messspannungsteiler zum Messen der HF-Spannung ( $u_p(t)$ ). Die Ausgangsspannung des Messspannungsteilers steht am Messausgang an. Der Messausgang ist in der Feldquelle mit  $50 \Omega$  abgeschlossen. Das von der Elektrode der Feldquelle erzeugte elektrische Feld wird von einer Feldkammer umschlossen. Die Feldkammer besteht aus der Unterseite der Feldquelle, dem Distanzring und der Groundplane **GND 25**. Der Test-IC befindet sich in der Feldkammer. Er ist auf der Testleiterkarte aufgebracht (**Bild 3**). Die Testleiterkarte ist in die Groundplane eingelassen.<sup>12</sup>

Die Feldquelle **P1501** besitzt keinen Abschluss und arbeitet im Leerlauf. **Es ist zu beachten, dass der verwendete Leistungsverstärker für den Betriebsfall „Leerlauf“ ausgelegt sein muss.**

<sup>12</sup> siehe Kapitel 1.1



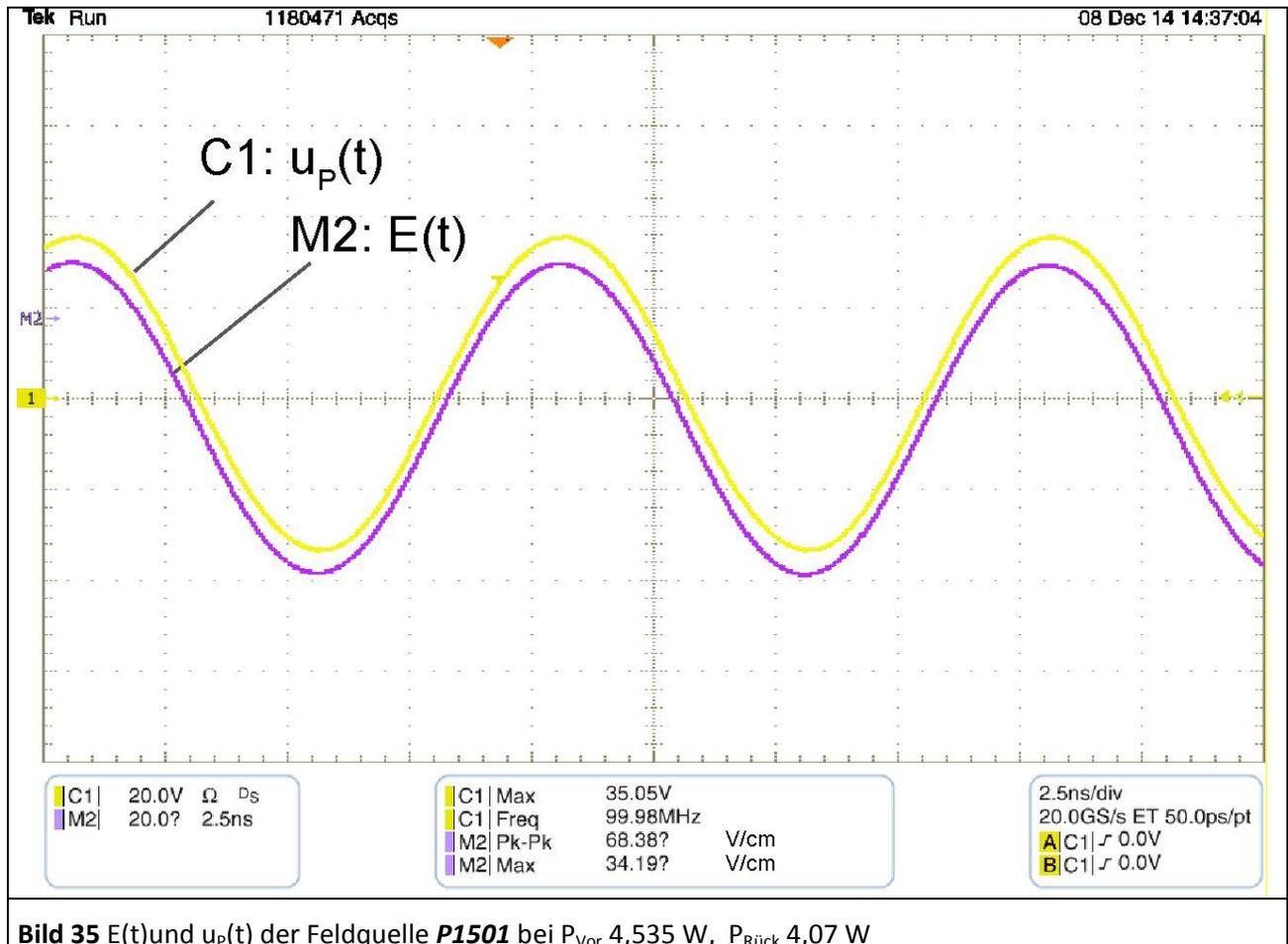
**Bild 34** Aufbau der Feldquelle **P1501** ohne Abschluss

Die Feldquelle **P1501** besitzt zwei Anschlüsse (**Bild 34**):

- 1 x N-Connector (HF-Power Eingang) für den Anschluss an einen Leistungsverstärker
- SMB (male), Messausgang (60 dB) des Messspannungsteilers, für Anschluss eines Oszilloskops/Spektrumanalysators

## 1.4 Funktion der E-Feldquelle P1501

An den HF-Power Eingang (N-Connector) wird der Leistungsverstärker (über Richtkoppler) angeschlossen. Der HF-Stromweg führt vom Leistungsverstärker über ein entsprechendes HF-Kabel zum HF-Power Eingang. Vom HF-Power Eingang führt der HF-Stromweg zur Elektrode und zum Messspannungsteiler (Ersatzschaltbild **Bild 36**). Die Elektrode erzeugt das elektrische Feld  $E$  in der Feldkammer (**Bild 35**) mit dem der Test-IC getestet wird (**Bild 34**).



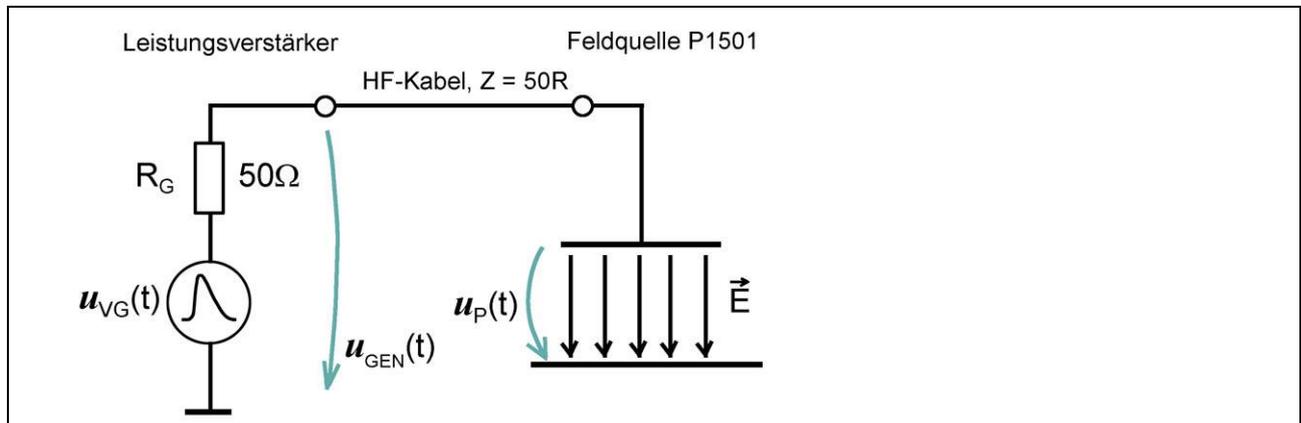
Die Stärke des elektrischen Feldes und die in den Test-IC eingekoppelte Spannung oder der eingekoppelte Strom lassen sich über folgenden Weg ermitteln:

- **Tabelle 8**
- Berechnung der Probespannung  $U_p$  aus der Vorwärtsleistung  $P_{\text{Vor}}$  des Leistungsverstärkers unter Beachtung des Ersatzschaltbildes **Bild 36**
- Messung der Spannung  $u_p(t)$  am Spannungsteiler der Feldquelle
- Berechnung des elektrischen Feldes  $E$  im Bereich des Test-ICs aus der Probespannung  $u_p(t)$  und der Probekontanten  $K_1$
- Berechnung des eingekoppelten Stroms  $i_{\text{ic}}(t)$  aus der Koppelkapazität  $C_1$  der Elektrode zum Pad des Test-ICs
- Berechnung der in den IC übertragene Spannung  $u_{\text{ic}}(t)$  aus der Probespannung  $u_p(t)$  und der Probekontanten  $K_3$

### 1.4.1 Ermittlung der Spannung $U_p$ an der Elektrode der Feldquelle

Die Probespannung  $u_p(t)$  wird zur Berechnung der elektrischen Feldstärke  $E$  benötigt. Es gibt zwei Wege, die Probespannung  $U_p$  zu ermitteln.

#### 1. Berechnung von $u_p(t)$ aus der Vorwärtsleistung des Leistungsverstärkers.



**Bild 36** Ersatzschaltbild mit Leistungsverstärker, HF-Kabel und Feldquelle **P1501**

Die Feldquelle **P1501** erzeugt in Abhängigkeit von der Vorwärtsleistung  $P_{\text{vor}}$  die Spannung  $u_p(t)$  an der Elektrode:

$$u_p = 2 \cdot (P_{\text{vor}} \cdot R_{\text{Gen}})^{-1/2} \quad \text{Gl 24}$$

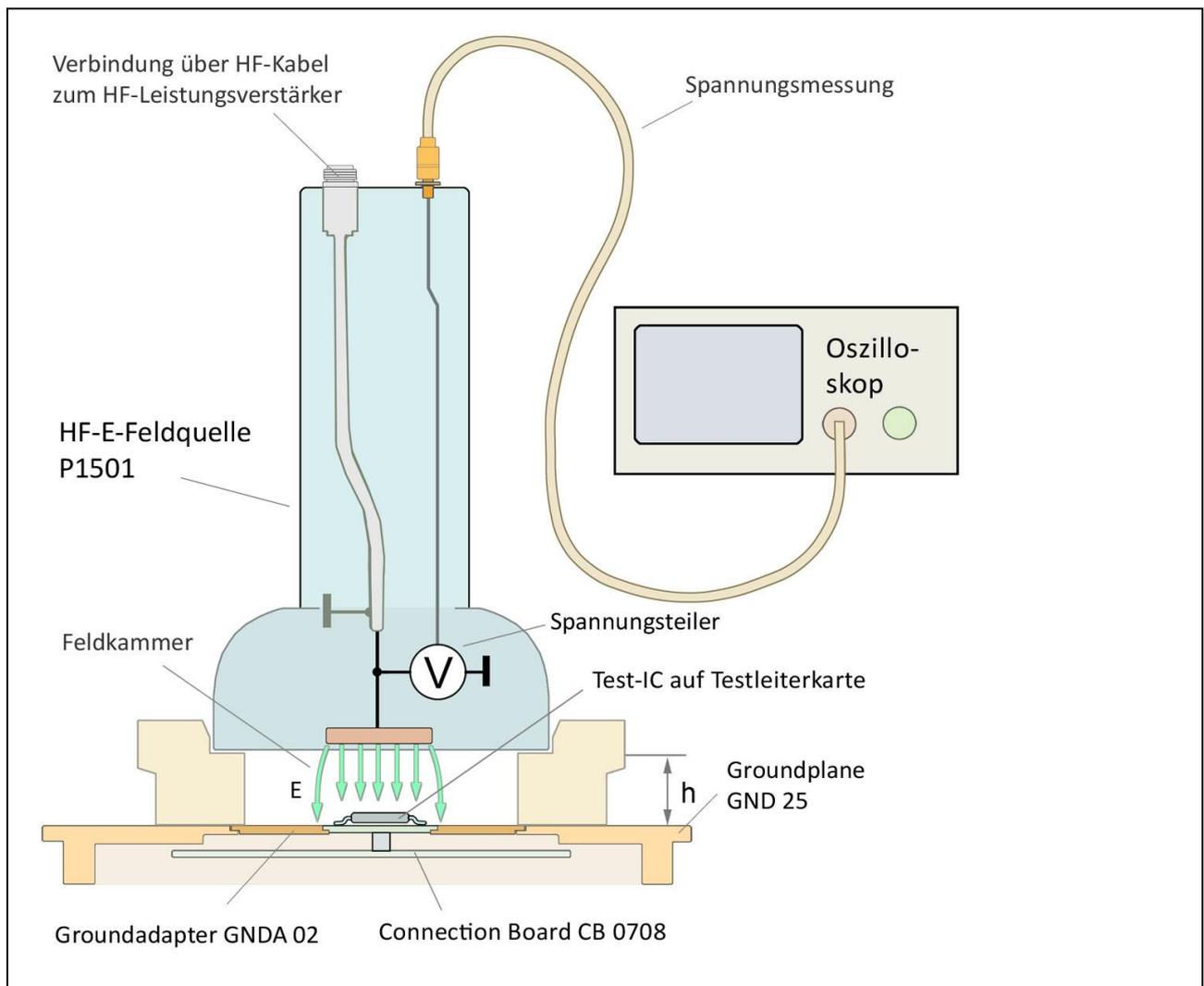
Bei der Feldquelle P1501 ist näherungsweise  $u_p(t) = u_{\text{VG}}(t)$  (**Bild 36**).

Die Spannung  $u_p(t)$  kann mit dem in der Feldquelle vorhandenem Messspannungsteiler und einem Oszilloskop gemessen werden.

#### 2. Messung der Spannung $u_p(t)$

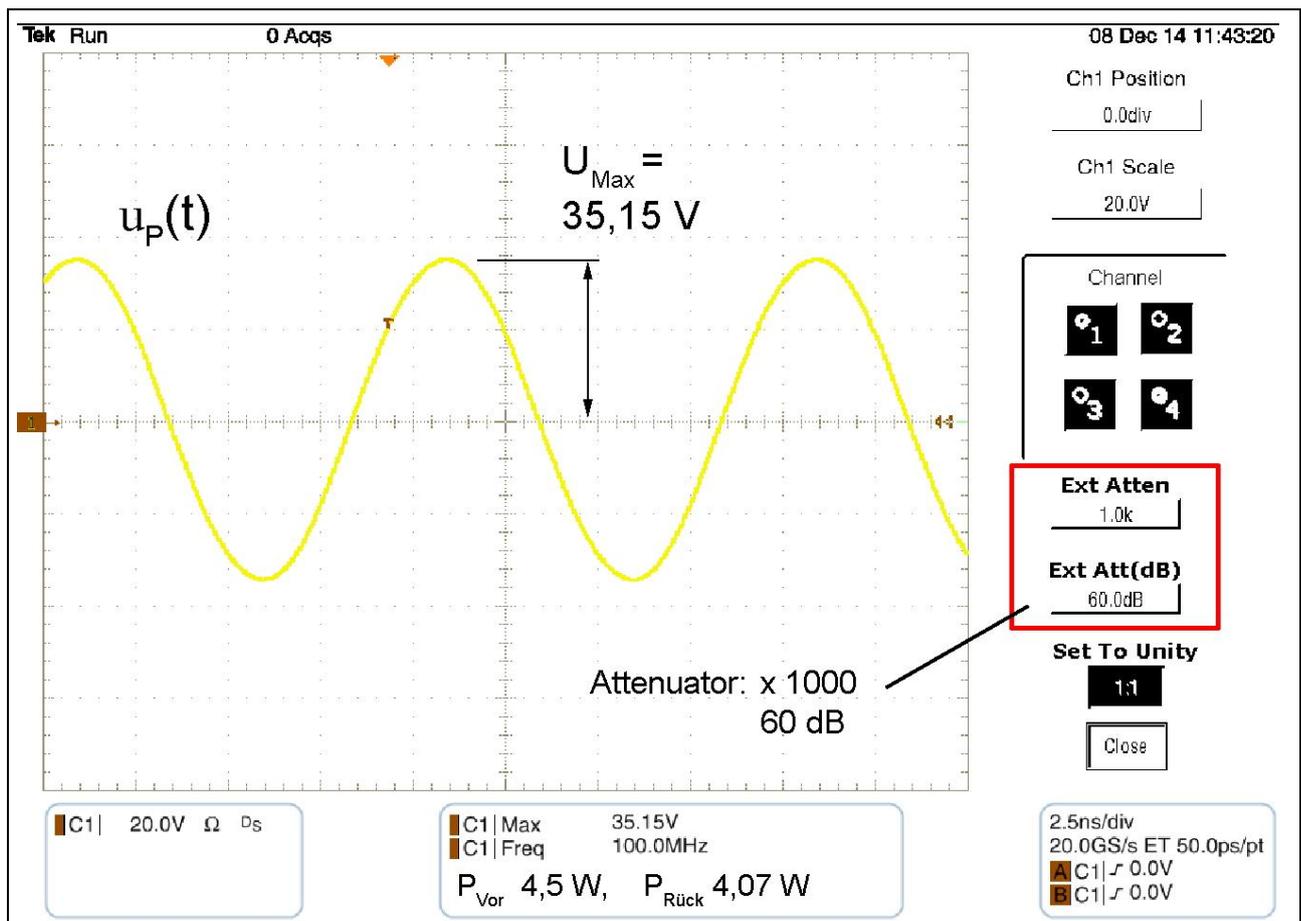
Die Spannung  $u_p(t)$  wird in der Feldquelle mit dem Messspannungsteiler erfasst und am Ausgang auf die Spannung  $U_{\text{AV}}$  geteilt. Mit einem Oszilloskop und entsprechenden Attenuatoreinstellungen kann der Zeitverlauf der Spannung  $u_p(t)$  dargestellt werden. Im Gegensatz zum Richtkoppler kann mit diesem Messverfahren der zeitliche Verlauf mit Phasenwinkelbezug erfasst werden.

