

Neues Störfestigkeitsverfahren mittels Rohrkoppler bei Mobilfunksignalen

Dipl.-Ing. Bernd Körber, FTZ e.V. an der Westsächsischen Hochschule Zwickau (FH)

Prof. D. Sperling, FTZ e.V. an der Westsächsischen Hochschule Zwickau (FH)

Dr. M. Richter, Audi AG Ingolstadt

Kurzfassung

Ausgehend von einer Systematisierung heutiger und zukünftiger mobiler Funkdienste hinsichtlich ihrer EMV-relevanten Eigenschaften kann über die Feldstärkebestimmung im Innenraum des Fahrzeuges und Korrelationsbetrachtungen zwischen Komponenten- und Fahrzeugmessungen ein Vorschlag für praxisnahe Prüfschärfegrade für Komponentenmessungen erarbeitet werden. Die Nachbildung dieser EMV- Bedrohung durch Labormesstechnik erfolgt effektiv durch einen elektromagnetischen Wellenkoppler mit sehr guten HF- und guten Koppelleigenschaften. Ein Vergleich des Wellenkopplers mit herkömmlicher Komponentenmesstechnik für Elektronikbaugruppen des Kfz. belegt die Vorteile des neuen Messverfahrens.

1 Einleitung

Für die messtechnische Überprüfung der Störfestigkeit elektronischer Baugruppen des Kfz. gegenüber amplituden- bzw. frequenzmodulierten Feldern stehen der Industrie heute erprobte und hinreichend genaue Messverfahren zur Verfügung. Hier ist vor allem der

Frequenzbereich unterhalb der Frequenz $f = 1$ GHz von Interesse. Im Falle der durch digitale Funkdienste hervorgerufenen pulsformigen Wechselfelder, welche überwiegend im Gigahertzbereich angesiedelt sind, gibt es noch keine weitergehenden und allgemein akzeptierten Messvorschriften für die entwicklungsbegleitende Messung im Labor.

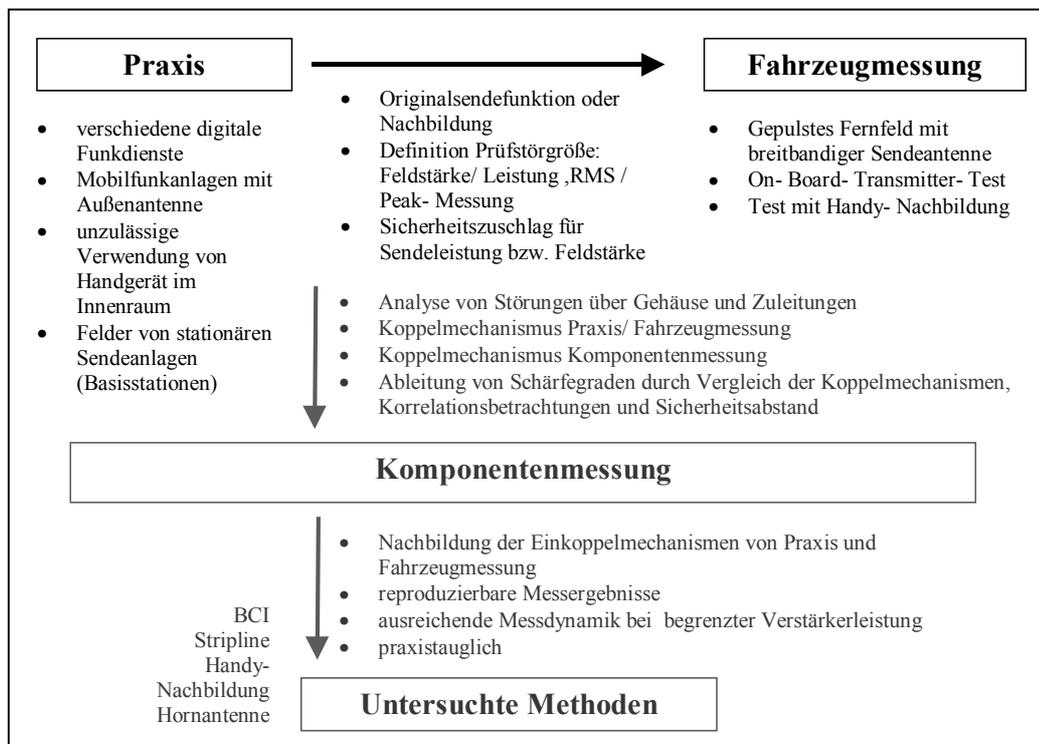


Bild 1 Ableitung von Anforderungen an Labormessverfahren für Mobilfunk- EMV- Messungen

Die bisher eingesetzten Messverfahren erfordern einen erhöhten messtechnischen Aufwand bzw. führten teilweise zu nicht reproduzierbaren Messergebnissen. **Bild 1** stellt eine mögliche Systematik zur Ableitung der Anforderungen an Labormessverfahren zur Analyse der Störfestigkeit von elektronischen Komponenten des Kfz gegenüber Mobilfunksignalen vor und ermöglicht damit, verschiedene bekannte und neue Labormessverfahren auf ihre Anwendbarkeit hin zu untersuchen.

2 Störbedrohung durch heutige und zukünftige digitale Funkdienste im Fahrzeug

2.1 EMV- relevante Eigenschaften der digitalen Funkdienste

Wie bei den bisher bekannten analogen Funkdiensten muss auch bei den neuen digitalen Funkdiensten die Störfestigkeit elektronischer Systeme im Fahrzeug gegenüber diesen Störfeldern nachgewiesen werden. **Tabelle 1** zeigt die EMV- relevanten Eigenschaften für eine Auswahl der europaweit eingesetzten bzw. vor der Einführung stehenden digitalen Funkdienste. Zur Beurteilung des Störpotentials der verwendeten Sendesignale sind vor allem der Frequenzbereich, die Wiederholfrequenz, die Zeitschlitzlänge beim eingesetzten Zugriffsverfahren TDMA und die Sendeleistung der Mobilgeräte zu bewerten.

Digitaler Funkdienst	Frequenzbereich [MHz]	Zugriffsverfahren TDMA mit Wiederholh. [Hz] / Zeitschlitzlänge [μ s]	P_{Sende} Mobilteile [W]
TETRA	380- 440	17,6 / 14267	10
TETRAPOL	80 / 450	FDMA/ 20	10
GSM 900	876- 960	217 / 577	2
GSM 1800	1710- 1880	217 / 577	1
GSM 1900	1850- 1990	217 / 577	1
UMTS	1900- 2170	10 / 625	1
Bluetooth	2400- 2483	Frequenzhopping: 1600/ 0,625-3,125	0,1

Tabelle 1 Auswahl gegenwärtiger und zukünftiger Kraftfahrzeug- relevanter europäischer digitaler Funkdienste /1/

Der übliche Betrieb der Funkanlage mit einer Außenantenne am Fahrzeug stellt nach bisherigen Erfahrungen kein erhöhtes Störpotential dar. Bei Verwendung des Mobilgerätes im Innenraum des Fahrzeuges ohne Außenantenne, was nicht gestattet jedoch oft

praktiziert wird, ist aufgrund des geringen Abstandes der Elektronik zur Sendeanenne sowie der Rückwirkung der Fahrzeugkarosserie mit einem erhöhten Störpotential zu rechnen.

