

HPM-Detektionssystem mit Frequenzbestimmung

Dipl.-Ing. Christian Adami¹, Dipl.-Phys. Christian Braun¹, Dipl.-Ing. (FH) Peter Clemens¹, Dipl.-Ing. Michael Joester¹, Dr. Michael Suhrke¹, Dr. Hans-Ulrich Schmidt¹, Hans-Joachim Taenzer¹

¹Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen INT, Nukleare und Elektromagnetische Effekte

1. Einleitung

In allen Bereichen unserer Gesellschaft hält moderne und komplexe Elektronik Einzug. Sie vernetzt, lenkt große Mengen an Informationen und trifft sogar Entscheidungen, die sich unmittelbar auf Wirtschaft, Kultur und sogar das Wohlergehen von einzelnen Menschen auswirken. Beispiele dafür sind die Banken- und Börseninformationstechnik, Verkehrsleitsysteme und Überwachungssysteme zur Aufrechterhaltung der öffentlichen Ordnung, die intelligente, dezentrale Energieversorgung, bis hin zu aktiven Insassensicherheits- und Leitsystemen in Fahrzeugen und Lebenserhaltungssystemen in Krankenhäusern.

Mit zunehmender Komplexität und Vernetzung wächst auch das Potential für Bedrohung solcher kritischer Infrastruktur durch Hochleistungsmikrowellen (HPM), die solche Systeme zeitweise stören oder permanent außer Kraft setzen können. Kriminelle könnten beispielsweise schon durch Fehlalarme eines Überwachungssystems das Wachpersonal irritieren und die unübersichtliche Situation zu kriminellen Handlungen nutzen. Ein solcher HPM-Angriff lässt sich schwer aus der unerwarteten Fehlfunktion von Elektronik ableiten, zumal der Einsatz einer mobilen HPM-Quelle gut getarnt erfolgen kann. Da sich der Einfluss von Hochfrequenzfeldern nicht unmittelbar erkennen lässt, kann ein Angreifer den Angriff sogar wiederholen und sich unbemerkt von der Szene entfernen, falls er nicht erfolgreich war.

Neben der grundsätzlichen Integration des Themas High Power Electromagnetics (HPEM) in die Planung können Schutzkonzepte für kritische Infrastrukturen auch mit der Fähigkeit zur Detektion starker elektromagnetischer Felder jenseits des Bereichs der Elektromagnetischen Verträglichkeit sinnvoll ergänzt werden. Zur umfassenden Überwachung kritischer Einrichtungen sollten Geräte zur Analyse, Erkennung und Verfolgung von HPM-Bedrohungssignalen (Forensik) zum Einsatz kommen, mit denen die charakteristischen Kenngrößen von HPM-Impulsen, wie Amplitude (Feldstärke), Impulsbreite, Impulswiederholfrequenz, Einfallrichtung und Trägerfrequenz, bestimmt werden können. Ein solcher Detektor kann zwar die überwachte Elektronik nicht vor Störung oder Zerstörung schützen, doch gibt er, eingebettet in ein Schutzkonzept, die Möglichkeit, schnell zu handeln und Folgehandlungen der Angreifer zu unterbinden.

In der Vergangenheit wurde am Fraunhofer INT ein HPM-Detektionssystem [1] entwickelt, das über die Fähigkeiten einfacher Warnempfänger [2,3] zur einfachen Anzeige von gefährlichen HPM-Ereignissen hinausgeht. In einem nächsten Schritt wurde mit einem vierkanaligen System die Detektion der Richtung eines HPM-Angriffs realisiert [4].

2. Vorüberlegungen für die HPM-Detektion

Die Herausforderungen für die zuverlässige Messung von HPM-Signalen ergeben sich aus der Beschaffenheit mobiler Quellen. Ziel ist es, bei der Erzeugung der elektromagnetischen Felder, eine möglichst hohe Feldstärke am Orte der Elektronik zu erreichen, um mit großen eingekoppelten Hochfrequenzamplituden die Störabstände der Elektronik zu überschreiten. Dem gegenüber steht die Abnahme der Feldstärke reziprok zum Abstand von der Sendeantenne bis zum Ziel, es muss also eine höhere Feldstärke im Falle größerer Entfernungen erzeugt werden. Um schließlich mit einer noch transportablen Batterie in der Quelle große Feldstärken erzeugen zu können, werden statt Dauerstrichemission (engl.: Continuous Wave (CW)) nur kurze Pulse, dafür mit sehr hoher Leistung, erzeugt. Daraus ergeben sich unmittelbar die grundsätzlichen Herausforderungen an einen Detektor, der die Feldstärke der Hochfrequenz messen soll. Er muss sehr hohe Feldstärken mit großer Dynamik weit über die Grenzen der Elektromagnetischen Verträglichkeit hinaus messen können, ohne übersteuert zu werden. Zudem gilt es, diese Feldstärke in sehr kurzer Pulsdauer zu bestimmen. Da sich der Detektor im zu messenden Feld befindet, liegt nahe, dass er entsprechend feldfest konstruiert sein muss, um nicht selbst in der Funktion gestört zu werden.