Der Messausgang der Feldquelle ist auf 50 Ohm angepasst. Um korrekte Messwerte zu erhalten, muss der Eingang des Oszilloskops auf 50 Ohm eingestellt werden. In den Kanaleinstellungen des Oszilloskops wird der Attenuator auf 60 dB gestellt ( $\times 1000$ ) (**Bild 38**). Mit diesen Einstellungen wird die Spannung am Oszilloskop in Volt gemessen. **Es ist darauf zu achten, dass das Messsignal die maximal zulässige Eingangsspannung des Oszilloskops nicht überschreitet.** Gegebenenfalls ist ein externer Attenuator zu verwenden. Um fehlerfreie Phasenwinkel zu erhalten ist die Signalverzögerung des Messsystems in der Deskew-Einstellung des Oszilloskops berücksichtigt werden.



**Bild 37** Spannungsmessung  $u_p(t)$  am Messspannungsteiler mit dem Oszilloskop

Die Spannungsmessung (**Bild 37**) ist wesentlich genauer als die Berechnung aus der Vorwärtsleistung  $P_{\text{vor}}$  des Leistungsverstärkers. Im **Bild 38** ist für die Feldquelle P1501 der gemessene Spannungsverlauf dargestellt. Dabei ist die Vorwärtsleistung  $P_{\text{vor}} = 4,5 \text{ W}$ . An der Feldquelle steht eine Spannung  $\hat{U}_p$  von  $35,15 \text{ V}$  an. Bei einer Distanzringhöhe von  $h = 10 \text{ mm}$  entsteht ein elektrisches Feld von  $35,15 \text{ V/cm}$  bzw.  $3,5 \text{ kV/m}$ .



**Bild 38** Spannungsmessung mit **P1501**: Spannung  $u_p(t)$  bei einer Vorwärtsleistung von  $P_{\text{vor}} 4,5 \text{ W}$  und Rückwärtsleistung von  $P_{\text{rück}} 4,07 \text{ W}$ . Attenuator Einstellung  $60 \text{ dB}$  im Oszilloskop.

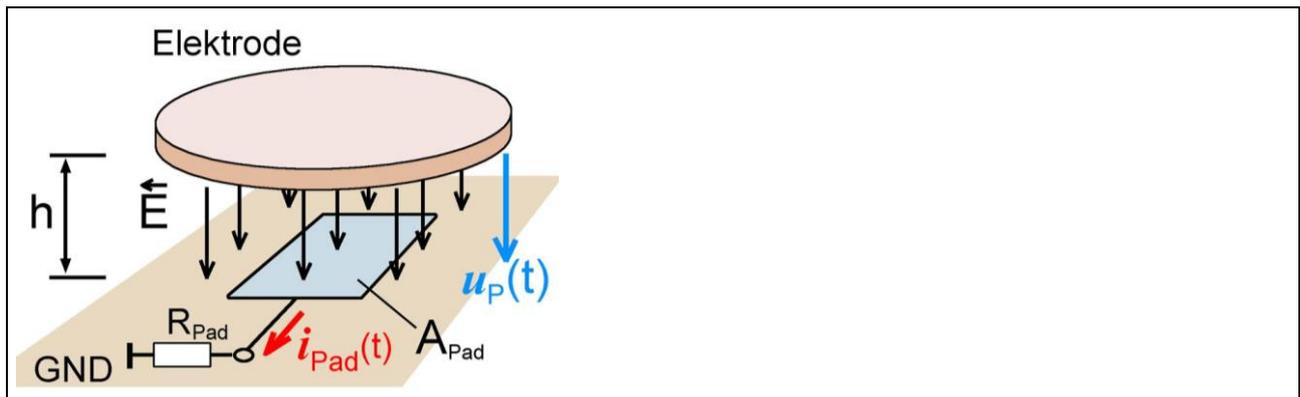
#### 1.4.2 Anpassung der Feldquelle

Die Feldquelle **P1501** ist nicht an den Leistungsverstärker angepasst. Der Leistungsverstärker arbeitet im Leerlauf (**leerlaufester Leistungsverstärker erforderlich**). Durch den **nicht** vorhandenen  $50 \text{ Ohm}$  Abschluss in der Feldquelle **P1501** entstehen Reflexionsvorgänge. Diese Reflexionsvorgänge erzeugen stehende Spannungs- und Stromwellen im HF-Stromweg der Feldquelle und auf dem Kabel zum Leistungsverstärker. Durch den nicht vorhandenen Abschlusswiderstand  $R_p$  in der Feldquelle **P1501** kann die doppelte elektrische Feldstärke erzeugt werden als im  $50 \text{ Ohm}$  abgeschlossenen Betrieb. Weiterhin muss in der Feldquelle keine Verlustleistung abgeführt werden.

Die zeitlichen Verläufe der Störspannungen übertragen sich proportional auf das elektrische Feld.

#### 1.4.3 Störmechanismus des elektrischen Feldes

Die an die Elektrode der Feldquelle angelegte Spannung erzeugt ein elektrisches Feld  $E$  in der Feldkammer (**Bild 34**). Das elektrische Feld  $E$  durchsetzt den Test-IC (**Bild 39**). Der Test-IC besitzt im Inneren oder an den Pins Netzwerke mit metallischen Oberflächen. Verbundene metallische Flächen werden zu einer Gesamtfläche zusammengefasst. Diese Gesamtfläche wird abstrakt als Pad bezeichnet. Die größten Pads des Test-ICs werden aus den Pins, Bonddrähten und Leadframes gebildet. Jeder Pin des Test-ICs bildet mit seinen angeschlossenen Leitungen ein Pad. Das abstrakte Pad wirkt als Auffangelektrode für elektrisches Feld (**Bild 39**). Diese Auffangelektrode bildet mit der Elektrode der Feldquelle einen Plattenkondensator.



**Bild 39** Wirkprinzip der E-Feldeinkopplung in den Test-IC

Der Abstand zwischen den Platten wird mit Höhe  $h$  bezeichnet. Die Fläche eines Pads wird als  $A_{\text{Pad}}$  bezeichnet. Das elektrische Feld der Elektrode trifft auf das Pad und speist einen Strom  $i_{\text{Pad}}(t)$  ein. Der Strom kann als Störstrom durch den IC fließen oder er kann an  $R_{\text{Pad}}$  eine Störspannung erzeugen. Der resultierende Widerstand des Pads gegen GND wird als  $R_{\text{Pad}}$  bezeichnet. Er wird aus dem Pull-up/Pull-down- Widerstand, dem Treiber-Widerstand und den IC-internen Widerständen gebildet. Wenn der Strom  $i_{\text{Pad}}(t)$  über den Widerstand  $R_{\text{Pad}}$  fließt, erzeugt er eine Spannung  $u_{\text{Pad}}(t)$ . Die erzeugte Störspannung  $u_{\text{Pad}}(t)$  kann direkt auf Signale wirken und Signalstörungen erzeugen.

Der Störstrom  $i_{\text{Pad}}(t)$  kann über Schutzdioden in innere Bereiche des ICs fließen<sup>13</sup>. Besonders über Diodenstrecken können schädliche Demodulationen des HF-Störstroms erzeugt werden. Beispiele dafür sind Schutzdioden, Referenzspannungsquellen, Eingänge von bipolaren OPVs, Basisanschlüsse von Transistoren.

Die Höhe des eingekoppelten Stromes und die daraus resultierende Störwirkung hängen von folgenden Parametern ab:

- die Höhe der eingestellten Vorwärtsleistung  $P_{\text{vor}}$
- Größe des Pads im IC ( $A_{\text{Pad}}$ )
- Abstand ( $h$ ) der Groundplane zur Elektrode der Feldquelle

#### 1.4.4 Berechnung des elektrischen Feldes E

Das elektrische Feld im Bereich des Test-ICs lässt sich mit folgender Gleichung berechnen:

$$E \text{ [V/cm]} = U_p \text{ [V]} / h \text{ [cm]} = K1 \text{ [1/cm]} \cdot U_p \text{ [V]} / \text{[cm]} \quad \text{GI 25}$$

Dabei ist  $h$  die Höhe der Elektrode über der Groundplane. Sie entspricht der Höhe  $h$  der Feldkammer über der Groundplane. Die Feldkammer, das heißt  $h$ , kann in zwei Höhen mit Hilfe der Distanzringe (3 mm, 10 mm) eingestellt werden. Alle anderen Abmessungen der Feldkammer sind für alle Feldquellen gleich.  $K1$  ist die Probekonstante (Übertragungsfunktion  $K1(f)$ ) der Feldquelle **P1501**.

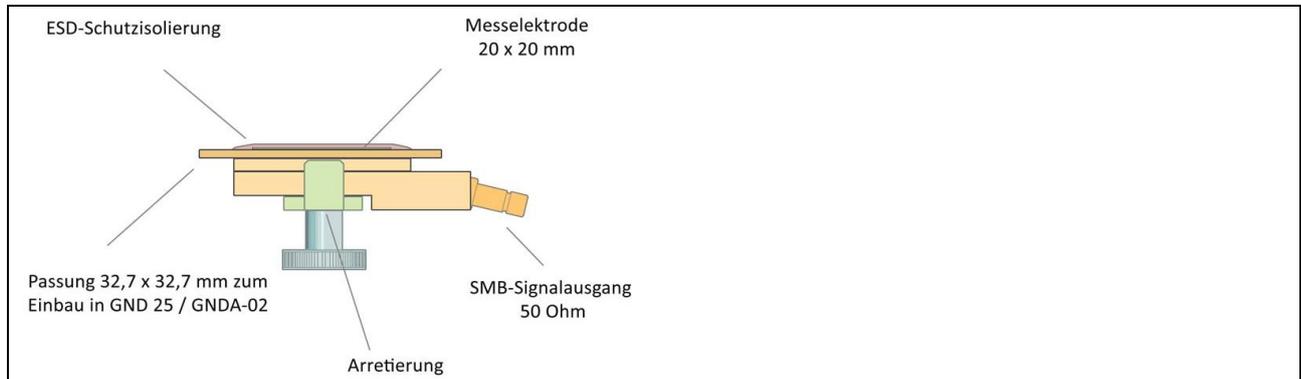
Die Berechnung in V/m erfolgt mit:

$$E \text{ [V/m]} = 100 \cdot U_p \text{ [V]} / h \text{ [cm]} \quad \text{GI 26}$$

<sup>13</sup>Dipl. Ing. Gunter Griessbach und Dipl. Ing. Gunter Langer, „Integrierte Schaltkreise (IC) sind heute die EMV-Schwachstellen elektronischer Geräte.“ Elektronik, 2014

### 1.4.5 Messung des elektrischen Feldes E

Das elektrische Feld E in der Feldkammer am Ort des Test-ICs kann mit dem E-Feldmesser **EFM 04**<sup>14</sup> gemessen werden (**Bild 40**). Bei Messungen kann ein Vorverstärker verwendet werden (**PA 303**, www.langer-emv.com). Der E-Feldmesser **EFM 04** ist passfähig für den Groundadapter **GNDA 02** und wird anstelle der Testleiterkarte<sup>15</sup> in den Groundadapter eingesetzt<sup>16</sup>.



**Bild 40** E-Feldmesser **EFM 04** zur Messung des elektrischen Feldes

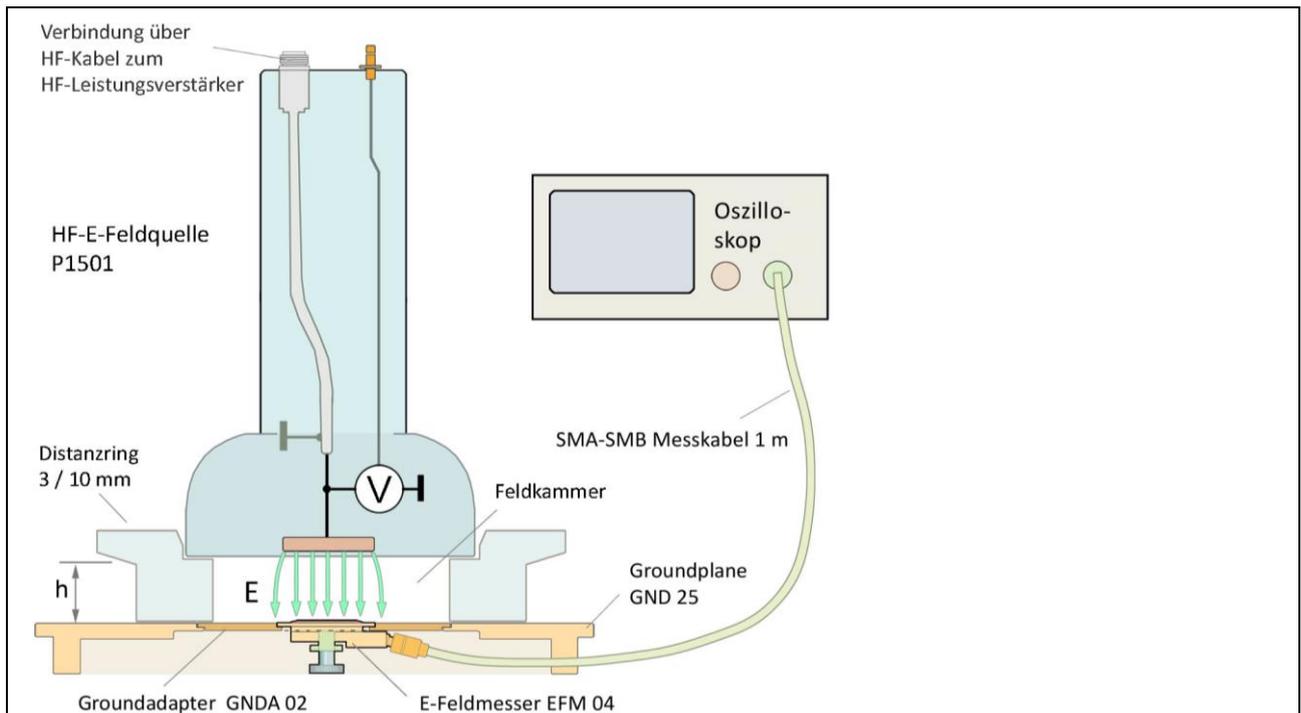
Der SMB-Ausgang des E-Feldmessers wird mit dem 50 Ohm SMB-SMA Messkabel mit dem Eingang des Oszilloskops verbunden (**Bild 41**). Der Messausgang ist auf 50 Ohm angepasst. Um korrekte Messwerte zu erhalten, muss der Eingang des Oszilloskops auf 50 Ohm eingestellt werden. Der auf dem E-Feldmesser angegebene Attenuatorwert wird in den Kanaleinstellungen des Oszilloskops eingetragen (**Bild 42**). Mit dem Attenuatorwert wird die elektrische Feldstärke im Oszilloskop im V/mm angezeigt.