2.2 Fahrzeugmessungen

Der Nachweis der Störfestigkeit des Gesamtfahrzeuges gegenüber analogen gestrahlten elektromagnetischen Feldern wird durch Messungen gemäß ISO 11451 Teil 1 bis 4 erbracht. Die hier beschriebenen Verfahren bilden die Störbedrohung durch ortsfeste (Teil 2) sowie durch mobile, mit einer Außenantenne am Fahrzeug betriebene Sender (Teil 3) nach. Mobilfunkanlagen sind nur für den Betrieb mit Außenantenne im Fahrzeug freigegeben. Die Störfestigkeitsprüfung mit entsprechenden Sendeleistungen für die Funkdienste kann also auf Basis des "On Board Transmitter"- Tests (ISO 11451 Teil 3) erfolgen. Für den eigentlich unerlaubten Fall der Benutzung des Mobilteiles ohne Außenantenne im Fahrzeug steht durch die Verwendung von realen Mobilgeräten mit einstellbarer Sendeleistung und – kanal bzw. einer Handy- Nachbildung zur Felderzeugung eine weitere Testmethode zur Verfügung. Hierbei werden durch die Positionierung des Senders an ausgewählten Stellen des Innenraumes die ungünstigsten Fälle berücksichtigt. Als Störsignale kommen entweder die Original- Sendesignale des jeweiligen Funkdienstes oder pulsmodierte Signale mit der jeweiligen Trägerfrequenz und der jeweiligen Zeitschlitzlänge entsprechenden Pulszeit zum Einsatz. Die Prüfleistungen orientieren sich an den Original- Sendeleistungen, welche um einen Sicherheitsfaktor erhöht werden.

Im **Bild 3** sind die Feldstärkeverteilungen im Innenraum eines Kfz für die drei angeführten Testmethoden gegenübergestellt.

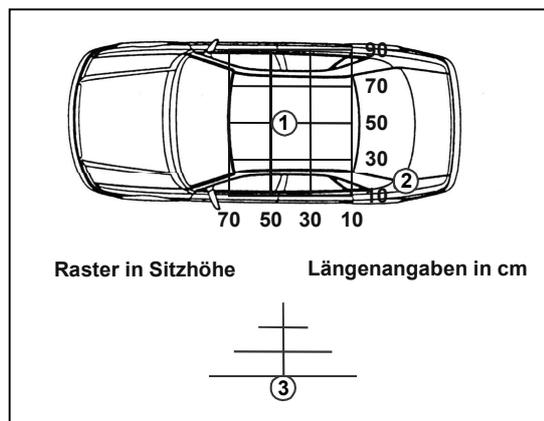
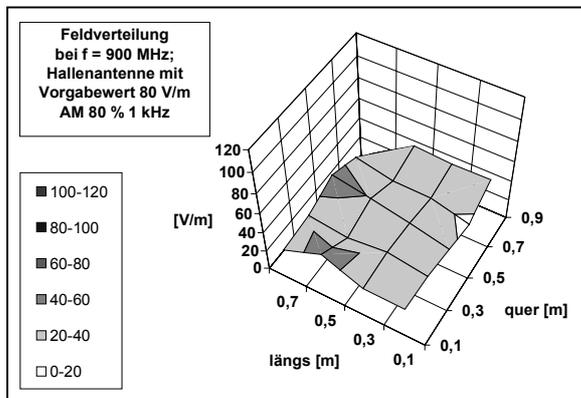


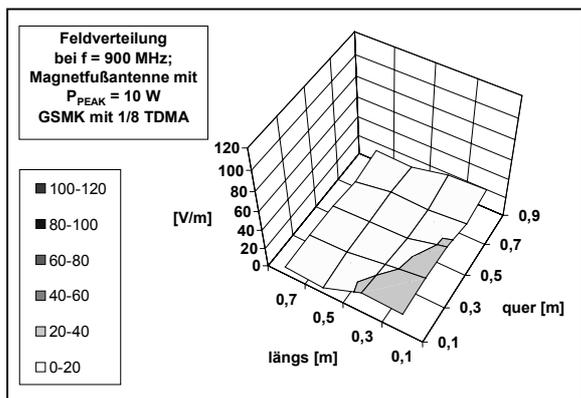
Bild 2 Raster und Antennenstandorte der Feldstärkemessung /2/

Als Sendefrequenz wurde hier 900 MHz für das untere GSM-Band gewählt. Die jeweiligen Antennenstandorte sind dem **Bild 2** zu entnehmen:

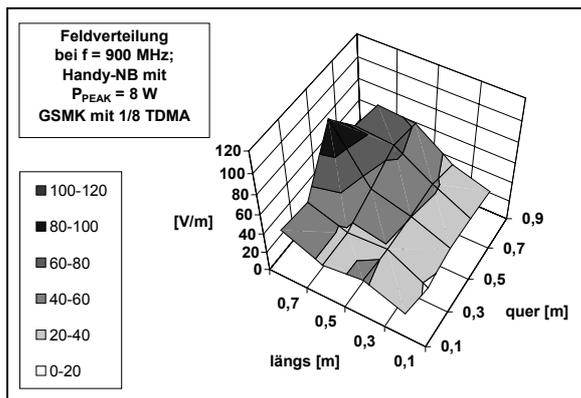
- ① Handy- Nachbildung, horizontal polarisiert, auf vorderer Armlehne in Richtung Instrumentierung liegend;
- ② Magnetfußantenne, vertikal polarisiert sowie
- ③ Hallenantenne, horizontal polarisiert.



a)



b)



c)

Bild 3 Feldstärkeverläufe bei verschiedenen Sendeantennen nach **Bild 2** für f = 900 MHz; a) Hallenantenne, b) Magnetfußantenne und c) Handy- Nachbildung /2/

Der Vergleich nach **Bild 3** mit den bei Fahrzeugmessungen üblichen Werten für die Störfeldstärke bzw.-leistungen zeigt die höchsten Feldstärkewerte im Innenraum des Fahrzeuges bei Verwendung des Mobilfunkgerätes und bestätigt das damit verbundene erhöhte Störpotential.