**Es ist darauf zu achten, dass das Messsignal die maximal zulässige Eingangsspannung des Oszilloskops nicht überschreitet.** Gegebenenfalls ist ein externer Attenuator zu verwenden. Bei zu schwachem Signal kann ein Vorverstärker verwendet werden.

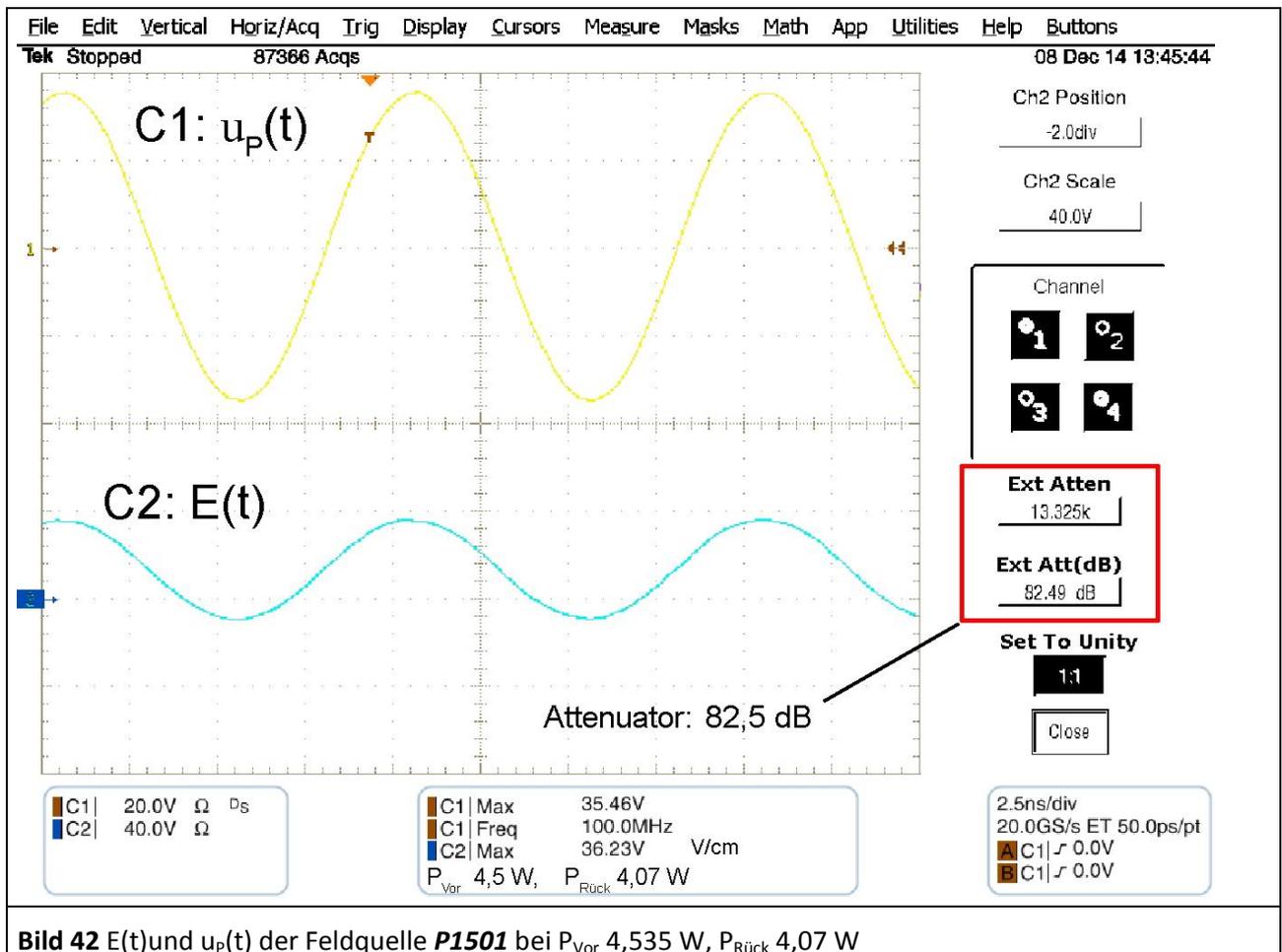
<sup>14</sup> Der E-Feldmesser **EFM 04** ist nicht im Lieferumfang enthalten.

<sup>15</sup> Die Testleiterkarte ist in der „**Anleitung IC-Test**“ beschrieben, mail@langer-emv.de.

<sup>16</sup> Der Groundadapter **GNDA 02** und Groundplane **GND 25** sind in der **IC-Testumgebung ICE1** enthalten.  
[www.langer-emv.de](http://www.langer-emv.de)



**Bild 41** Messung des elektrischen Feldes der Feldquelle **P1501** mit dem E-Feldmesser **EFM 04**.



**Bild 42**  $E(t)$  und  $u_p(t)$  der Feldquelle **P1501** bei  $P_{Vor}$  4,535 W,  $P_{Rück}$  4,07 W

Die Korrektur der Signalverzögerung für phasenrichtige Messung mit dem Oszilloskop erfolgt wie bei **EPM 02**.

### 1.4.6 Messung der Änderung des elektrischen Feldes $dE/dt$

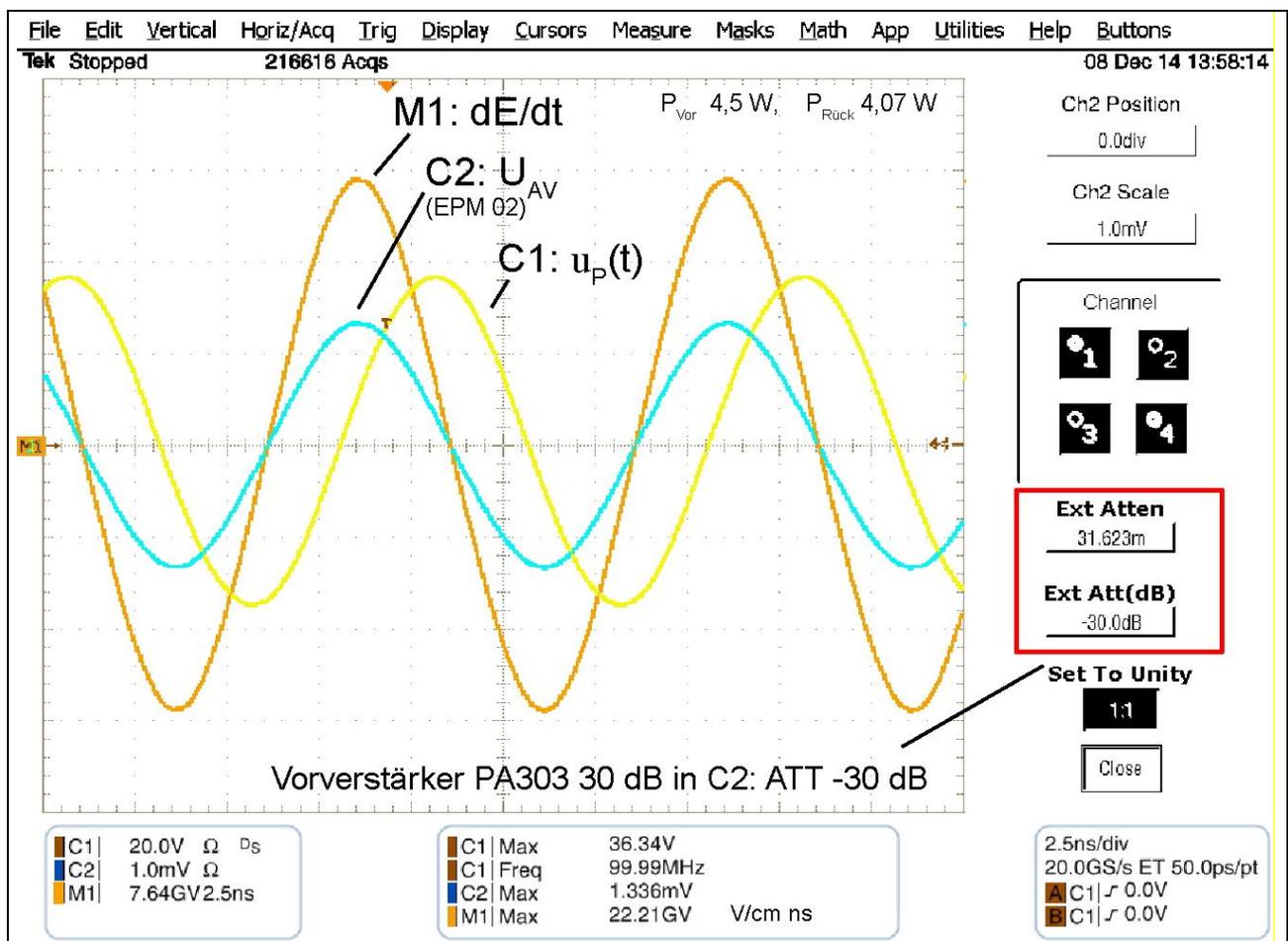
Der zeitliche Verlauf von  $dE/dt = \dot{E}(t)$  in der Feldkammer am Ort des Test-ICs kann mit dem  $\dot{E}$ -Feldmesser **EPM 02** gemessen werden (**Bild 44**). Die elektrische Feldstärke  $E(t)$  in der Feldkammer ergibt sich aus der Spannung  $u_p(t)$  und dem Abstand  $h$  (Distanzring) der Elektrode zu Ground.  $dE/dt$  ergibt sich dabei aus der zeitlichen Änderung von  $u_p(t)$  (**Bild 43**).

$$dE/dt = \dot{E}(t) = d(u_p(t) / h) / dt \quad \text{Betrag komplex} \rightarrow \dot{E} = (\omega / h) \cdot U_p \quad \text{Gl 27}$$

Der Verschiebestrombelag  $i'_1(t)$  [A/mm<sup>2</sup>] (**Bild 49**), der den Test-IC belastet, ergibt sich aus:

$$i'_1(t) = \epsilon \cdot dE / dt = \epsilon \cdot \dot{E}(t) = dD / dt \quad \text{Gl 28}$$

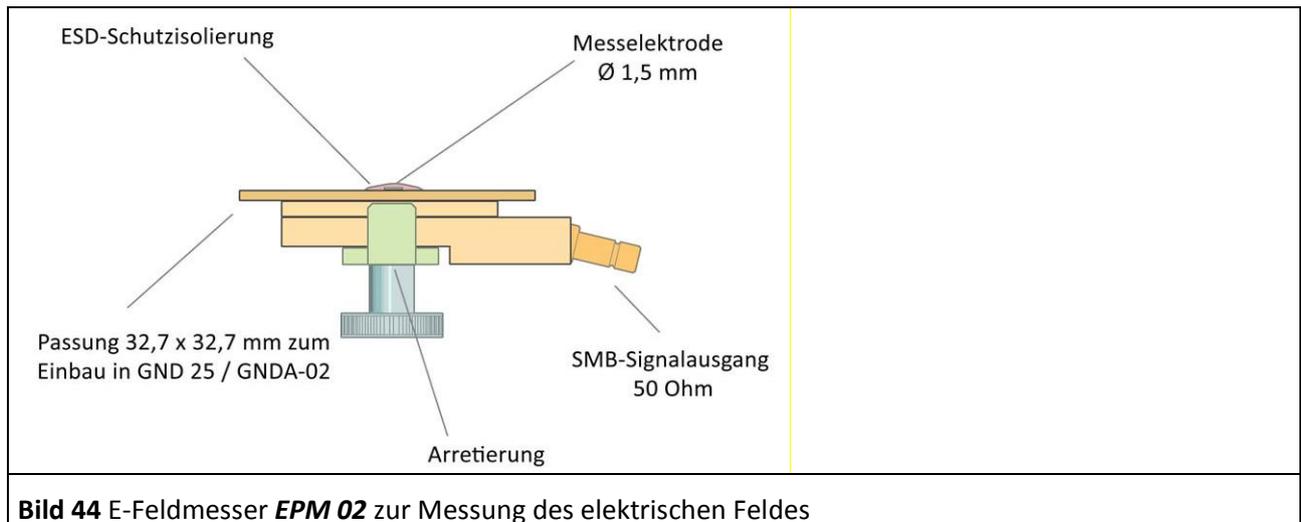
Dabei ist  $\epsilon = \epsilon_r \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}$  As/Vm die Dielektrizitätskonstante, und  $D = \epsilon \cdot E$  die Raumladungsdichte [A/mm<sup>2</sup> s] mit der z.B. die Fläche  $A_{\text{pad}}$  (**Bild 39**) belegt wird.



**Bild 43**  $dE/dt$  und  $u_p(t)$  der Feldquelle **P1501**. Das Ausgangssignal des  $dE/dt$ -Messers **EPM 02** wird mit dem Vorverstärker **PA 303** um 30 dB verstärkt. Berücksichtigung im Vertikalmenü C2

Der  $\dot{E}$ -Feldmesser wird anstelle des Test-ICs in den Groundadapter eingesetzt. Der  $\dot{E}$ -Feldmesser **EPM 02** ist passfähig für den Groundadapter **GND A 02**. Für die Messung ist er in die Groundplane **GND 25** einzusetzen<sup>17</sup>.

<sup>17</sup> Groundadapter **GND A 02** und Groundplane **GND 25** sind in der **IC-Testumgebung ICE1** enthalten.