2.3 Theoretische Betrachtungen zur Störwirkung der Wechselfelder

Für die Einkopplung von gestrahlten elektromagnetischen Feldern im derzeit zu betrachtenden Frequenzbereich von 800 MHz - 3000 MHz können die folgenden Mechanismen zur Beeinflussung der Funktion von elektronischen Komponenten des Fahrzeuges führen:

- Strahlungskopplung in die Leitungen und leitungsgebundene Weiterleitung zur Komponente,
- Direkte Strahlungskopplung in die Leiterplatte bzw. Bauelemente der Komponente und
- Anregung von Gehäuseresonanzen der Komponente und damit verbundene Beeinflussung der Elektronik im Inneren.

Je nach Art und Einbauort der elektronischen Komponente, Lage der Zuleitungen und räumlicher Anordnung der Störquelle im Fahrzeuginnenraum treten die einzelnen Mechanismen in unterschiedlicher Ausprägung auf.

2.3.1 Einkopplung der Wechselfelder in den Fahrzeugkabelbaum

Um die Einkopplung der elektromagnetischen Wechselfelder in elektronische Komponenten bzw. den Fahrzeugkabelbaum genauer beschreiben zu können, muss zwischen Nahfeld- und Fernfeldkopplung unterschieden werden. Die **Tabelle 2** gibt die Abstandswerte von der Strahlungsquelle für den theoretischen Übergang vom Nah- zum Fernfeld nach

$$r = \frac{\lambda}{2\pi} \quad \text{an.} \quad (1)$$

Digitaler Funkdienst	Frequenzbereich [MHz]	Grenze Nahfeld / Fernfeld [cm]
TETRA	380- 440	10,8- 12,6
TETRAPOL	80 / 450	59,6 / 10,6
GSM 1800	1710- 1880	2,5- 2,8
GSM 1900	1850- 1990	2,4- 2,6
UMTS	1900- 2170	2,2- 2,4
Bluetooth	2400-2483	1,9

Tabelle 2 Grenze Nahfeld / Fernfeld für ausgewählte Frequenzbereiche

Hier zeigt sich, dass schon in einem Abstand von wenigen Zentimetern der Nahfeldbereich der Sendeantenne verlassen wird und demzufolge bei der Einkopplung in den Kabelbaum in erster Linie von Fernfeldbedingungen auszugehen ist.

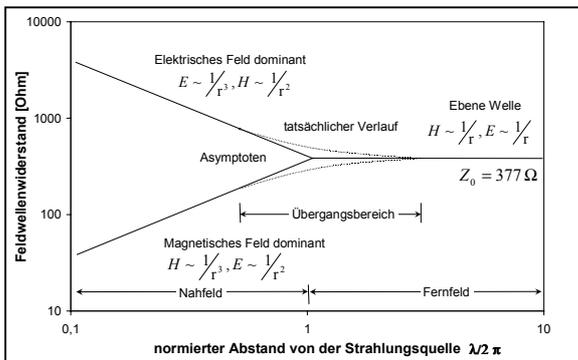


Bild 4 Feldwellenwiderstand in Abhängigkeit vom Abstand zur Strahlungsquelle (auf $\lambda/2\pi$ normiert) /3/

Bild 4 zeigt den Verlauf des Feldwellenwiderstandes in den beiden Feldregionen. Das Nahfeld eines $\lambda/4$ -Monopols, der als gebräuchlichste Sendeantenne des Mobilteiles eingesetzt wird, stellt ein Hochimpedanzfeld mit einer über den Faktor $1/r^3$ abfallenden elektrischen Feldstärke dar.

Für den in unserer Betrachtungsweise bedeutsamen Fall der Fernbedingung kann die elektrische Feldstärke bei bekannter Sendeleistung bestimmt werden:

$$\text{aus: } \frac{E^2}{Z_0} = \frac{P_S G_S}{4\pi r^2} \quad (2)$$

mit $Z_0 = 120\pi$ folgt:

$$E = \frac{\sqrt{30 P_S G_S}}{r} \quad (3)$$

und weiter vereinfacht für den Halbwellendipol:

$$E = \frac{10\sqrt{P_S}}{r} \quad (4)$$

bzw. für den $\lambda/4$ - Monopol:

$$E = \frac{7\sqrt{P_S}}{r} \quad (5)$$

mit : P_S Sendeleistung
 G_S Gewinn Sendeantenne
 r Abstand von der Sendeantenne

Bild 5 zeigt die erzeugten Feldstärken bei den interessierenden Sendeleistungen für eine $\lambda/4$ - Stabantenne. Messungen im Innenraum von Fahrzeugen zeigen,

dass die tatsächlichen Feldstärken auf Grund von Reflexionen an der Karosserie sowie durch Resonanzerscheinungen teilweise deutlich höhere Werte annehmen können.

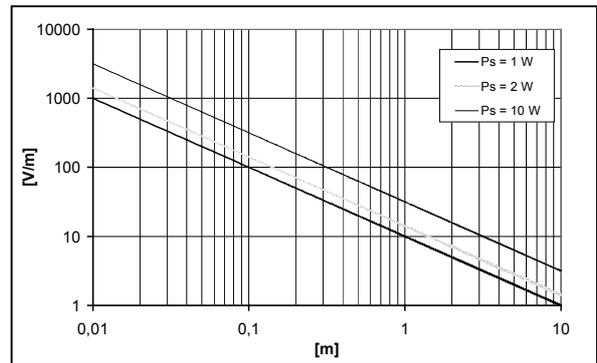


Bild 5 Elektrische Feldstärke im Fernfeld nach Gl. (5), hervorgerufen durch eine $\lambda/4$ - Stabantenne

Im nächsten Schritt kann für den hier zu betrachtenden Fall der Fernfeldkopplung die in einen Kabelbaum eingekoppelte Leistung P_E mit Hilfe der "De-Friischen Formel" berechnet werden:

$$P_E = \frac{G_E}{Z_0} \left(\frac{E\lambda}{4\pi} \right)^2 \quad (6)$$

mit : G_E Gewinn Empfangsantenne

Weiterhin lässt sich die theoretisch maximal auskoppelbare Leistung $P_{E_{max}}$ im Fernfeld einer Quelle bei gegebener Sendeleistung und Antennengewinn berechnen:

Die Formel (2) in (6) eingesetzt mit

$$r = \frac{\lambda}{2\pi} \text{ folgt:}$$

$$P_{E_{max}} = \frac{G_S G_E}{16\pi} P_S \quad (7)$$

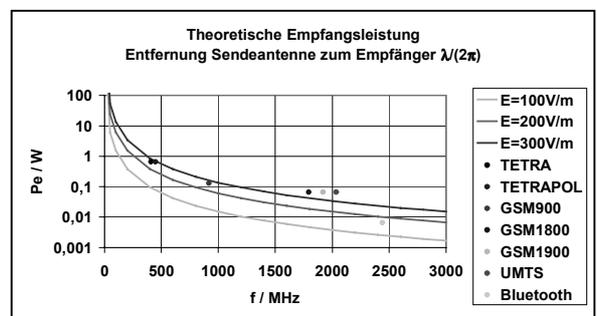


Bild 6 Theoretische Empfangsleistung $P_{E_{max}}$ nach Gl. (7) mit $G_E = 1$ und $G_S = 3,28$

Die aus einem Fernfeld mit den zu erwartenden Feldstärken maximal auskoppelbare Leistung ist im **Bild 6** dargestellt. Hier wird von einem Antennengewinn des Kabelbaumes von $G_E = 1$ ausgegangen. Weiterhin bleiben Einflüsse wie Dämpfungs- und Reflexionserscheinungen sowie Resonanzüberhöhungen unberücksichtigt.