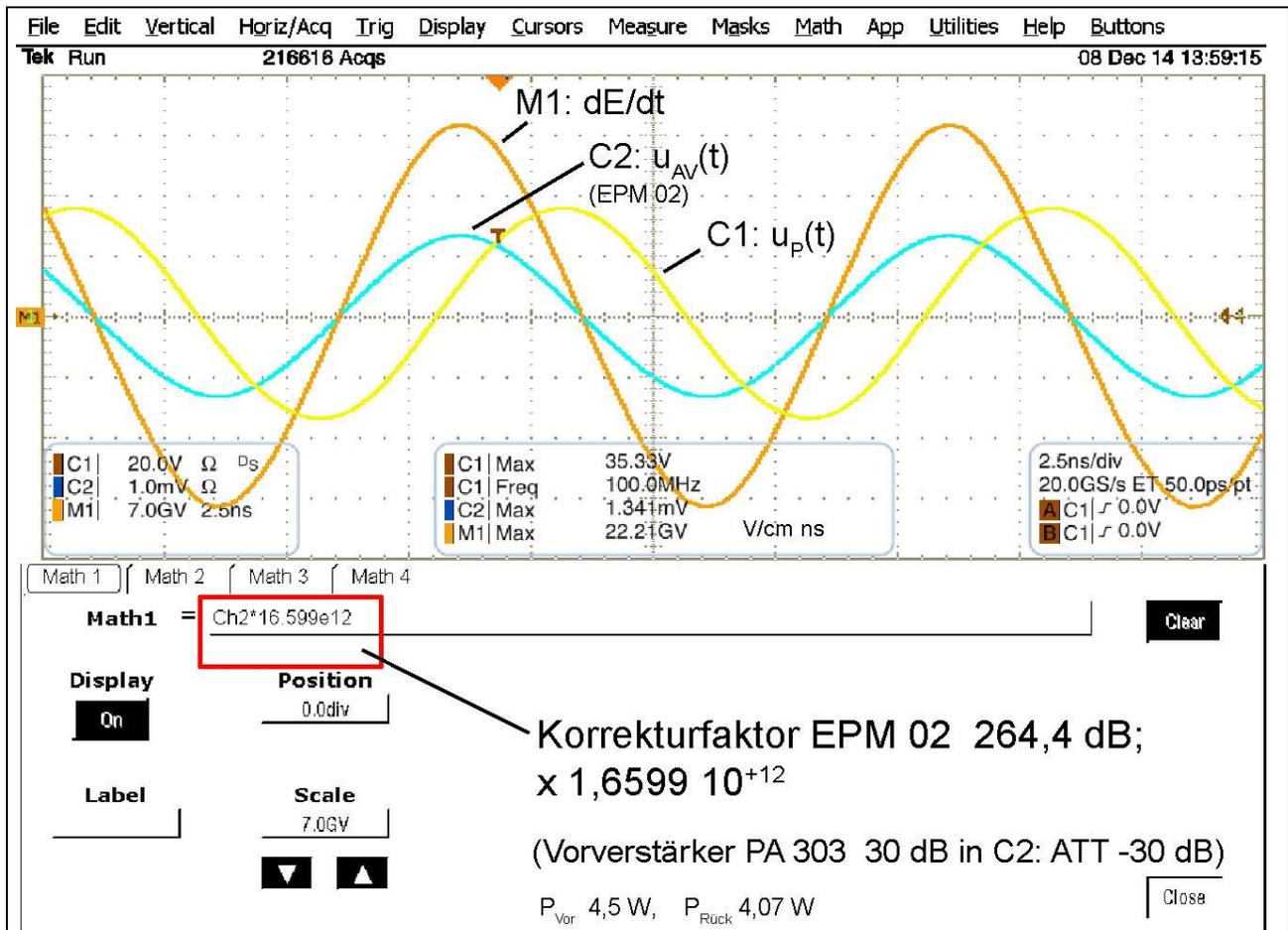


**Bild 44** E-Feldmesser **EPM 02** zur Messung des elektrischen Feldes

Der SMB-Ausgang des  $\dot{E}$ -Feldmessers **EPM 02** wird mit dem 50 Ohm SMA-SMB Messkabel mit dem Eingang des Oszilloskops verbunden (**Bild 41**). Der Messausgang ist auf 50 Ohm angepasst. Um korrekte Messwerte zu erhalten, muss der Eingang des Oszilloskops auf 50 Ohm eingestellt werden. Am Signalausgang gibt der  $\dot{E}$ -Feldmesser die Spannung  $u_{AV}(t)$  ab. Die Spannung  $u_{AV}(t)$  ist proportional zur der auf die EPM 02-Messelektrode einwirkenden elektrischen Feldstärkeänderung  $\dot{E}(t)$ . Mit dem Korrekturfaktor des **EPM 02** (Attenuatorwert) wird die Spannung  $u_{AV}(t)$  in elektrische Feldstärkeänderung  $\dot{E}(t)$  umgerechnet.

Der auf dem  $\dot{E}$ -Feldmesser angegebene Attenuatorwert wird in den Kanaleinstellungen bzw. Vertikalmenü des Oszilloskops eingetragen. Es kann folgender Wert angegeben sein: ATT 264,4 dB, E[kV/cm ns]. 264,4 dB entspricht dabei  $20 \log 264,4 = 1,6599 \cdot 10^{12}$ .

Mit dem Attenuatorwert wird die zeitliche Änderung der elektrische Feldstärke im Oszilloskop im V/cm ns (GV/cm s) angezeigt. Im Vertikalmenü bzw. Kanaleinstellungen des Oszilloskops sind im Allgemeinen Einstellungen des Attenuators bis 200 dB ( $\times 10^{10}$ ) möglich. Deshalb ist es sinnvoll, den Attenuatorwert in den Kanaleinstellungen auf 0 dB ( $\times 1$ ) einzustellen und  $\dot{E}(t)$  in einem Mathematikkanal (**Bild 45**) zu berechnen. Im **Bild 43** wurde  $u_{AV}(t)$  mit dem Kanal C2 des Oszilloskops bei einer ATT Einstellung von 0 dB gemessen. Im Mathematikkanal M2 erfolgt die Berechnung  $(1,6599 \cdot 10^{12} \cdot C2)$  (**Bild 45**).

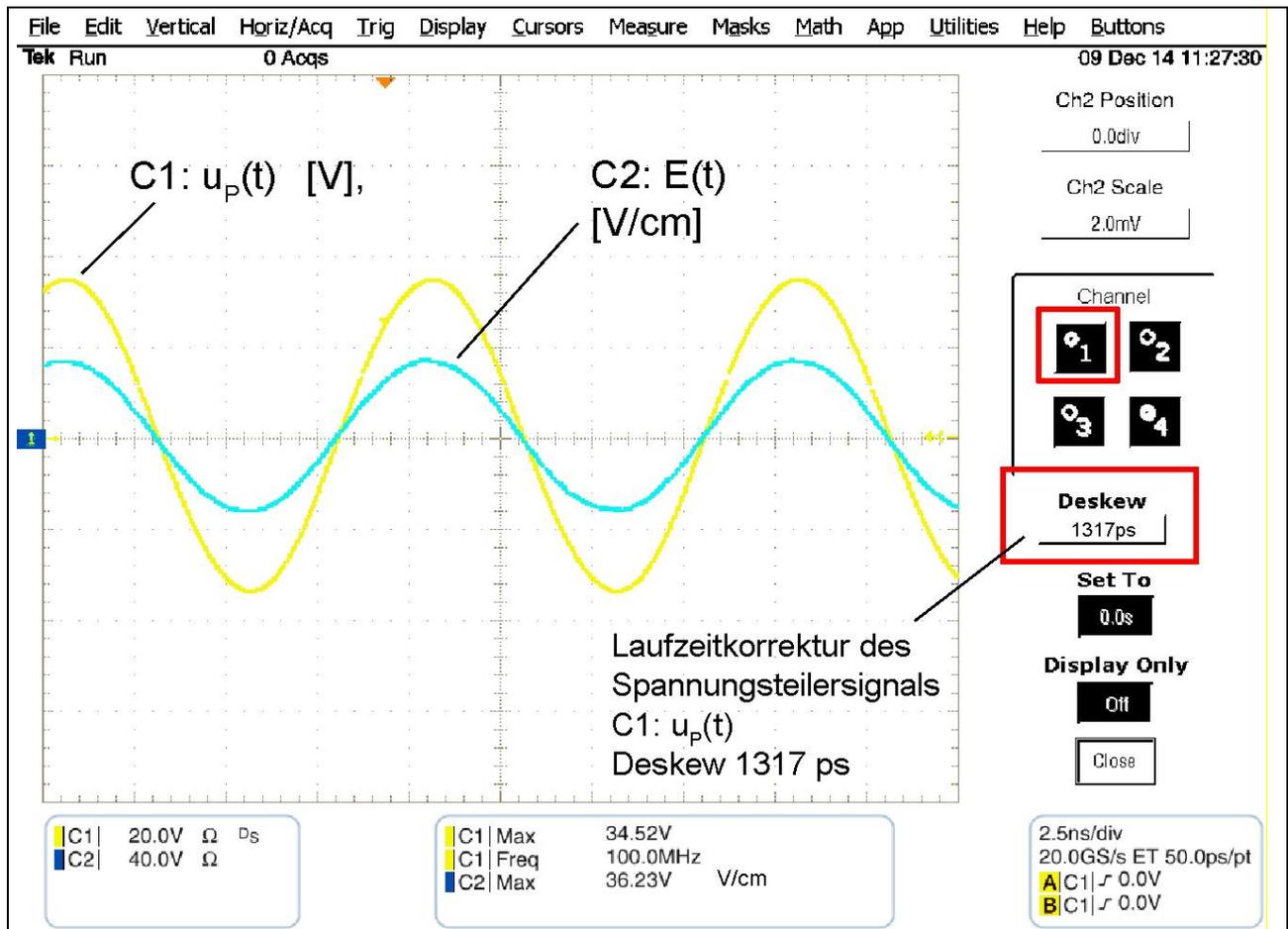


**Bild 45** Einstellung des Mathematikkanals zur Berechnung von  $\dot{E}(t)$  aus C2. Dabei wurde der Attenuator von C2 auf 0 dB ( $\times 1$ ) eingestellt

Der Attenuatorwert kann mit **GI 28** auf  $dD/dt$  oder mit  $\epsilon$  in den Verschiebestrombelag  $i'_1$  umgestellt werden.

Es ist darauf zu achten, dass das Messsignal die maximal zulässige Eingangsspannung des Oszilloskops nicht überschreitet. Gegebenenfalls ist ein externer Attenuator zu verwenden. Bei zu schwachem Signal kann ein Vorverstärker verwendet werden. (**PA 303**, 30dB, Langer EMV-Technik GmbH)

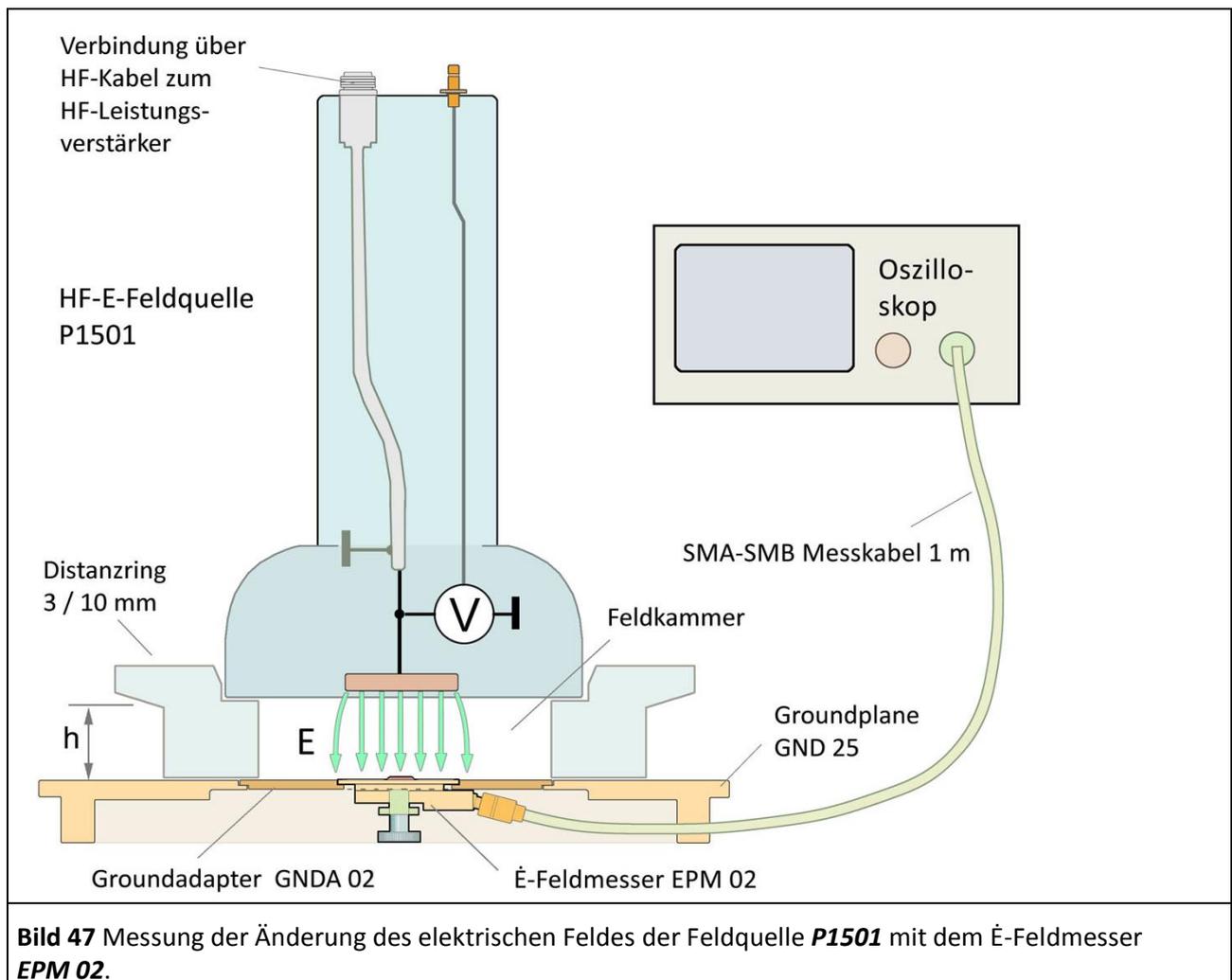
Wenn zwischen Probespannung  $u_p(t)$  und  $E$  im Oszilloskop ein Phasenbezug hergestellt werden soll, sind die Laufzeitverzögerungen des Messzweiges der Feldquelle und des **EPM 02** im Oszilloskop als Deskew einzutragen. Als erstes wird die Laufzeitverzögerung des Messzweiges der Feldquelle (E-Feld zum AV Ausgang des Spannungsteilers) eingetragen (**Bild 46, Tabelle 9**).



**Bild 46** Die Laufzeitverzögerung des Messzweiges vom E-Feld der Feldquelle zum  $U_{AV}$  Ausgang des Spannungsteilers werden im Oszilloskop als Deskew eingetragen.

Als Zweites wird die Laufzeitverzögerung des **EPM 02** (**Tabelle 10**) im zugehörigen Messkanal des Oszilloskops eingetragen. In diesem Fall ist das der Kanal C2. Es wird analog verfahren wie mit Kanal C1. Im **Bild 46** ist für den **BPM 02** die Laufzeitverzögerung von 117 ps (**Tabelle 10**) bereits berücksichtigt. Damit werden die Phasenbezüge im Oszilloskop korrekt abgebildet. Das ist erkennbar an der  $90^\circ$  Phasenverschiebung von  $dE/dt(t)$  zu  $u_p(t)$  (**Bild 48**) und der Phasengleichheit von  $E(t)$  zu  $u_p(t)$  **Bild 46**.

Wenn der Vorverstärker **PA 303** in einen Messkanal eingefügt wird, entsteht eine zusätzliche Signalverzögerung von 440 ps. Für phasenrichtiges Messen ist diese Verzögerung in den Einstellungen des Oszilloskops zu berücksichtigen. In der Praxis kann es erforderlich werden, dass die Einstellungen zur korrekten Phasenlage bei jedem Messplatz neu abgeglichen werden müssen.



**Bild 47** Messung der Änderung des elektrischen Feldes der Feldquelle **P1501** mit dem  $\dot{E}$ -Feldmesser **EPM 02**.