2.3.2 Direkte Strahlungskopplung in die Leiterplatte bzw. Bauelemente

Für eine ungeschirmte bzw. ungenügend geschirmte elektronische Komponente ist in Abhängigkeit der geometrischen Abmessungen in Bezug zur Wellenlänge der Störfunktion folgende Fallunterscheidung zu treffen:

1. Besitzen die Leitungen bzw. leitungsähnliche Strukturen eine Ausdehnung $\geq \lambda/8$ der Störfunktion, tritt die Störung als Wechselfeld auf, und es gelten die Gesetze der Strahlungskopplung.
2. Für Abmessungen $< \lambda/8$ der Störfunktion stellt die Störung ein quasistationäres Feld dar, so dass die Wirkung von Feldstärken auf Ladungsträgermechanismen im Vordergrund steht.

Die Grenze von $\lambda/8$ geht von der Annahme aus, dass ab dieser Ausdehnung eine relevante Einkopplung in antennenähnliche Strukturen zu verzeichnen ist. Für die betrachteten Frequenzbereiche gelten demnach die Angaben aus **Tabelle 3**.

Frequenz [MHz]	Ausdehnung = $\lambda/8$ [cm]
800	4,69
3000	1,25

Tabelle 3 $\lambda/8$ -Grenze für ausgewählte Frequenzen

Im Allgemeinen stellt die Strahlungskopplung durch das Hervorrufen von Differenzspannungen bzw. Störströmen in der Leiterplatte der Komponente die stärkere Störbedrohung dar. Bezugnehmend auf die Abmessungen nach Tabelle 3 ist bei der überwiegenden Zahl der Elektronik dieser Wirkungsmechanismus gegeben. Die Wirkung von quasistationären Störfeldern ist dagegen bei bestimmten Sensorprinzipien besonders zu beachten.

2.3.3 Anregung von Gehäuseresonanzen

Die Anregung von Gehäuseresonanzen ist bei metallisch geschirmten Komponenten, die keine bzw. nur eine hochimpedante Verbindung zur Fahrzeugkarosserie aufweisen, besonders zu betrachten. Geht man von einer ausreichenden Schirmwirkung des Gehäuses aus, ist in erster Linie die störende Wirkung der Hohlleitermoden zu erwähnen. Als Orientierung kann die An-

regung von Hohlraumresonanzen H_{mnp} und E_{mnp} eines mit Luft gefüllten quaderförmigen Gehäuses dienen:

$$f_{res} = \frac{c_0 \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2}}{2} \quad (8)$$

mit a,b,c: Abmessungen des Quaders und
m,n,p: Moden

Entsprechend Gleichung 8 wird die erste Gehäuseresonanz mit 3000 MHz bei einer maximalen Kantenlänge von 5 cm erreicht.

3 Der Rohrkoppler als Spezialform eines Wellenkopplers

3.1 Physikalischer Ansatz

Als physikalischer Ansatz zur labortechnischen Nachbildung der gestrahlten Wechselfelder im Bereich der Mobilfunkdienste wurde für das neue Messverfahren die Einkopplung der Störung in die Zuleitungen durch einen Wellenkoppler gewählt. Dieser Ansatz führt zu einer Störbedrohung des Prüflings mit zwei Komponenten:

1. Leitungsgebundene Komponente, hervorgerufen durch die Welleneinkopplung in die Zuleitungen sowie die
2. Strahlungsgebundene Komponente, hervorgerufen durch das elektromagnetische Streufeld der HF-stromführenden Zuleitungen zwischen Koppler und Prüfling.

Die erste leitungsgebundene Komponente kann für Prüfzwecke durch Leistungsmessung und Verwendung von Kalibrierwerten mit der für die EMV-Messtechnik bekannten Genauigkeit erzeugt werden. Dabei besteht der Vorteil des neuen Messverfahrens darin, die im Abschnitt 2.3 angegebene theoretische Empfangsleistung als Störleistung für Prüfzwecke genau nachbilden zu können.

Für die zweite strahlungsgebundene Komponente kann derzeit nur eine Abschätzung vorgenommen werden, da die Ausbreitung des Streufeldes um die Zuleitungen auf Grund der Nahfeldverhältnisse sehr stark durch die Geometrie und stofflichen Eigenschaften des Prüflings bestimmt wird, welche starken Schwankungen unterworfen sind.

3.2 Aufbau, Wirkungsweise

Bei der technischen Umsetzung des Wellenkopplerprinzips zu einem praxistauglichen Messmittel sind die Forderungen nach guten Hochfrequenz- und koppel Eigenschaften aber auch nach einem für EMV-Messungen auf Labor- und Fahrzeugebene praxistauglichen Aufbau zu berücksichtigen. Auf dieser Basis wurde der Rohrkoppler entwickelt. Das patentierte Prüfmittel Rohrkoppler (**Bild 7**) ist eine spezielle Form eines Wellenkopplers, der eine dem Primärsystem zugeführte Leistung in ein Sekundärsystem, welches hier durch den Kabelbaum gebildet wird, mit einer vergleichsweise geringen Koppeldämpfung im Gigahertzbereich überkoppelt.

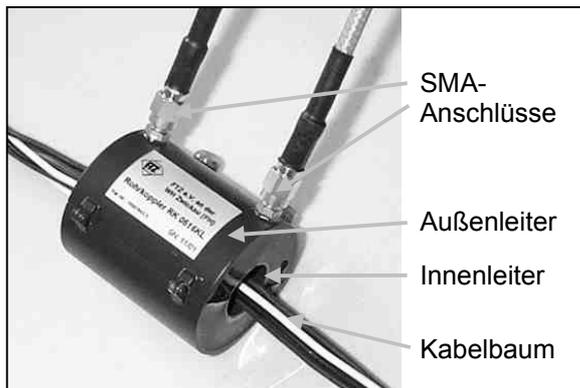


Bild 7 Rohrkoppler mit Kabelbaum

Außenleiter, Innenleiter und die durch den Innenleiter geführte Koppelleitung (Kabelbaum) bilden ein System mit einem triaxialen Aufbau. Das System kann durch zwei Teilsysteme beschrieben werden:

Teilsystem 1 (äußeres oder Primärsystem):

Das Teilsystem 1 besteht aus dem Innen- und Außenleiter des Rohrkopplers, welche für sich gesehen ein Koaxial-System bilden. Über das Verhältnis der Durchmesser von Außen- und Innendurchmesser wird der HF-Wellenwiderstand auf 50Ω eingestellt. Dieses Koaxial-System wird über zwei Anschlüsse gespeist und erzeugt auf dem Innenleiter einen HF-Stromfluß.

Teilsystem 2 (inneres oder Sekundärsystem):

Das Teilsystem 2 wird durch den Innenleiter des Rohrkopplers und den durch ihn hindurch geführten Kabelbaum gebildet (**Bild 7**). Der auf dem Innenleiter des Rohrkopplers erzeugte HF-Strom verursacht ein elektromagnetisches Feld in dessen Innenraum. Besitzt der hindurch geführte Kabelbaum einen Massebezug (auch kapazitiv), so kann durch ihn eine Leistung aus dem Feld ausgekoppelt werden. Betreibt man den Rohrkoppler in einem 50Ω -System mit einer Verbindung zum Generator einerseits und zu einem konzentrierten Abschlusswiderstand am

Anschluss 2, so kann für die Leistungsbilanz des Rohrkopplers mit der hindurchgeführten Koppelleitung (Kabelbaum) eine Festlegung nach **Bild 8** getroffen werden.

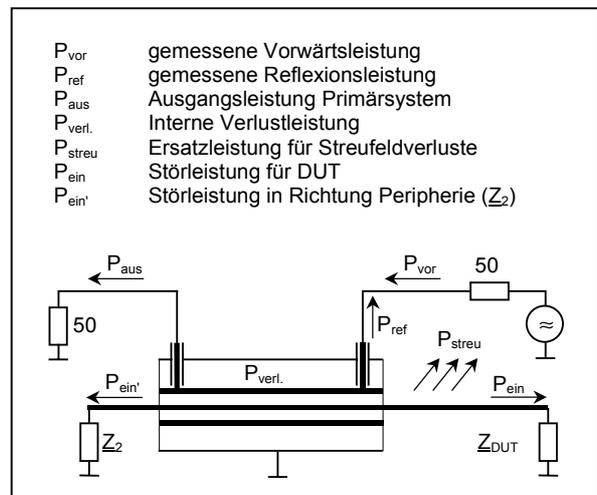


Bild 8 Leistungen am Rohrkoppler

Als Prüfleistung wird die Leistung P_{ein} definiert. Sie ergibt sich zu:

$$P_{ein} = P_{vor} - P_{ref} - P_{aus} - P_{ein'} - P_{verl.} - P_{Streu} \quad (9)$$

Durch diesen Ansatz ist es möglich, die für den Prüfling leitungsgebunden erzeugte Störleistung unter der Wirkung aller physikalischen Randbedingungen des Prüfaufbaus wie z.B. Impedanzen von Prüfling und Peripheriebaugruppen messtechnisch zu bestimmen. Für die Durchführung von Störfestigkeitsmessungen können unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen folgende Vereinfachungen zur Bestimmung der Prüfleistung P_{ein} getroffen werden:

1. Bei geringen Werten des SWR des Rohrkopplers im Messaufbau kann auf die Messung der reflektierten Leistung P_{ref} verzichtet werden.
2. Bei Nutzung des Rohrkopplers mit Wellenlängen der Störfunktion unterhalb der Hälfte seiner Längsausdehnung wird die Leistung $P_{ein'}$ mit einer etwa 10 dB geringeren Amplitude erzeugt und kann für Prüfw Zwecke vernachlässigt werden.
3. Durch die Nutzung einer Kalibriervorrichtung zur Messung der übergekoppelten Leistung können die Leistungsanteile P_{aus} und $P_{verl.}$ durch eine ISL- (Insertion Loss) Funktion ersetzt werden.
4. Durch Annahme einer für den betreffenden Rohrkoppler mittleren Koppeldämpfung (z.B. 10 dB) können vergleichende Störfestigkeitsmessungen unter ausschließlicher Nutzung der gemessenen Vorwärtsleistung P_{vor} durchgeführt werden.

3.3 Ausführungsformen

Unter Berücksichtigung der Randbedingungen von EMV- Messungen an Fahrzeugen bzw. deren elektronischen Komponenten wurden bisher folgende Rohrkopplervarianten aufgebaut und untersucht.

Bezeichnung	Länge [cm]	Innendurchmesser [mm]	Variante
RK 0508	5	8	geschlossen
RK 1008	10	8	geschlossen
RK 0508KL	5	8	aufklappbar
RK 0516	5	16	geschlossen
RK 1016	10	16	geschlossen
RK 0316KL	3	16	aufklappbar
RK 0516KL	5	16	aufklappbar
RK 1016KL	10	16	aufklappbar
RK 0530	5	30	geschlossen
RK 1030	10	30	geschlossen

Tabelle 4 Ausführungsformen von Rohrkopplern

In Abhängigkeit der Länge und vor allem des nutzbaren Innendurchmessers ergeben sich unterschiedliche HF- und Koppelereigenschaften, welche zu Unterschieden im nutzbaren Frequenzbereich des jeweiligen Rohrkopplers führen. Dabei sinkt mit steigendem Innendurchmesser des Rohrkopplers die obere Frequenzgrenze. Gibt man für den nutzbaren Frequenzbereich einen maximalen Dämpfungswert der ISL- Kurve von 10 bzw. 20 dB vor, so kann man die Arbeitsbereiche nach **Bild 9** angeben.

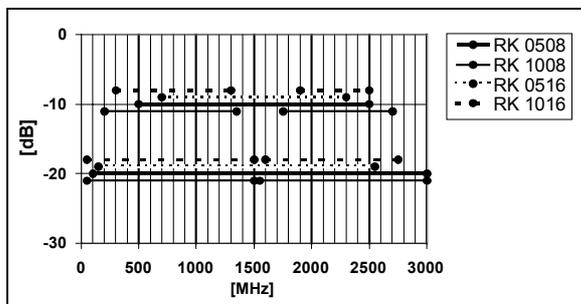


Bild 9 Arbeitsbereiche einiger Rohrkoppler

Für Messungen an Fahrzeugkomponenten im Bereich der Mobilfunkdienste stellen die Varianten RK 0516 KL und RK 1016KL ein Optimum zwischen nutzbarem Innendurchmesser und Nutzfrequenzbereich dar. Durch ihre aufklappbare Ausführungsform können sie ohne Auftrennen des Kabelbaumes für Labor- und Fahrzeugmessungen eingesetzt werden.

3.4 Hochfrequenz- und Koppelereigenschaften

Für die Hochfrequenzeigenschaften des Rohrkopplers ist die Ausführung des Primärsystems maßgebend. Durch die Wahl des konzentrischen Aufbaus, sowie zusätzlicher Maßnahmen zum Ausgleich von Störstellen im koaxialen System im Bereich der Einspeiseanschlüsse sind sehr gute Werte bei Hochfrequenzwellenwiderstand und SWR erreichbar. Für die jeweilige Bauform des Rohrkopplers sind die HF-Eigenschaften der geschlossenen und aufklappbaren Variante vergleichbar. So liegt beispielsweise der Wellenwiderstand des Rohrkopplers RK 1016 im Bereich $Z_{HF} = 50 \pm 5 \Omega$ (**Bild 10**).