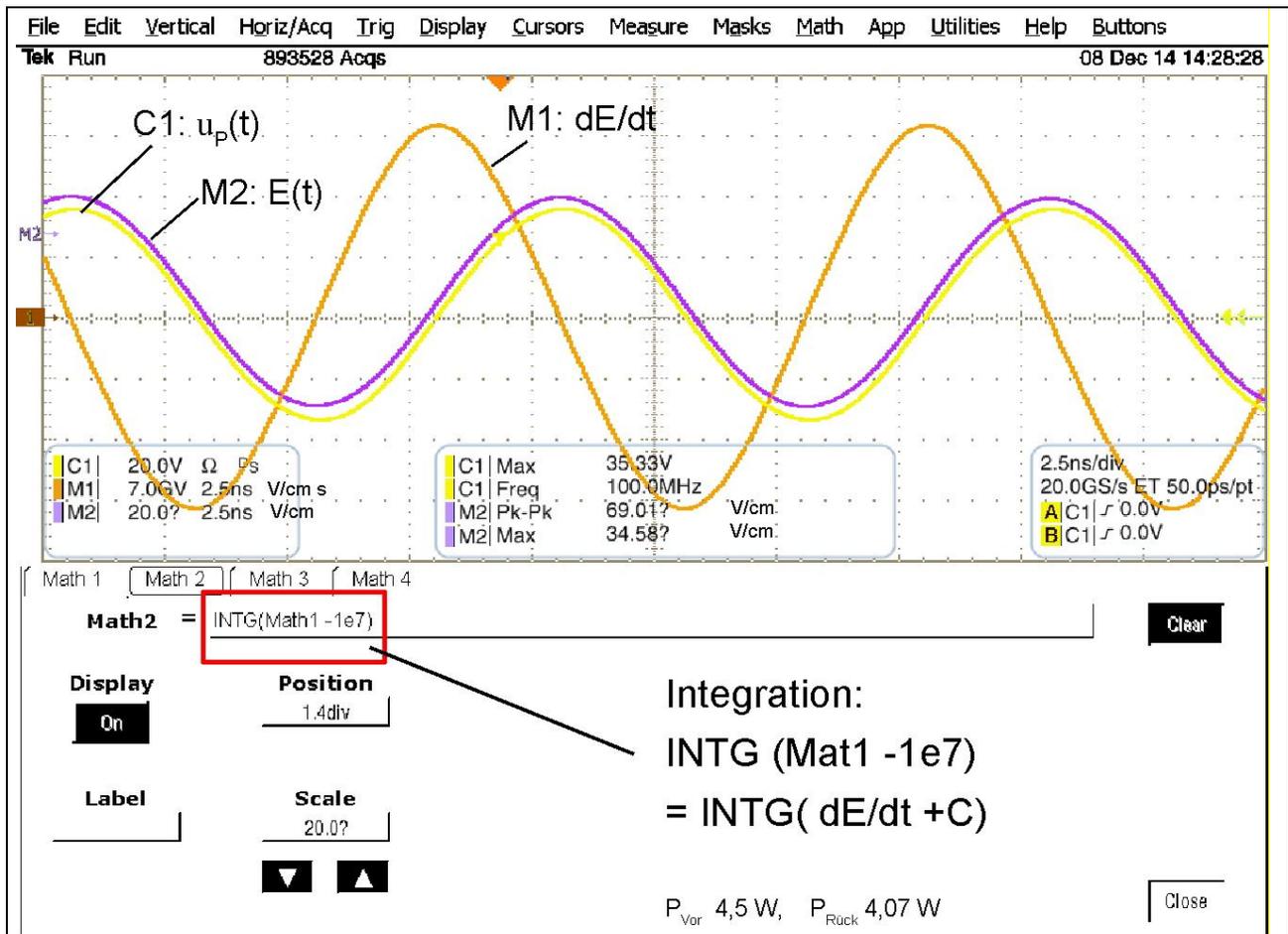
Durch Integration kann der  $\dot{E}$ -Verlauf in die elektrische Feldstärke  $E(t)$  umgerechnet werden.

$$E(t) = \int \dot{E}(t) dt + C \quad \text{Komplex} \rightarrow E = (1/\omega) \dot{E} (+C) \quad \text{Gl 29}$$

Dabei ist  $C$  die Integrationskonstante. Die Integration kann im Oszilloskop durchgeführt werden (**Bild 48**). Das Messsignal  $u_{AV}(t)$  ( $C2$ ) wird im Oszilloskop mit dem entsprechenden Attenuatorwert (**Bild 45**) in  $\dot{E}(t)$  umgerechnet. Das erfolgt hier im Mathematikkanal M2. Die Maßeinheit von  $\dot{E}(t)$  ist dann  $\text{kV/cm ns}$ .  $\dot{E}(t)$  aus Mathematikkanal M2 wird in den Mathematikkanal M4 eingesetzt. Als Ergebnis der Integration erhält man die Feldstärke  $E(t)$  in der Maßeinheit  $\text{kV/cm}$  (**Bild 48**). Eine Umrechnung auf  $\text{V/m}$  erfolgt mit  $\times 10^5$ .

Der Wert der Integrationskonstante  $C$  muss von Hand in die Gleichung des Oszilloskops eingetragen werden. In Kapitel 1.2.8 „Messung der Induktion  $dB/dt$ “ wurde die Vorgehensweise ausführlich für die Ermittlung der Flussdichte  $B$  erläutert.

Der Endwert der Integrationskonstante wird durch Iteration ermittelt. Als Startwert kann z.B. 0 verwendet werden. Die durch Integration berechnete Feldstärke muss proportional dem bekannten Verlauf von  $u_p(t)$  sein. Der Verlauf  $u_p(t)$  ist im **Bild 43** und **Bild 45** dargestellt. Der Wert der Integrationskonstanten ist von Hand schrittweise so anzupassen, dass der Verlauf von  $E(t)$  dem Verlauf von  $u_p(t)$  proportional entspricht. Wenn die Integrationskonstante  $C$  in ihrem Wert zu klein ist, fällt die Messkurve  $E(t)$  gegenüber  $u_p(t)$  ab (für  $B$  Feld in **Bild 20** gezeigt). Dann muss die Integrationskonstante  $C$  erhöht werden. Wenn aber die Messkurve gegenüber  $u_p$  ansteigt ist die Integrationskonstante  $C$  in ihrem Wert zu groß (für  $B$ -Feld in **Bild 21** gezeigt). Sie muss dann von Hand verringert werden.



**Bild 48** Integration über  $dE/dt$  (Mathematikkanal M2) erzeugt die Feldstärke  $E(t)$  [V/cm]. Bei einer Distanzringhöhe von  $h = 10 \text{ mm}$  ist die Kurve  $E(t)$  mit  $u_p(t)$  deckungsgleich.

Wenn  $\dot{E}$  mit einem Spektrumanalysator logarithmisch (in dB) gemessen wird, kann  $E$  wie folgt integriert werden:

$$E = \dot{E} - 20 \log \omega$$

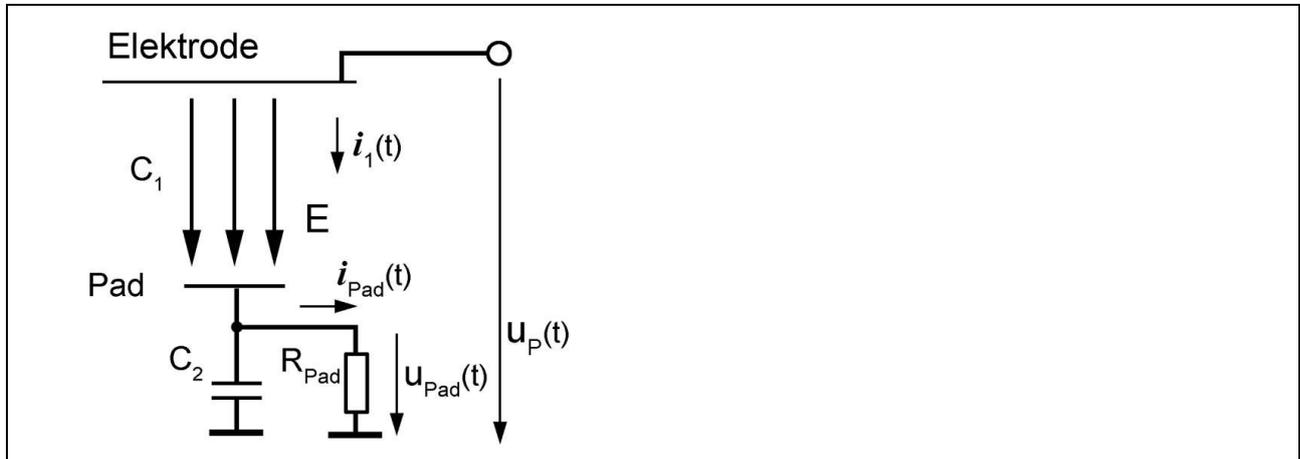
GI 30

Korrektur des Messsignals mit  $20 \log \omega$  kann mit der Software **ChipScan ESA**<sup>18</sup> erfolgen.

<sup>18</sup> Die Software **ChipScan-ESA** der Langer EMV-Technik GmbH ist für die übersichtliche und vergleichbare Erfassung, Dokumentation und Analyse von Messkurven eines Spektrumanalysators entwickelt. [www.langer-emv.de](http://www.langer-emv.de).

### 1.4.7 Kapazitiver Koppelmechanismus der Feldquelle P1501 zum Test-IC

Es gibt zwei Hauptarten der kapazitiven Verkopplung (**Bild 39**) der Elektrode der Feldquelle mit Pads des Test-ICs. Abgeleitet werden die Verkopplungen aus dem Feldersatzschaltbild der Elektrode der Feldquelle **P1501** und dem Pad (**Bild 49**).



**Bild 49** Feldersatzschaltbild der Elektrode der Feldquelle **P1501** und des Pads

Die Spannung  $u_p(t)$  **Bild 49** erzeugt an der Elektrode der Feldquelle **P1501** ein elektrisches Feld  $E(t)$ . Das Pad und die Elektrode der Feldquelle bilden einen Plattenkondensator. Das Feld  $E(t)$  im Plattenkondensator (Elektrode-Pad) koppelt einen Strom  $i_1(t)$  in das Pad. Dieser Strom ist ein kapazitiver Strom. Die zugehörige Kapazität  $C_1$  ist die Kapazität des Plattenkondensators (Pad-Elektrode).

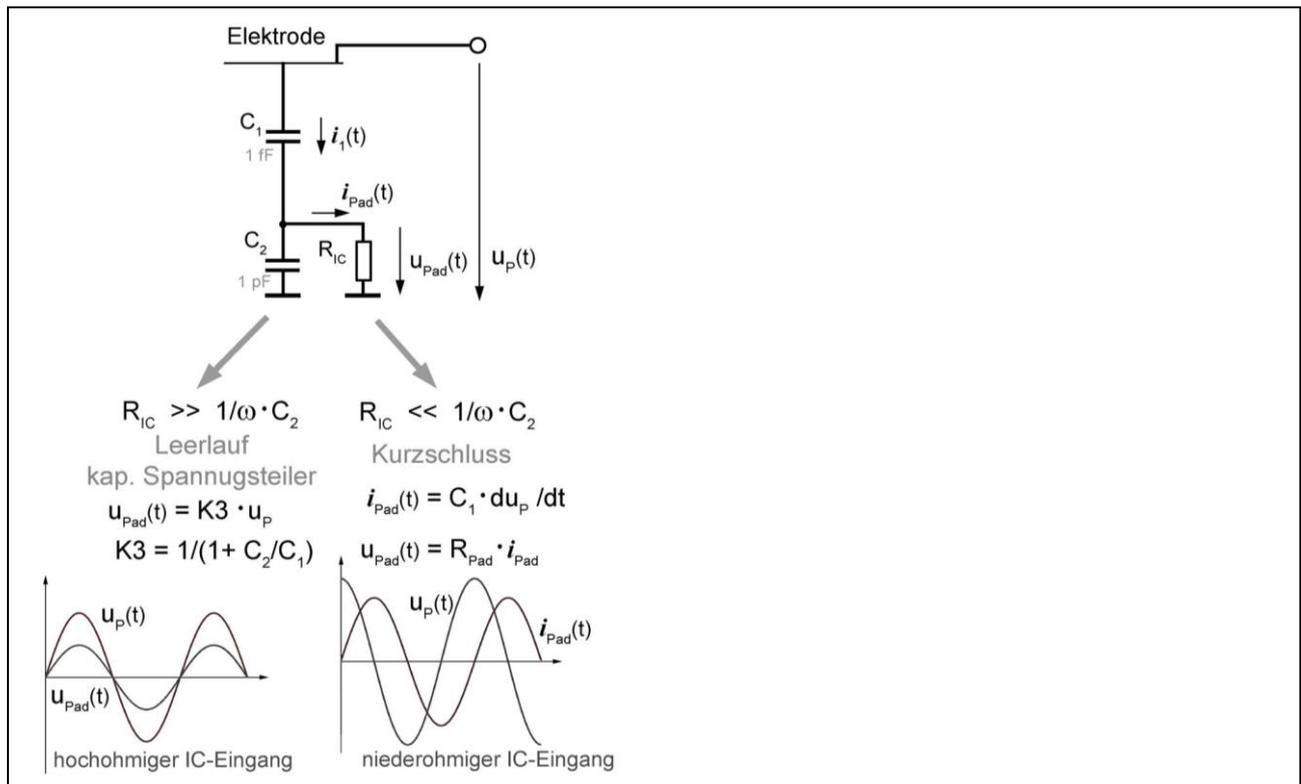
$$i_1(t) = C_1 \cdot du_p / dt \quad (\text{bei } u_p \approx u_{c1}) \quad \text{Gl 31}$$

Der Strom  $i_1(t)$  lässt sich auf die Fläche  $A_{\text{Pad}}$  [mm<sup>2</sup>] des Plattenkondensators  $C_1$  normieren.

$$i_1'(t) = i_1(t) / A_{\text{Pad}} = (C_1 / A_{\text{Pad}}) du_p / dt = C_1' \cdot du_p / dt = \epsilon dE / dt = dD / dt \quad \text{Gl 32}$$

Der spezifische Strom, der in den Test-IC fließt hat die Maßeinheit A/mm<sup>2</sup>, **Tabelle 8**.

Das Pad besitzt eine eigene Kapazität  $C_2$  gegen Ground. Das Feldersatzschaltbild (**Bild 49**) lässt sich in einen kapazitiven Teiler bestehend aus konzentrierten Elementen überführen (**Bild 50**).



**Bild 50** Ersatzschaltbild des kapazitiven Teilers, Hauptarten der kapazitiven Verkopplung durch Fallunterscheidung.

Ermittlung der Hauptarten der kapazitiven Verkopplung durch Fallunterscheidung:

### 1. Spannungskopplung

Bei  $R_{\text{Pad}} \gg 1/\omega C_2$  arbeitet die Schaltung im Leerlauf wie ein kapazitiver Spannungsteiler. Dann kann  $R_{\text{Pad}}$  vernachlässigt werden. Die Spannung  $u_p(t)$  wird am Teiler im Verhältnis  $C_1/C_2$  geteilt. Der Faktor liegt im Beispiel (**Bild 50**) etwa bei 1000. An  $C_2$  steht etwa 1/1000 von  $u_p(t)$  an. Mit dieser Spannung wird der Test-IC beaufschlagt. Sie folgt frequenzunabhängig dem kapazitiven Teiler. Die Spannungen teilen sich frequenzunabhängig im Verhältnis  $C_1/C_2$ . Deshalb besitzt der Spannungsverlauf im Test-IC den gleichen zeitlichen Verlauf wie die Spannung  $u_p(t)$  an der Elektrode der Feldquelle. D.h. es ist ein phasengleicher sinusförmiger Verlauf. Der Scheitelwert von  $u_p(t)$  wird mit dem Koeffizienten  $K_3$  (**Bild 50**) abgeschwächt.

Um an  $R_{\text{Pad}}$  alle Frequenzen bis 1 GHz zu übertragen, muss  $R_{\text{Pad}}$  im Bereich von 10 kOhm liegen. Das wird für Pads mit entsprechenden Pull up und Pull down Widerständen, an Quarzoszillatoren und offenen Pins erfüllt.

### 2. Stromkopplung

Bei  $R_{\text{Pad}} \ll 1/\omega C_2$  arbeitet die Schaltung im Kurzschluss. Die Kapazität  $C_2$  wird von  $R_{\text{Pad}}$  kurzgeschlossen. Der aus  $u_p(t)$  differenzierte Strom  $i_{\text{Pad}}(t) = C_1 \cdot du_p/dt$  fließt über  $R_{\text{Pad}}$  ab. An  $R_{\text{Pad}}$  erzeugt er die Spannung  $u_{\text{Pad}}(t)$ . Stromanteile mit höheren Frequenzen erzeugen mehr Spannung. Die Spannung  $u_{\text{Pad}}(t)$  kann Signale des Test-ICs beeinflussen. Sie ist umso höher, je größer  $R_{\text{Pad}}$  ist oder je höher die Frequenz der Probespannung  $u_p(t)$  der Feldquelle ist.