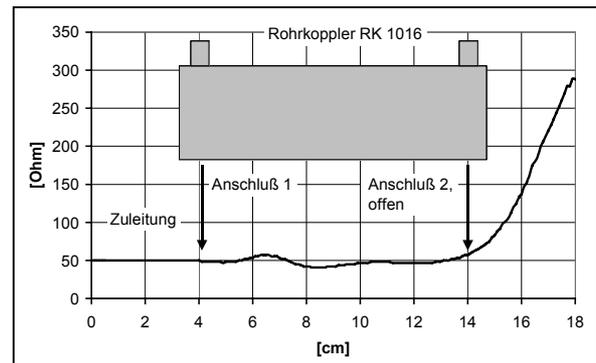


Bild 10 HF- Wellenwiderstand RK 1016

Die internen Verluste des Rohrkopplers $P_{verl.}$ nach **Bild 8** können durch die Verwendung von verlustarmen Füllstoffen in der internen Stützkonstruktion des Rohrkopplers minimal gehalten werden.

Zur messtechnischen Bestimmung der Koppelereigenschaften des Rohrkopplers und damit zur Gewinnung des Insertion- Loss- (ISL-) Wertes wird für jede Rohrkopplerbauform ein speziell angepasster Kalibrier- Jig nach einer im **Bild 11** dargestellten Prinzipschaltung verwendet.

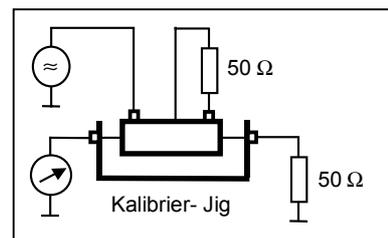


Bild 11 Prinzipschaltbild zur Ermittlung der ISL-Werte

Bei Verwendung der ISL- Kurve für Störfestigkeitsmessungen mit dem Rohrkoppler hat die Ausführung dieser Kalibriereinrichtung einen entscheidenden Einfluss auf die Vergleichbarkeit der Rohrkopplerbauformen untereinander sowie auf die Korrelation zwischen Labor- und Fahrzeugmessung.

Die so gewonnenen ISL- Werte einiger Rohrkoppler sind im **Bild 12** dargestellt.

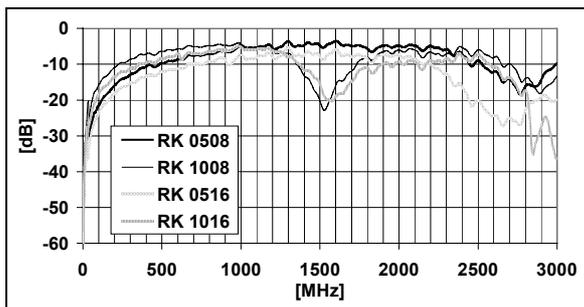


Bild 12 ISL- Werte einiger Rohrkoppler

3.5 Messaufbau für Labormessungen

Den prinzipiellen Messaufbau für das Messverfahren Rohrkoppler zeigt **Bild 13**. Die Positionierung von Prüfling, Prüfkabelbaum und Peripherie entspricht den Vorgaben der bekannten Komponentenmessverfahren nach ISO 11452 Teil 2 bis 5. Der Kabelbaum ist durch den Innenleiter des Rohrkopplers geführt, welcher in einem Abstand von 5 cm vom Prüfling positioniert wird. Das Primärsystem des Rohrkopplers wird auf der dem Prüfling zugewandten Seite über ein Messkabel und einen Leistungsmesskopf mit dem Ausgang des Leistungsverstärker verbunden. Der zweite Anschluss des Rohrkopplers wird über eine Messleitung mit einem konzentrierten Abschlusswiderstand verbunden.

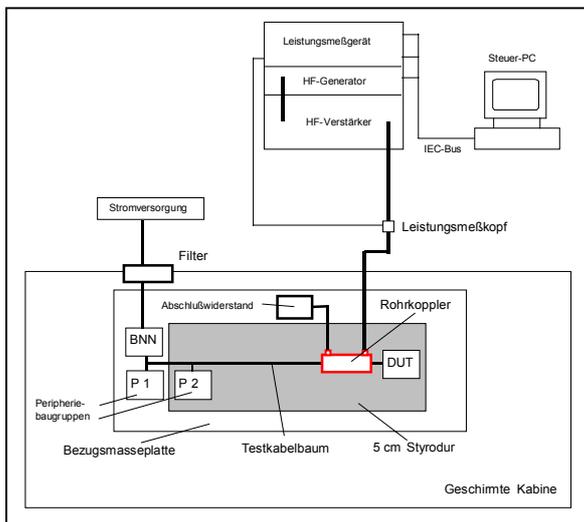


Bild 13 Messaufbau für SF- Messungen gegenüber Mobilfunk im Labor mit Rohrkoppler

Zur Bestimmung der Prüfleistung P_{ein} können die Vereinfachungen nach Abschnitt 3.2 genutzt werden. Bisherige Untersuchungen belegen, dass die Verwendung der kalibrierten ISL- Werte und Nutzung der Vor-

wärtsleistung P_{vor} zur Bestimmung der Prüfleistung P_{ein} zu reproduzierbaren und praxistauglichen Ergebnissen führt. Demzufolge ergibt sich die einzustellende Prüfleistung zu:

$$P_{\text{ein}} |_{\text{dBm}} = P_{\text{vor}} |_{\text{dBm}} - ISL |_{\text{dB}} \quad (10)$$

3.6 Messaufbau für Fahrzeugmessungen

Die notwendigen Prüfgeräte sowie die Anschlussbedingungen für den verwendeten Rohrkoppler entsprechen bei Fahrzeugmessungen den gleichen Vorgaben wie bei der Komponentenmessung, worin ein bedeutender Vorteil dieser Messmethode zu sehen ist, da die Messergebnisse auf Labor- und Fahrzeugebene direkt vergleichbar werden. Für die Positionierung des Rohrkopplers über den Zuleitungen wird analog zu den Festlegungen der Labormessung ein Abstand von 5 cm vorgeschlagen, falls dieser Ort im eingebauten Zustand der zu prüfenden Komponente zugänglich ist. **Bild 14** zeigt beispielhaft die Anordnung der einzelnen Komponenten des Prüfaufbaus im Fahrzeug.



Bild 14 Beispiel für Fahrzeugmessung mit dem Rohrkoppler RK 0516KL

3.7 Ergebnisse von Labor- und Fahrzeugmessungen

Um die Untersuchung des Messverfahrens auf Labor- und Fahrzeugebene mit einem erhöhten Dynamikbereich durchführen zu können, wurden Störleistungen für die Prüflinge verwendet, die teilweise deutlich über den im Abschnitt 2.3.1 hergeleiteten Werten für die theoretische Empfangsleistung P_{Emax} bei den betrachteten Funkdiensten liegen.

Bild 15 zeigt die Störfestigkeitsgrenzkurven einer elektronischen Komponente bei Labormessungen mit

verschiedenen Rohrkopplern mit der Prüfleistung P_{ein} als Parameter. Im Ergebnis kann eine gute Vergleichbarkeit der Rohrkoppler aufgezeigt werden.

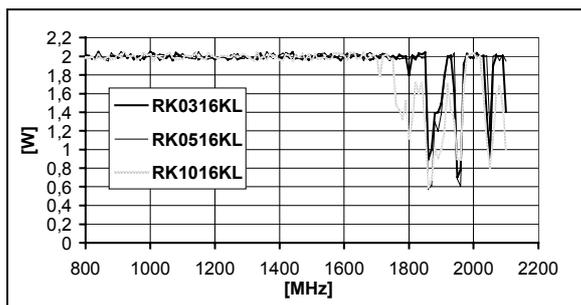


Bild 15 Vergleich von SF- Labormessungen mit verschiedenen Rohrkopplern

Im vorliegenden Fall wurde die Prüfleistung durch

$$P_{\text{ein}} = P_{\text{vor}} - P_{\text{ref}} - P_{\text{aus}} \quad (11)$$

gebildet.

Im **Bild 16** werden die Ergebnisse der Störfestigkeit einer Elektronik bei Labor und Fahrzeugmessungen mit dem Rohrkoppler RK 0516KL gegenübergestellt. Als Prüfparameter ist hier die gemessene Vorwärtsleistung P_{vor} angegeben.

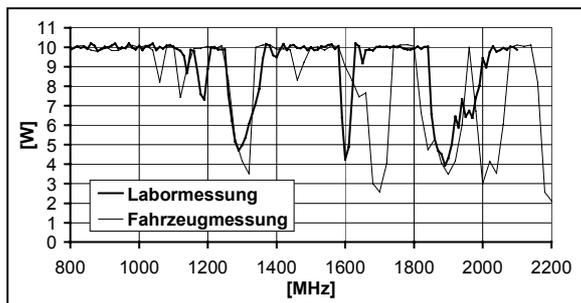


Bild 16 Vergleich von Labor- und Fahrzeugmessung mit dem RK 0516KL

3.8 Empfohlene Testleistungen für das Messverfahren Rohrkoppler

Die vorgeschlagenen Testleistungen orientieren sich an der bestehenden Messpraxis mit der Handy- Nachbildung, der theoretisch abgeleiteten Störbedrohung (Gl. 7 mit $G_E = 1$) und den bisherigen Ergebnissen der Untersuchungen zum Messverfahren Rohrkoppler. Für die derzeit durch die Prüfpraxis abgedeckten Mobilfunkbänder GSM 900 und GSM 1800 wird bei Messungen mit der Handy- Nachbildung ein Sicherheitsfaktor von 4 für die Sendeleistung verwendet. Bezugnehmend auf diese Vorgabe und der Annahme

eines mittleren Abstandes der Sendeantenne der Störung zum Prüfling von 0,1 m können die Testleistungen nach **Tabelle 5** abgeleitet werden.

Funkdienst	Testleistung HNB P_{vor} [W]	Testleistung Rohrkoppler	
		P_{ein} [mW]	P_{vor} (ISL = 10 dB) [W]
GSM 900	8	200	2
GSM 1800	4	27	0,27

Tabelle 5 Empfohlene Testleistungen für das Rohrkopplermessverfahren

Diese Testleistungen gelten in gleicher Weise für Labor- und Fahrzeugmessungen.

4 Vergleich verschiedener Labormessverfahren

4.1 Einkoppelmessungen

Eine Beurteilung der Eignung eines EMV- Verfahrens für Störfestigkeitsmessungen im Frequenzbereich der Mobilfunkdienste kann durch Analyse der Einkoppel-funktion erfolgen. Um ein möglichst effektives Messverfahren hinsichtlich des Leistungsbedarfes zu qualifizieren sind geringe Koppelverluste zu fordern. **Bild 17** zeigt die Koppeldämpfung für die in der Komponentenmesstechnik bis $f = 1$ GHz eingesetzten Prüfverfahren BCI (BCI- Zange mit $f_{\text{grenz}} = 1$ GHz) und Stripline (50 Ω nach ISO 11452 Teil 5) sowie das neue Messverfahren Rohrkoppler bei Einkopplung in eine beidseitig mit $R = 50 \Omega$ abgeschlossene Testleitung von $l = 1$ m Länge, welche sich 5 cm über der Bezugsmasse befindet. Die BCI- Zange und der Rohrkoppler wurden im Abstand von 0,1 m vom Leitungsende positioniert.

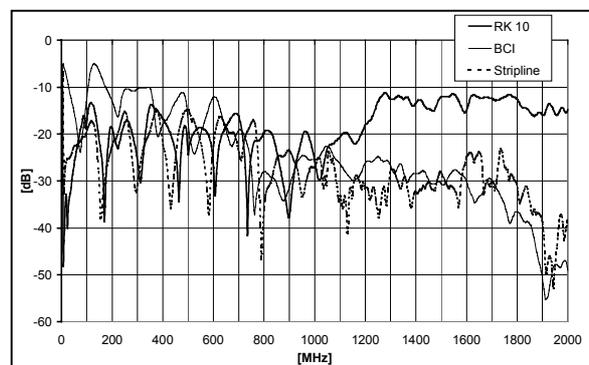


Bild 17 Koppeldämpfung für verschiedene Prüfverfahren

Der Vergleich, bei dem bewusst keine Kalibrierwerte für BCI und Rohrkoppler berücksichtigt wurde, belegt die deutlich geringeren Einkoppelverluste (bis zu 35 dB bei 1900 MHz) des verwendeten Rohrkopplers RK 1016 gegenüber den Messverfahren Stripline und BCI im Frequenzbereich oberhalb von $f = 1$ GHz.

Auch die Messung der eingekoppelten Spannungen (**Bild 18**) in eine auf beiden Seiten mit ihrem HF-Wellenwiderstand von 250Ω abgeschlossene Testleitung belegt die Vorteile des Rohrkopplers. Hier sind vergleichend die Ergebnisse der Einkopplung mit Handy- Nachbildungen für die Bänder GSM 900 und GSM 1800 dargestellt. Dabei wurde die Sendeantenne der Nachbildung direkt auf die Isolation der Testleitung gelegt.