Der Spannung  $u_p(t)$  (Spannung an der Elektrode) wird durch den Kondensator  $C_1$  differenziert (**Bild 50**). Der in das Pad eingekoppelte Strom  $i_{\text{Pad}}(t)$  ist umso höher, je höher die Frequenz von  $u_p(t)$  ist (Frequenz des Signalgenerators, **Bild 3**)

### 1.4.8 Störspannungsübertragung in den Test-IC

Die Spannung  $u_p(t)$  teilt sich mit dem Kapazitiven Teiler  $C_1/C_2$  zu  $u_{\text{pad}}(t)$ . Im Folgenden werden für Berechnungen die Effektivwerte benutzt:

$$u_{\text{pad}}(t) = C_1 / C_2 \cdot U_p = K_3 \cdot u_p(t) \quad \text{Gl 33}$$

Die Gleichung für den Koppelfaktor  $K_3$  (**Bild 50**) des kapazitiven Spannungsteilers lässt sich unter der Annahme  $C_2 \gg C_1$  vereinfachen:

$$K_3 = C_1 / C_2 \quad \text{Gl 34}$$

Es ist zu beachten, dass der alleinige Kapazitätsbelag des IC-Pins gegen Ground (Testleiterkarte) nicht die gesamte Kapazität des IC-Pins ausmacht. Dieser Kapazitätsbelag liegt für Leiterplattenmaterial FR4 mit 0,2 mm Lagenabstand etwa bei 0,2 pF/mm<sup>2</sup>. An den Leitungsnetzen im Layout der Testleiterkarte und an den Leitungsnetzen im Test-IC (Schutzdioden) gibt es einen größeren Kapazitätsanteil.  $C_2$  beinhaltet diese gesamte Kapazität. Sie ist nur gering von der Fläche des (abstrakten) Pads gegen Ground abhängig. Deshalb ist eine Normierung  $C_2$  auf die Fläche des (abstrakten) Pads nicht sinnvoll.

Jedoch kann die Kapazität  $C_1$  auf die Pad-Fläche  $A_{\text{pad}}$  normiert werden. Die normierte Kapazität  $C_1$  wird als Kapazitätsbelag  $C_1'$  bezeichnet.

$$C_1' = C_1 / A_{\text{pad}} \quad \text{Gl 35}$$

Der Kapazitätsbelag  $C_1'$  ist für die Feldquelle eine Konstante. Sie ergibt sich aus:

$$C_1' = \epsilon_0 \epsilon_r / h \quad \text{Gl 36}$$

Sie ist in **Tabelle 7** für die Höhe  $h$  3 mm und 10 mm angegeben. Für Berechnungen ist die Padfläche  $A_{\text{pad}}$ , d.h. die gesamte für das elektrische Feld  $E$  wirksame metallische Fläche eines IC-Netzes (Plattenkondensator) zu verwenden.

Die Konstante  $K_3$  lässt sich abschätzen. Die gesamte Kapazität  $C_2$  eines Pads soll 5 pF sein. Die für das elektrische Feld  $E$  wirksame Oberfläche des Pads von 4 mm<sup>2</sup> erzeugt mit dem Kapazitätsbelag  $C_1'$  von 1,35 fF/mm<sup>2</sup> eine Kapazität  $C_1$  von 5 fF. Diese beiden Kapazitätswerte erzeugen einen Koppelfaktor von  $K_3 = C_1/C_2$  von ca. 1000. Das heißt eine Probespannung  $U_p = 35$  V ( $P_{\text{vor}}$  ca 5 W) an der Elektrode der Feldquelle wird am IC-Pin auf etwa 0,035 V heruntergeteilt. Diese geringe Spannung wird digitale Systeme kaum beeinflussen können, jedoch können analoge Systeme durch solche Spannungen beeinflusst werden.

### 1.4.9 Störstromübertragung in den Test-IC

Die Elektrode der Feldquellen **P1501** besitzt eine kapazitive Verkopplung zum Pad des Test-ICs.  $R_{\text{pad}}$  schließt für den Fall  $R_{\text{pad}} \ll 1 / \omega C_2$  die Kapazität  $C_2$  kurz, so das gilt:

$$i_{\text{pad}}(t) = C_1 \cdot du_p / dt \quad \text{komplex} \rightarrow \quad i_{\text{pad}} = C_1 \cdot \omega \cdot U_p \quad \text{Gl 37}$$

Dabei entspricht die Kapazität  $C_1$  der kapazitiven Kopplung zwischen Elektrode und Pad des Test-ICs. Aus der spezifischen Kapazität  $C_1'$  und der Pad-Fläche  $A_{\text{pad}}$  lässt sich  $C_1$  berechnen.

$$C_1 = C_1' \cdot A_{\text{pad}} \quad \text{Gl 38}$$

Damit entsteht **GI 39** aus **GI 37**:

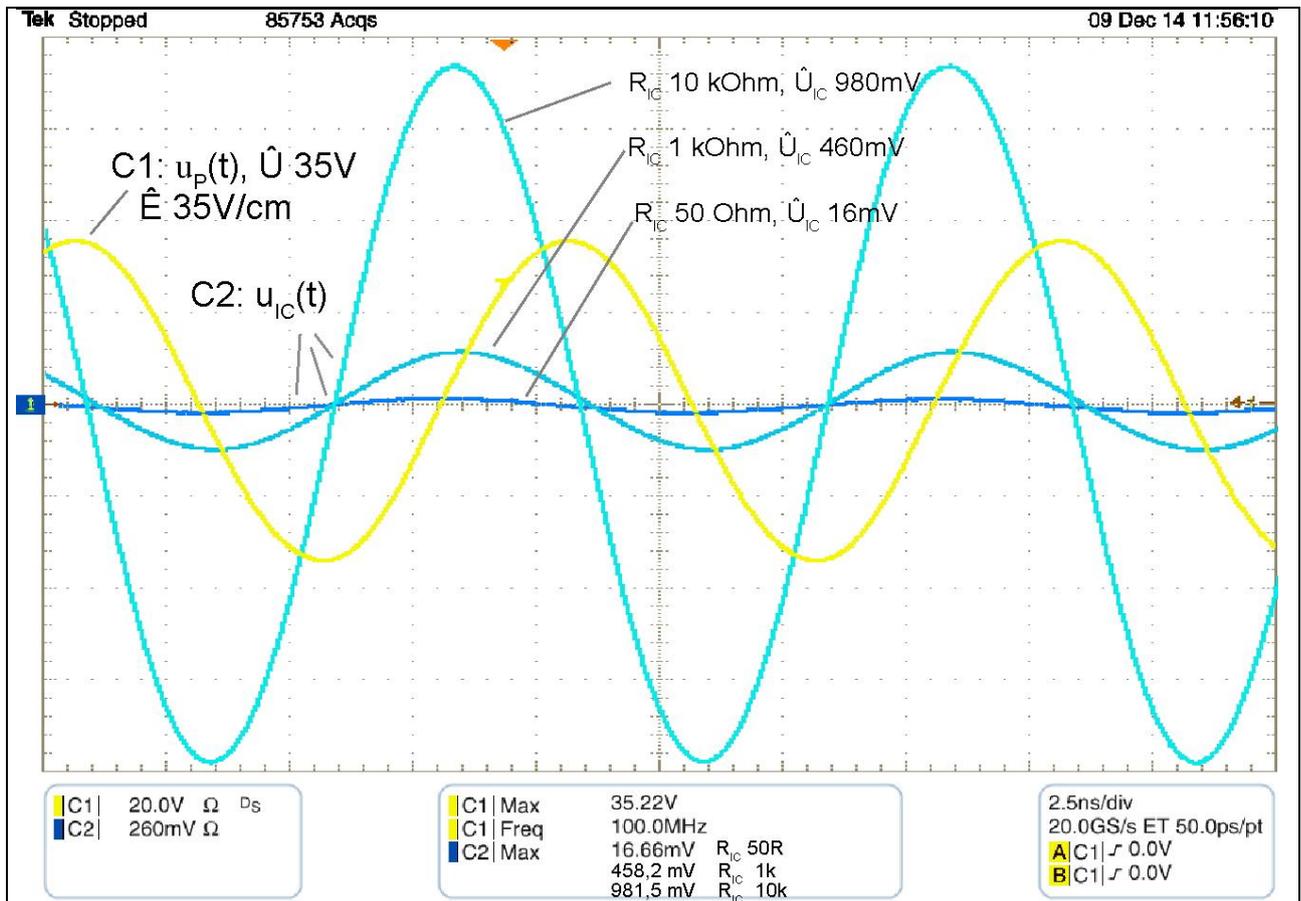
$$i_{\text{Pad}}(t) = C_1' \cdot A_{\text{Pad}} \cdot du_p / dt \quad \text{komplex} \rightarrow \quad i_{\text{Pad}} = C_1' \cdot A_{\text{Pad}} \cdot \omega \cdot U_p \quad \text{GI 39}$$

Der Strombelag errechnet sich aus:

$$i_{\text{Pad}}'(t) = C_1' \cdot du_p / dt \quad \text{komplex} \rightarrow \quad i_{\text{Pad}}' = C_1' \cdot \omega \cdot U_p \quad \text{GI 40}$$

Die Querschnitte der inneren und äußeren zusammenhängenden metallischen Koppelflächen  $A_{\text{Pad}}$  des Test-ICs können aus seiner Konstruktion ermittelt werden. Mit dem Wert  $A_{\text{Pad}}$ , dem Kapazitätsbelag  $C_1'$  und dem Differential der Spannung  $du_p/dt$  kann der eingekoppelte Strom  $i_{\text{Pad}}(t)$  berechnet werden.

Der Strom  $i_{\text{Pad}}(t)$  wird durch den Widerstand  $R_{\text{Pad}}$  fließen (**Bild 39**). Dieser Widerstand entspricht dem Gesamtwiderstand des Stromweges von der Koppelfläche  $A_{\text{Pad}}$  zur Groundplane **Bild 49**. Das können Test-IC externe Treiberwiderstände, Pull up- oder Pull down-Widerstände sein. Der Wertebereich liegt zwischen einigen 10 Ohm und 10 kOhm. In Spezialfällen können es auch MOhm sein (Quarz, offene Pins). Im **Bild 51** ist die Wirkung dieser unterschiedlichen Widerstände bei einer Feldstärke von  $\hat{E} = 35 \text{ V/cm}$  bzw. einer Vorwärtsleistung  $P_{\text{vor}} = 5,4 \text{ W}$  und einer Pad Fläche  $A_{\text{Pad}}$  von  $7 \text{ mm}^2$  dargestellt.



**Bild 51** Spannungsverlauf  $u_{\text{Pad}}(t)$  an unterschiedlichen Widerständen  $R_{\text{Pad}}$  eines IC-Pins bei E-Feldeinkopplung (Distanzring 10 mm).

Je höher der Wert des Widerstandes  $R_{\text{Pad}}$  ist, umso höher ist die Spannung, die in den IC eingekoppelt wird. Kritische Werte für  $R_{\text{Pad}}$  beginnen bei ca. 1 kOhm. Störspannungen mit höherer Frequenz erzeugen mehr Spannung  $u_{\text{Pad}}(t)$ .

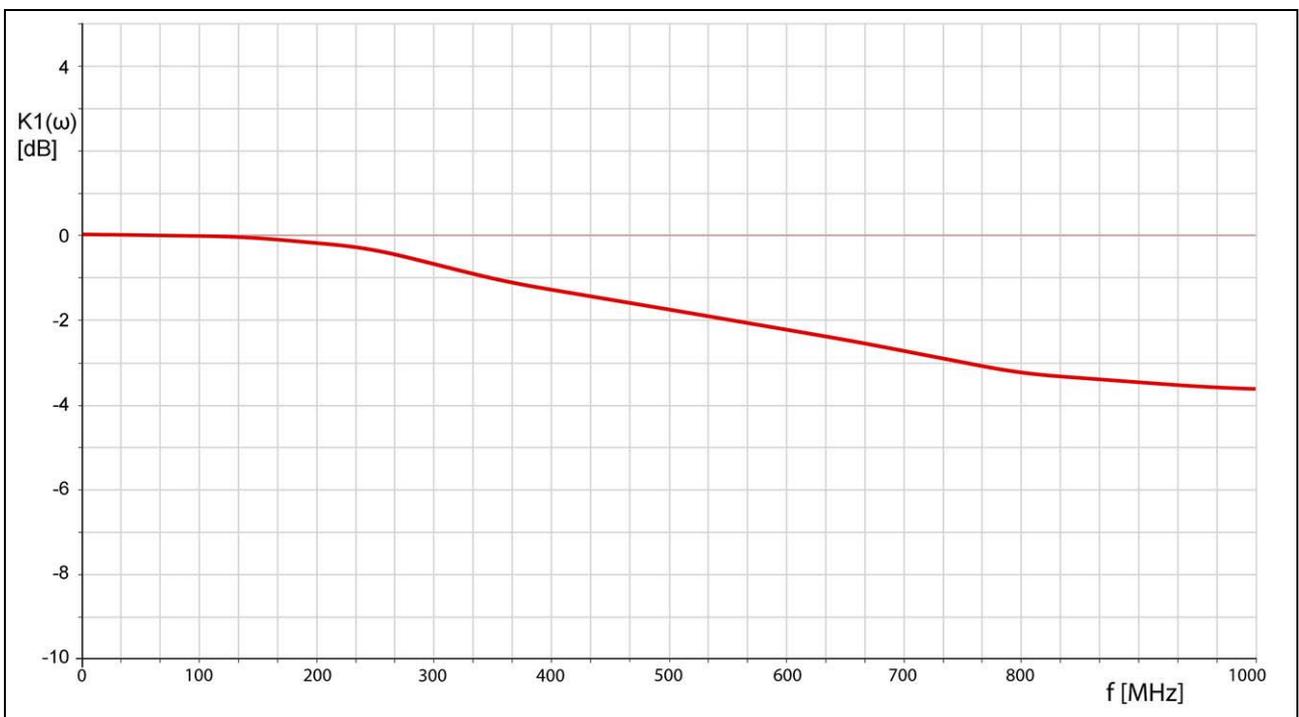
Die beschriebene kapazitive Verkopplung mit dem Test-IC kann für Simulationen als Basis dienen.