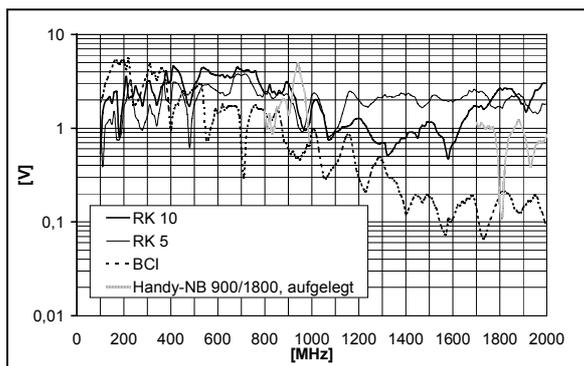


Bild 18 In eine Testleitung eingekoppelte Spannungen für verschiedene Prüfverfahren ($P_{\text{vor}} = 10$ W)

4.2 Messungen mit realen Prüflingen

Im **Bild 19** wird die Anwendung der bisher diskutierten Meßmethoden zur Untersuchung der Störfestigkeit einer elektronischen Komponente gegenüber GSM 1800- Signalen ($577 \mu\text{s}$ auf $4,6$ ms gepulste GSMK-Modulation) dargestellt.

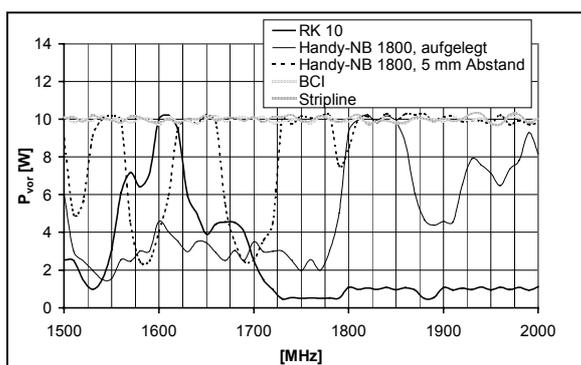


Bild 19 Störfestigkeitsgrenzkurve einer Elektronik mit $P_{\text{vor,max}} = 10$ W (Peak) für verschiedene Prüfmittel

Hier wird deutlich, dass der Rohrkoppler RK 10 im Gegensatz zu BCI und Stripline eine Alternative zur Handy- Nachbildung darstellt und die Empfindlichkeit des Prüflings sogar mit einer geringeren Prüfleistung nachweisen kann.

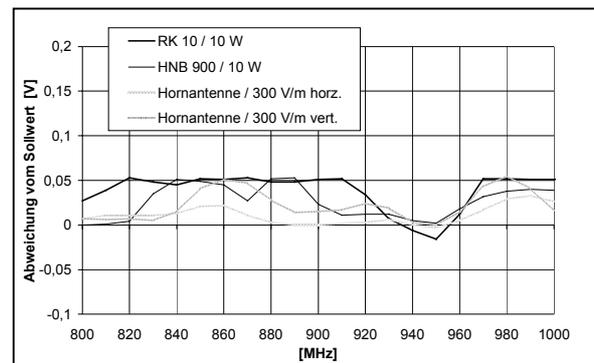


Bild 20 Vergleich verschiedener Prüfmittel bei Störfestigkeitsmessungen im GSM 900- Band

Der Vergleich mit dem Hornantennenmessverfahren im **Bild 20** zeigt die Vorteile des Rohrkopplers hinsichtlich der Messdynamik (10 W Vorwärtsleistung gegenüber 300 V/m bei der Hornantenne) bei gleichen Fehlerreaktionen des Prüflings. Weiterhin wird deutlich, dass die gemeinsame Wirkung der leitungsgebundenen und strahlungsgebundenen Störanteile, welche durch den HF- Strom im Kabelbaum zwischen Rohrkoppler und Prüfling hervorgerufen werden, zu einer mit dem ebenen Wellenfeld vergleichbaren Störbedrohung des Prüflings führt. Im Falle der Störbeeinflussung mit der Handy- Nachbildung für 900 MHz (HNB 900) wurde die Sendeantenne direkt auf die Zuleitungen im Bereich des Anschlusssteckers des Prüflings gelegt, was zu den größten Abweichungen des bewerteten Ausgangssignals führte. Dieser Sachverhalt kann jedoch nicht für beliebige Prüflinge verallgemeinert werden. Die Störbedrohung durch die Handy- Nachbildung ist sehr stark von der Lage des Metallgehäuses, der Ausrichtung der Sendeantenne und der Lage der koaxialen Zuleitung in Bezug zum Prüfling bzw. seinen Anschlussleitungen abhängig, wodurch die teilweise beobachteten Probleme dieses Messverfahrens bei der Reproduzierbarkeit der Prüfergebnisse zu begründen sind.

5 Zusammenfassung

Die größte Störbedrohung durch Mobilfunkdienste geht vom Betrieb von Mobilgeräten im Fahrzeuginnenraum ohne Außenantenne aus. Die dabei in den Kabelbaum bzw. die elektronischen Komponenten eingekoppelte Leistung kann mit Hilfe der Fernfeldkopplung angegeben werden. Ausgehend von diesem Ansatz sowie Korrelationsbetrachtungen zwischen

Komponenten- und Fahrzeugmessungen kann ein Vorschlag für praxisnahe Prüfschärfegrade für Komponentenmessungen erarbeitet werden.

Die Nachbildung dieser EMV- Bedrohung bei Labor und Fahrzeugmessungen erfolgt effektiv durch einen elektromagnetischen Wellenkoppler, welcher:

- im betrachteten Frequenzbereich sehr gute Hochfrequenz- und Koppeleigenschaften besitzt,
- reproduzierbare und ökonomische Störfestigkeitsmessungen erlaubt und
- durch verschiedene Bauformen an die Anforderungen der unterschiedlichen Messbedingungen angepasst ist.

Ein Vergleich des Wellenkopplers mit herkömmlicher Komponentenmesstechnik für Elektronikbaugruppen des Kfz. belegt die Vorteile des neuen Messverfahrens und zeigt, dass die gemeinsame Wirkung der leitungsgebundenen und strahlungsgebundenen Störanteile, welche durch den HF- Strom im Kabelbaum zwischen Rohrkoppler und Prüfling hervorgerufen werden, zu einer mit dem ebenen Wellenfeld vergleichbaren Störbedrohung des Prüflings führt.

6 Literatur

- /1/ Form, T.: Beitrag GMM- Fachbericht 20; Störfestigkeits- und Abstrahlanforderungen durch neue Dienste
- /2/ Zapp, A.: Diplomarbeit; Entwicklung eines Messverfahrens zur Prüfung der Störfestigkeit elektronischer Komponenten im Fahrzeug gegenüber gestrahlten Störungen von Mobilfunkgeräten; eingereicht an der Westsächsischen Hochschule Zwickau (FH) 2000
- /3/ Montrose, M.I.: EMC and the printed circuit board; IEEE Press Marketing 1998