#### 1.4.10 Oberschwingungen

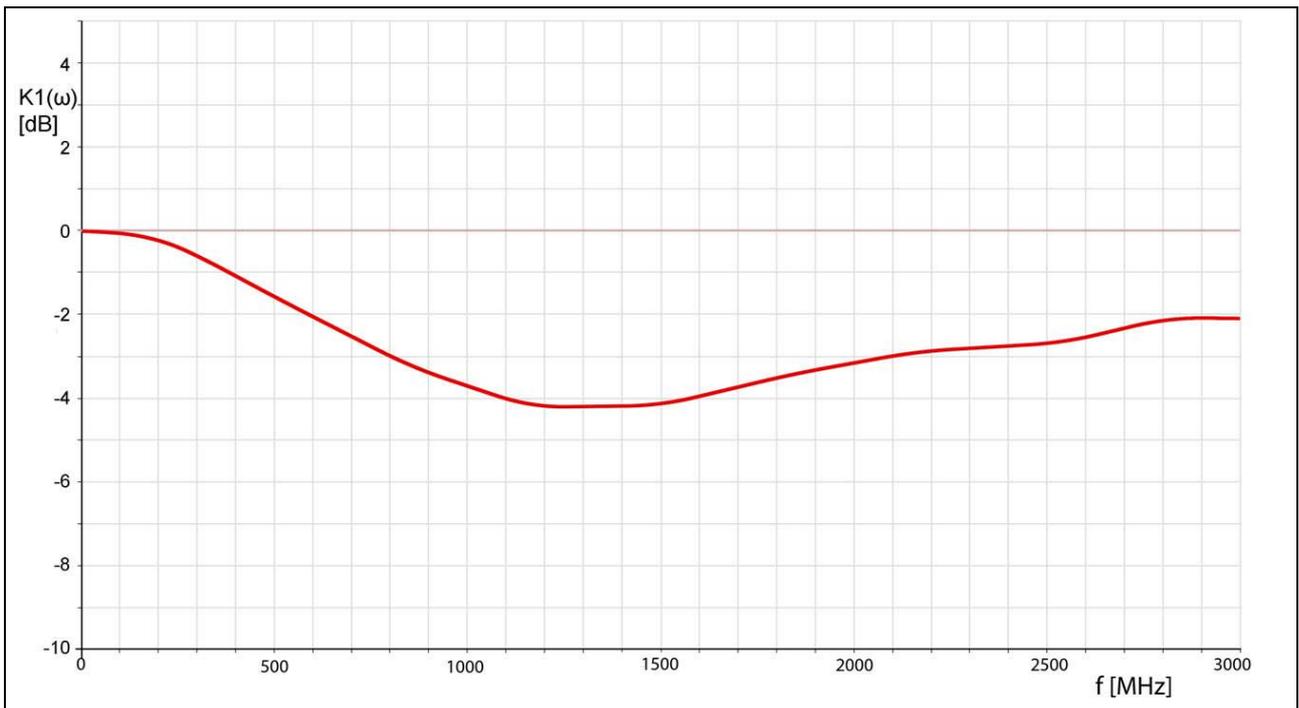
In Abhängigkeit von Frequenz und Aussteuerung kann der Leistungsverstärker Oberschwingungen erzeugen. Die Oberschwingungen für das elektrische Feld haben ähnliche Wirkzusammenhänge wie die Oberschwingungen für das magnetische Feld, Kapitel **1.2.13**.

#### 1.4.11 Frequenzgang der Feldquelle P1501

Im **Bild 52** ist der Frequenzgang  $K1(f)$  der Probespannung  $U_p$  zur Feldstärke  $E$  dargestellt. Im Bereich bis 1 GHz fällt die Übertragungsfunktion um ca. 3 dB ab. Diese Abweichungen können durch Spannungsmessungen und Nachregelung am Leistungsverstärker ausgeglichen werden. Die Spannung  $u_p(t)$  kann Oberschwingungen besitzen (entstehen im Leistungsverstärker). Diese Oberschwingungen können spektral außerhalb des Arbeitsbereichs bei Frequenzen  $> 1$  GHz liegen. Sie werden mit dem Koppelfaktor  $K1(f)$ , der ebenfalls außerhalb des Arbeitsbereichs der Feldquelle wirkt, in elektrische Feldanteile gewandelt **Gl 25**. Wenn zum Beispiel in diesem Bereich der Frequenzgang  $K1(f)$  der Feldquelle nicht konstant bleibt, sondern um 6 dB ansteigt, verdoppelt sich der Scheitelwert der Oberschwingungen des elektrischen Feldes. Damit erhöht sich die Störfähigkeit der Feldquelle. Es muss sichergestellt sein, dass der Frequenzgang  $K1(f)$  im Bereich  $> 1$  GHz nicht wesentlich ansteigt. Im **Bild 53** Frequenzgang der Probespannung  $U_P$  zur elektrischen Feldstärke  $E$  in der Feldkammer bis 3 GHz ist der Frequenzgang bis 3 GHz dargestellt (erfasst die 3. Oberschwingung bei Grundschwingung 1 GHz). Das Problem der zusätzlichen Erhöhung der Störfähigkeit der Feldquelle bei Oberschwingungen besteht nicht, da der Frequenzgang im Bereich 1 GHz bis 3 GHz um mindestens 2 dB abfällt. Dieser Abfall unterdrückt die Oberschwingungen in diesem Bereich.



**Bild 52** Frequenzgang der Probespannung  $U_p$  zur elektrischen Feldstärke  $E$  in der Feldkammer



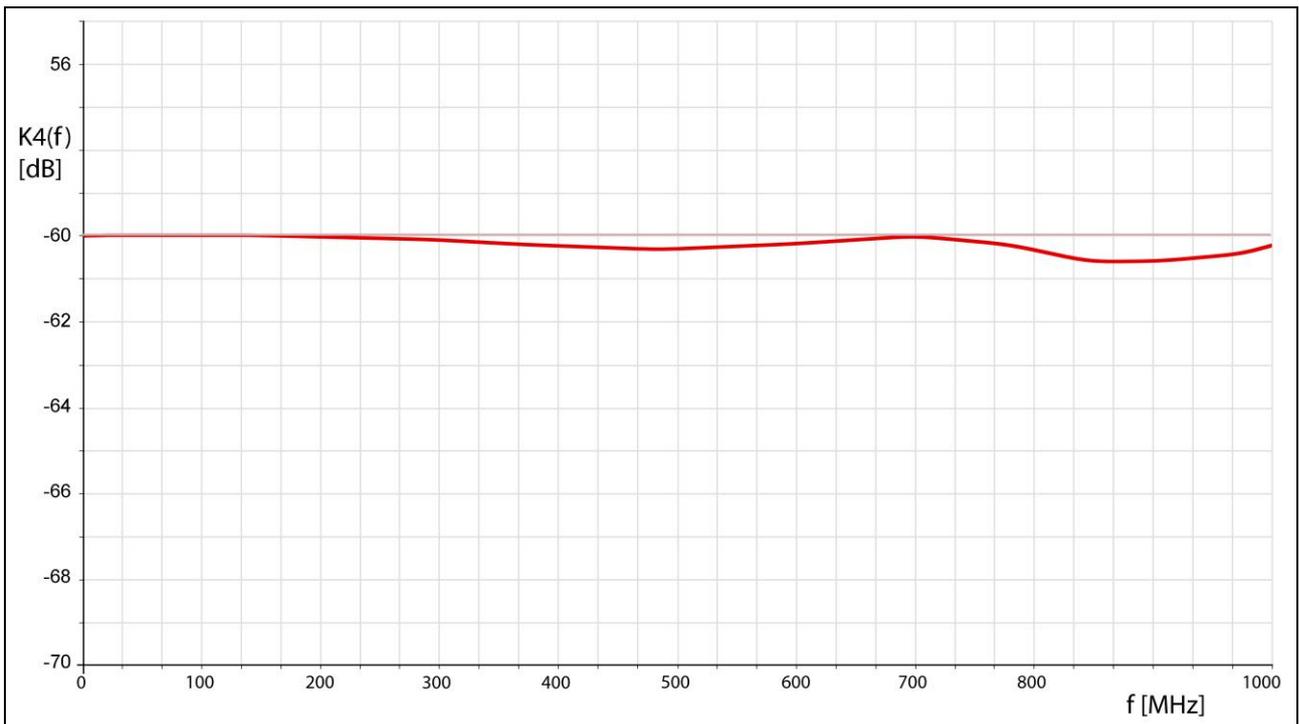
**Bild 53** Frequenzgang der Probespannung  $U_p$  zur elektrischen Feldstärke  $E$  in der Feldkammer bis 3 GHz

Der Frequenzgang des Messspannungsteilers  $K4(f)$  ist in **Bild 54** bis 1 GHz dargestellt. Im Allgemeinen wird im Oszilloskop der Korrekturwert 60 dB eingestellt. Wenn die Genauigkeit der Spannungswerte nicht ausreichend ist, muss der für die entsprechende Frequenz im **Bild 54** angegebene Wert invertiert eingegeben werden. Für den Frequenzgang des Messspannungsteilers gilt Ähnliches wie für den Frequenzgang  $K1(f)$ . Aus **Bild 54** ist ersichtlich, dass der Frequenzgang des Messspannungsteilers bis 1 GHz nicht über 1 dB abfällt **Bild 55** ist zu entnehmen, dass die Feldquelle bis zu einer Frequenz bis 1,7 GHz genutzt werden kann. Bei Distanzringhöhe 10 mm wird die elektrische Feldstärke aus folgender Gleichung ermittelt.

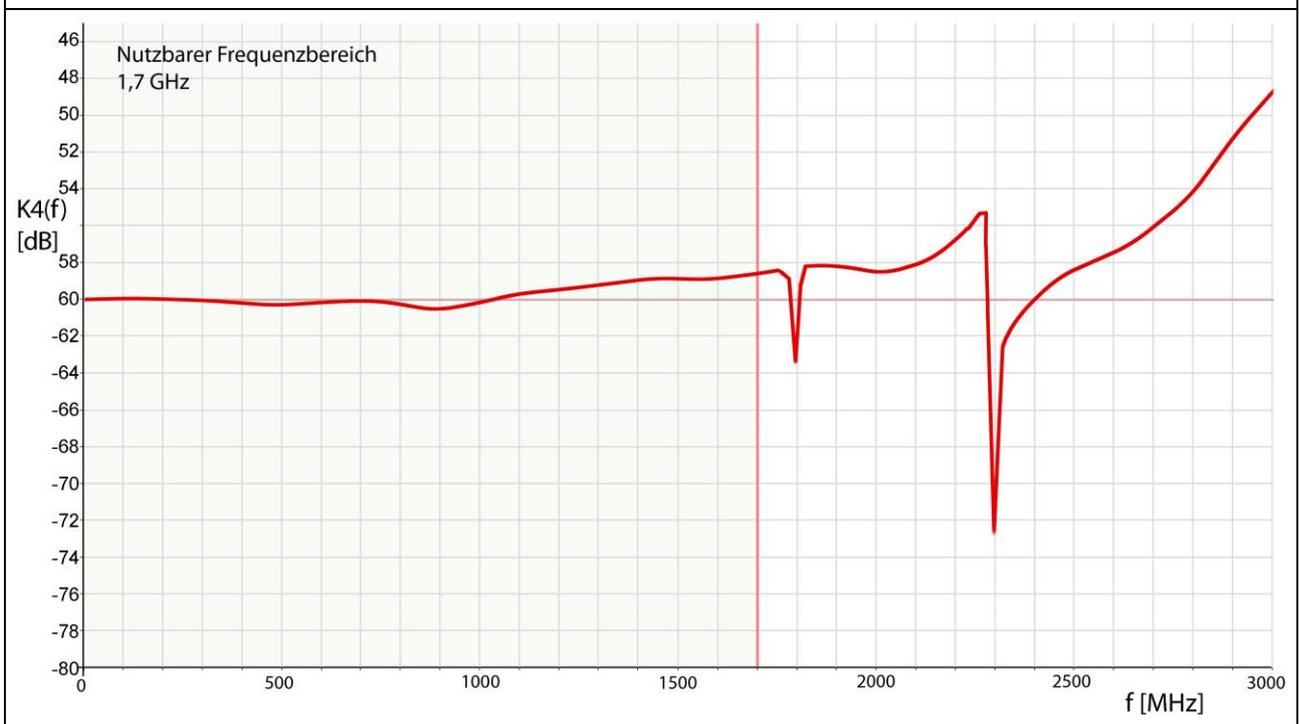
$$E_{10\text{ mm}} = u_{AV}(f) * 1 / K4(f) \quad \text{Gl 41}$$

Bei Distanzringhöhe 3 mm wird die elektrische Feldstärke aus folgender Gleichung ermittelt:

$$E_{3\text{ mm}} = 10 / 3 * u_{AV}(f) * 1 / K4(f) \quad \text{Gl 42}$$



**Bild 54** Frequenzgang  $K_4(f)$  des Messspannungsteilers, des elektrischen Feldes E zur Ausgangsspannung des Messteilers für Distanzringhöhe  $h=10$  mm



**Bild 55** Frequenzgang  $K_4(f)$  des Messspannungsteilers des elektrischen Feldes E zur Ausgangsspannung des Messteilers für Distanzringhöhe  $h=10$  mm bis 3 GHz



Wenn bei Verwendung des 10 mm Distanzrings die maximale Feldstärke (maximale Vorwärtsleistung) zur Beeinflussung des Test-ICs nicht ausreicht, kann der 3 mm hohe Distanzring gewählt werden. Bei der Verwendung des 3 mm Distanzrings befindet sich die Elektrode oder der Stromleiter dichter am Test-IC. So wird bei gleicher Vorwärtsleistung eine größere Störwirkung erreicht. Die Näherung des Test-ICs erzeugt bei 3 mm eine stärkere Verzerrung des Feldes als bei 10 mm. Deshalb ist die Messgenauigkeit bei der Verwendung des 10 mm Distanzringes höher.

Beim Übergang vom 10 mm Distanzring auf den 3 mm Distanzring wird die magnetische Flussdichte um den Faktor 2, die elektrische Feldstärke um den Faktor 3 erhöht (unter Vernachlässigung der Rückwirkung durch den Test-IC).

Der gewählte Distanzring wird auf die Groundplane **GND 25** aufgesetzt (**Bild 56**). Anschließend wird die Feldquelle **P1401** oder **P1501** in die obere Aussparung des Distanzringes eingesetzt. Die Magnetfeldquelle **P1401** lässt sich im Distanzring um 360° drehen. Dadurch kann die Ausrichtung des abgegebenen Magnetfeldes stufenlos eingestellt werden, um alle Schleifen des Test-ICs zu durchdringen (Kapitel **1.2.5**). Für die Auswertung von Signalen aus dem Test-IC steht der Oszilloskop-Adapter **OA 4005**<sup>21</sup> und das Connection Board **CB 0708** zur Verfügung.

Das Connection Board **CB 0708** und die Control Unit **CU 22**<sup>22</sup> dienen der Steuerung des Test-ICs.

Die Beschreibung und Verschaltung dieser Elemente sind im Benutzerhandbuch **IC-Testumgebung ICE1** beschrieben. Der praktische Aufbau eines Prüfplatzes ist im **Bild 57** zu sehen.



**Bild 57** Prüfaufbau mit dem Probe Set HF-Power Feldeinkopplung 1 GHz, der **IC-Testumgebung ICE1** und weiteren Geräten.(vereinfachter Aufbau ohne Richtkoppler)

<sup>21</sup> Oszilloskop-Adapter **OA 4005** ist in der **IC-Testumgebung ICE1** enthalten. [www.langer-emv.de](http://www.langer-emv.de)

<sup>22</sup> **CU 22** [mail@langer-emv.de](mailto:mail@langer-emv.de)

Die aufgeführten Geräte sind in folgenden Anleitungen beschrieben:

Aufgabe	Anleitung
<ul style="list-style-type: none"> <li>Anleitung für die Entwicklung der Testleiterkarte</li> <li>Testablauf</li> </ul>	Anleitung IC-Test (Langer EMV-Technik GmbH)
<ul style="list-style-type: none"> <li>Groundplane GND 25</li> <li>Connection Board CB 0708</li> <li>Oszilloskop-Adapter OA 4005</li> <li>Monitoring und Steuerung des Test-ICs</li> <li>Control Unit CU 22</li> </ul>	Benutzerhandbuch ICE1
<ul style="list-style-type: none"> <li>Leistungsverstärker</li> <li>Richtkoppler</li> <li>Signalgenerator</li> <li>Oszilloskop</li> <li>PC</li> </ul>	Bedienungsanleitung des Herstellers
<b>Tabelle 1</b>	

## 1.6 Durchführung der Prüfung

Es gibt zwei Möglichkeiten, den Prüfplatz zu betreiben.

### 1. Bedienung des Prüfplatzes von Hand

Mit dem Signalgenerator und dem Leistungsverstärker wird der Prüfplatz gesteuert. Die Signalparameter werden am Signalgenerator und dem Leistungsverstärker eingestellt. Die Einstellung der Geräte erfolgt nach der Bedienungsanleitung der Hersteller entweder an den Bedienelementen der Geräte oder über eine Fernsteuerung vom PC.

### 2. Automatischer oder halbautomatischer Prüfplatz

Im PC des Prüfplatzes müssen Monitoring Signale des Test-ICs ausgewertet werden können. Die Quellen der Monitoring Signale sind das Oszilloskop in Verbindung mit dem Oszilloskop-Adapter **OA 4005** und das Connection Board **CB 0708** oder Lösungen des Anwenders.

Lösungen für einen automatischen oder halbautomatischen Prüfplatz mit der Steuer- und Kontrollsoftware **ProbeControl** liegen vor (Beratung durch Langer EMV-Technik GmbH, [mail@langer-emv.de](mailto:mail@langer-emv.de)).

### 1.6.1 Prüfablauf

In der Prüfung werden im Allgemeinen das Level und die Frequenz der Störgröße stufenweise erhöht. Bei jeder Frequenz wird das Level stufenweise erhöht. Dabei wird mit einem festgelegten minimalen Wert des Levels begonnen. Die schrittweise Erhöhung des Levels erfolgt bis zum Eintreten des Funktionsfehlers (Monitoring Signale) oder bis zum festgelegten Höchstwert des Levels. Danach wird die Frequenz erhöht und wieder mit dem festgelegten minimalen Wert des Levels begonnen.

Wenn über die Monitoring Signale Störungen des Test-ICs signalisiert werden, ist im Allgemeinen die HF-Power-Einkopplung abzuschalten. Bei speziellen Untersuchungen kann das Level weiter gesteigert werden bis weitere Fehler auftreten. Dabei besteht die Gefahr der Zerstörung des Test-ICs. Die Gefahr kann verringert werden, wenn die Stromversorgung des Test-ICs überwacht (Connection Board **CB 0708**) bzw. begrenzt wird. Im Fehlerfall kann über eine Notabschalteneinrichtung die Versorgungsspannung unterbrochen werden. Die Notabschaltung kann automatisch vom PC oder von Hand beispielsweise über die Control-Unit **CU 22** oder über Anwenderlösungen erfolgen.

Bei der Magnetfeldquelle **P1401** wird der Istwert des Magnetfeldes B mit einer Strommessung am Shunt bestimmt ( $B=K1 * K4 * U_{AV}$ ). Abweichungen vom Sollwert können durch Nachregelung am Leistungsverstärker justiert werden. Bei der E-Feldquelle **P1501** wird der Istwert des elektrischen Feldes E mit einer Spannungsmessung am Messspannungsteiler bestimmt ( $E_{10mm}= U_{AV} * K4$ ). Abweichungen vom Sollwert können durch Nachregelung am Leistungsverstärker justiert werden.

Lösungen für einen automatischen oder halbautomatischen Prüfplatz mit der Steuer- und Kontrollsoftware **ProbeControl** liegen vor (Beratung durch Langer EMV-Technik GmbH, [mail@langer-emv.de](mailto:mail@langer-emv.de)).

Die Vorgehensweisen zum Prüfablauf sind in der **Anleitung IC-Test** beschrieben ([mail@langer-emv.de](mailto:mail@langer-emv.de)).

**Während des Betriebes des Prüfplatzes entsteht ein Störfeld in der Feldkammer der Feldquelle. Es ist darauf zu achten, dass während der Beaufschlagung die Feldkammer aus Sicherheitsgründen nicht geöffnet wird. Die Feldquelle ist nur mit der durch den Distanzring und die Groundplane geschlossenen Feldkammer zu betreiben.**

## 1.7 Überprüfung der Kurvenform

Die Kalibrierung der Feldquellen erfolgt durch Langer EMV-Technik GmbH.

Die Überprüfung der Kurvenform ist in den Kapiteln **1.2.7** und **1.2.8** und unter **1.4.6** beschrieben.

## 2 Sicherheitshinweise

Dieses Produkt richtet sich nach den Anforderungen der folgenden Bestimmungen der europäischen Union: 2004/108/EG (EMV-Richtlinie) und 2006/95/EG (Niederspannungsrichtlinie).

Lesen und befolgen Sie die Bedienungsanleitung und bewahren Sie diese für die spätere Nutzung an einem sicheren Ort auf. Die Anwendung des Gerätes ist von auf dem Gebiet der EMV sachkundiges und für diese Arbeiten geeignetes Personal auszuführen.

Wenn Sie ein Produkt der Langer EMV-Technik GmbH nutzen, bitte beachten Sie die folgenden Sicherheitshinweise, um sich selbst gegen elektrischen Schlag oder das Risiko einer Verletzung zu schützen, um die verwendeten Geräte und den Test-IC vor Zerstörung zu schützen.

**Der verwendete Leistungsverstärker muss kurzschlussfest und leerlauffest sein.**

- Die Bedienungs- und Sicherheitshinweise aller jeweils eingesetzten Geräte sind zu beachten.
- Beschädigte oder defekte Geräte dürfen nicht benutzt werden.
- Machen Sie vor der Inbetriebnahme eines Messplatzes mit einem Produkt der Langer EMV-Technik GmbH eine Sichtprüfung. Beschädigte Verbindungskabel sind vor Inbetriebnahme zu tauschen.
- Lassen Sie ein Produkt der Langer EMV-Technik GmbH während der Funktion nicht ohne Überwachung.
- Das Produkt der Langer EMV-Technik GmbH darf nur für Anwendungen genutzt werden, für die es vorgesehen ist. Jede andere Nutzung ist nicht erlaubt.
- Träger von Herzschrittmachern dürfen nicht mit dem Gerät arbeiten.
- Grundsätzlich sollte der Prüfaufbau über eine gefilterte Stromversorgung betrieben werden.
- **Achtung! Bei Betrieb der Feldquelle, können funktionsbedingt Störaussendung (Nah- und Fernfelder) entstehen. Aufgabe des Anwenders ist es, entsprechende Schutzmaßnahmen für alle verwendeten elektronischen Geräte zu treffen. Insbesondere liegt es in seiner Verantwortung, die verwendeten Messgeräte und alle weiteren elektronischen Geräte, die sich außerhalb des Prüfaufbaus befinden, vor Störaussendung zu schützen, dass sie in ihrer bestimmungsmäßigen Funktion nicht beeinträchtigt werden.** Das kann erfolgen durch:
  - Einhalten eines entsprechenden Sicherheitsabstandes
  - Verwendung geschirmter oder schirmender Räume (z.B. *Schirmzelt*, [www.langer-emv.de](http://www.langer-emv.de))

**Während des Betriebes des Prüfplatzes entsteht ein Störfeld in der Feldkammer der Feldquelle. Es ist darauf zu achten, dass die Feldkammer während der Beaufschlagung aus Sicherheitsgründen unter keinen Umständen geöffnet wird (Gefährdung durch HF). Die Feldquelle ist nur mit der durch den Distanzring und die Groundplane geschlossenen Feldkammer zu betreiben. Bei Leitungen größer 8 W ist der Prüfplatz in einer geschirmten Kabine zu betreiben.**

**Für durch unsachgemäße Nutzung entstandene Schäden wird keine Haftung übernommen.**

- Die in Baugruppen eingespeisten Störgrößen können funktionsbedingt bei zu starker Einwirkung zu Zerstörungen (Latch-up) im Test-IC führen. Schutz bietet:
  - Vorschalten eines Schutzwiderstandes in die Stromversorgung des ICs
  - schrittweises Erhöhen der Störgröße, Abbruch bei Funktionsfehler
  - Unterbrechen der Stromversorgung des Test-ICs im Latch-up-Fall.

**Achtung! Es ist zu sichern, dass interne Funktionsfehler von außen erkennbar sind. Bei Nichterkennbarkeit können bei Steigerung der Einkopplung Zerstörungen im Test-IC entstehen. Gegebenenfalls sind folgende Methoden anwendbar:**

- Überwachung repräsentativer Signale im Test-IC
- spezielle Prüfsoftware
- sichtbare Reaktion des Test-ICs auf Eingabehandlungen (Reaktionstest des Test-ICs).

Für die Zerstörung von Test-ICs kann keine Haftung übernommen werden!

### 3 Gewährleistung

Langer EMV-Technik GmbH wird jeden Fehler aufgrund fehlerhaften Materials oder fehlerhafter Herstellung während der gesetzlichen Gewährleistungsfrist beheben, entweder durch Reparatur oder mit der Lieferung von Ersatzgeräten.

**Die Gewährleistung gilt nur unter folgenden Bedingungen:**

- den Hinweisen und Anweisungen der Bedienungsanleitung wurde Folge geleistet.

**Die Gewährleistung verfällt, wenn:**

- am Produkt eine nicht autorisierte Reparatur vorgenommen wurde,
- das Produkt verändert wurde,
- das Produkt nicht bestimmungsgemäß verwendet wurde.

### 4 Technische Daten

<b>Feldquellen P1401, P1501</b>	
Maße (Höhe/Breite/ Tiefe)	180 x 95 x 95 mm
Gewicht	
P1401	750 g
P1501	700 g
Frequenzbereich	0 – 1 GHz
P <sub>vor</sub> Max	100 W
U <sub>p</sub> Max	140 V
Zeitverlauf	Sin CW, AM
Abschlusswiderstand im HF-Stromweg	ohne

#### 4.1 Eigenschaften

##### 4.1.1 Eigenschaften der Magnetfeldquelle P1401

###### 4.1.1.1 Familie Magnetfeldquellen P1400, Probekontanten

h [mm]	K1 [μT/A] oder [pVs/mm <sup>2</sup> A]	L <sub>h</sub> ' [pH/mm <sup>2</sup> ]
3	24,4	24,4
10	12,4	12,4
	$B = K1 \cdot i_p$	$U_{ind} = L_h' \cdot A_{IC} \cdot di_p / dt$ $U_{ind} = L_h' \cdot A_{IC} \cdot \omega \cdot I_p$

**Tabelle 2** Magnetfeldquelle **P1401**, Probekontanten

#### 4.1.1.2 Störgrößen der Magnetfeldquelle P1401 in Abhängigkeit vom Strom (Effektivwerte)

$P_{\text{vor}}$ [W]	0,1	0,5	1	5	10	20	50	100
$U_{\text{VG}}$ [V]	3,2	7,1	10	22,3	31,6	44,7	70,7	100
$i_p$ [A]	0,06	0,14	0,20	0,45	0,63	0,89	1,41	2,0
$B$ [ $\mu\text{T}$ ] $h = 3 \text{ mm}$	1,5	3,5	4,9	10,9	15,4	21,8	34,5	48,8
$B$ [ $\mu\text{T}$ ] $h = 10 \text{ mm}$	0,8	1,8	2,5	5,5	7,8	11,1	17,5	24,8
$U_{\text{IC}}$ [V] $A_{\text{IC}} = 10 \text{ mm}^2$ $h = 10 \text{ mm}$ $f = 100 \text{ MHz}$	0,005	0,011	0,016	0,035	0,049	0,070	0,11	0,156

**Tabelle 3** Störgrößen der Magnetfeldquelle **P1401** in Abhängigkeit vom Strom

#### 4.1.1.3 Shunt 0,1 Ohm P1401

Bandbreite	1 GHz
Fehler	ca. 10 %
Attenuatoreinstellung	x 20 A / V, 26 dB
Maximaler Strom	2,8 A
Deskew B zu $U_{\text{AV}}$ Messausgang Shunt	1154 ps

**Tabelle 4** Shunt 0,1 Ohm **P1401**

#### 4.1.1.4 BPM 02

Bandbreite	3 GHz
Fehler	ca. 10 %
Attenuatoreinstellung	x $1 \cdot 10^6 \text{ T/s V}$ 120 dB
Deskew B zu $U_{\text{AV}}$ Messausgang BPM 02	144 ps

**Tabelle 5** **BPM 02**

#### 4.1.1.5 E-Feldunterdrückung P1401

	$U_F / I_p$ [V / A]	$E_F / I_p$ [V / cm A] $h = 3 \text{ mm}$	$E_F / I_p$ [V / cm A] $h = 10 \text{ mm}$
P1401, Stromleiter Mitte $s = 20 \text{ mm}$	26	86	26

**Tabelle 6** E-Feldunterdrückung  $E_F / I_p$  der Feldquelle **P1401** in Abhängigkeit vom Speisestrom  $I_p$ , bei 1 GHz (Bild 32)

#### 4.1.2 Eigenschaften der E-Feldquelle P1501

##### 4.1.2.1 Familie E-Feldquellen P1500, Probekontanten

h [mm]	$C_1'$ [f F/mm <sup>2</sup> ]	K1 [1/cm]
3	2,95	3,33
10	0,88	1,0
$U_{\text{Pad}} = R_{\text{Pad}} \cdot I_{\text{Pad}}$ $I_{\text{Pad}} = C_1' \cdot A_{\text{Pad}} \cdot \omega \cdot U_p$ $I_{\text{Pad}}' = C_1' \cdot \omega \cdot U_p$		$E \text{ [V/cm]} = U_p \text{ [V]} / h \text{ [cm]} = K1 \text{ [1/cm]} \cdot U_p \text{ [V]} / \text{[cm]}$
<b>Tabelle 7</b> E-Feldquellen P1500, Probekontanten		

##### 4.1.2.2 Störgrößen der E-Feldquellen P1501 in Abhängigkeit von der Probespannung $U_p$

$P_{\text{vor}}$ [W]	0,1	0,5	1	5	10	20	50	100
$U_p$ [kV]	3,2	7,1	10	22,3	31,6	44,7	70,7	100
E [V/cm] h = 3 mm	10,5	23,6	33,3	74,5	105	149	236	333
E [V/cm] h = 10 mm	3,2	7,1	10	22,3	31,6	44,7	70,7	100
$I_{\text{Pad}}'$ [mA/mm <sup>2</sup> ] h = 3 mm	0,0059	0,013	0,019	0,041	0,059	0,083	0,13	0,19
$I_{\text{Pad}}'$ [mA/mm <sup>2</sup> ] h = 10 mm	0,0018	0,0039	0,0055	0,012	0,018	0,025	0,039	0,055
<b>Tabelle 8</b> Störgrößen der E-Feldquelle <b>P1501</b> in Abhängigkeit von der Vorwärtsleistung $P_{\text{vor}}$ und der Probespannung $U_p$								

##### 4.1.2.3 Spannungsteiler P1501

Frequenzbereich	0... 1 GHz
Fehler	+0 %, -10 % (Frequenzgang <b>Bild 54</b> )
Attenuatoreinstellung	x 1000 V / V,     60 dB
Deskew E zu $U_{\text{AV}}$ Messausgang P1501	1317 ps
<b>Tabelle 9</b> Spannungsteiler <b>P1501</b>	

##### 4.1.2.4 EPM 02

Bandbreite	3 GHz
Fehler	ca. 10 %
Attenuatoreinstellung	x $1,6599 \cdot 10^{12}$ T / s V     264 dB
Deskew B zu $U_{\text{AV}}$ Messausgang EPM 02	117 ps
<b>Tabelle 10</b> <b>EPM 02</b>	

## 5 Lieferumfang

Pos.	Bezeichnung	Typ	Stck.
1	HF-Magnetfeldquelle	P1401	1
2	HF-E-Feldquelle	P1501	1
3	Distanzring 3 mm	D70 h03	1
4	Distanzring 10 mm	D70 h10	1
5	Messkabel	SMA-SMB 1 m	1
6	B-Feldmesser	BPM 02	1
7	E-Feldmesser	EPM 02	1
8	Koffer		1
9	Kurzanleitung		1
10	Benutzerhandbuch		1

Der Lieferumfang kann je nach Auftrag vom aufgezählten Lieferumfang abweichend sein.

### HF-Power Feldeinkopplung 1 GHz



Es ist nicht erlaubt, ohne die schriftliche Zustimmung der Langer EMV-Technik GmbH dieses Dokument oder Teile davon zu kopieren, zu vervielfältigen oder elektronisch zu verarbeiten. Die Geschäftsführung der Langer EMV-Technik GmbH übernimmt keine Verbindlichkeiten für Schäden, welche aus der Nutzung dieser gedruckten Informationen resultieren.