Zusätzliche Bedingungen ergeben sich dann aus weiteren Überlegungen bezüglich der HPM-Quellenbeschaffenheit. Limitierende Faktoren für den Frequenzbereich sind zum einen die maximale Größe einer noch transportablen Quellenantenne, zum anderen die frequenzabhängigen Koppelmechanismen und die Reichweite der Hochfrequenz, wenn beispielsweise Wände durchdrungen werden sollen. Auch ist die Polarisation der elektromagnetischen Wellen von der Konstruktion abhängig, ein Detektor muss diese also unabhängig von ihrer Ausrichtung aufnehmen können. Als weiterer Parameter wäre auch die Trägerfrequenz der HPM-Quelle interessant. Mit dieser Information lassen sich neben Hinweisen auf den Quellentyp auch die Frequenzabhängigkeiten der verwendeten Hochfrequenzbauteile rechnerisch korrigieren und damit die Amplitudenmessung präzisieren sowie der nutzbare Frequenzbereich erweitern.

Die heutigen Möglichkeiten der digitalen Signalverarbeitung böten es an, die Hochfrequenz direkt zu digitalisieren und alle weiteren Bearbeitungsschritte in Software zu realisieren. Allerdings sprechen einige Punkte gegen dieses Konzept des SDR (engl.: Software Defined Radio). Generell sollte die Komplexität elektronischer Schaltungen in einer solchen Messumgebung so gering wie möglich gehalten werden, um das Risiko der Störbarkeit klein zu halten, denn die Effektivität von Schirmungs- und Filtermaßnahmen ist endlich. Die zu verarbeitende Hochfrequenz umschließt einen Frequenzbereich von einigen GHz und müsste - bei entsprechender analoger HF-Aufbereitung - in Echtzeit mit ausreichender Auflösung digitalisiert werden, was die Verwendung des schnellsten zur Zeit erhältlichen DigitalSpeichers mit großer Speichertiefe bedingen würde. Schnelle Wandler haben typischerweise 8 Bit Auflösung, was die Messdynamik bei nutzbaren 6 bis 7 Bit auf 36 bis 40 dB beschränken würde. Die Frequenzanalyse in Echtzeit müsste mit Fast Fourier Transformation (FFT) durchgeführt werden, es müsste also eine entsprechende Rechenleistung zur Verfügung stehen. Oszilloskope auf dem Markt mit diesen Leistungsdaten sind für diese Anwendung unverhältnismäßig teuer. Zusätzlich soll die Leistungsaufnahme eines Detektors für batteriebetriebenen Dauerbetrieb ausgelegt sein, auch im Hinblick auf Größe, Gewicht und Umweltschutz.

Diese Überlegungen führen schließlich zu einer analogen Auslegung des Detektors, wie sie in den folgenden Kapiteln beschrieben wird.

3. Konzept zur HPM-Amplitudenmessung

Das Fraunhofer INT hat vor einiger Zeit ein Konzept für eine HPM-Amplitudenmessung entwickelt [1], das bis auf die Frequenzmessung die in den Vorüberlegungen genannten Bedingungen erfüllt. Eine Spiralantenne nimmt die elektromagnetischen Wellen polarisationsunabhängig auf und ein Dämpfungsglied schwächt das Signal auf einen messbaren Wert ab. Anschließend wird das Signal dann für einen großen Dynamikbereich logarithmisch gewichtet verstärkt und einem Amplitudendemodulator zugeführt. Das Hüllkurvensignal der Hochfrequenzaustastung kann anschließend beispielsweise mit einem Oszilloskop in der Amplitude vermessen und mit einer Zehlschaltung die Anzahl der Pulse gezählt werden.

Das Fraunhofer INT hat zur Konzeptüberprüfung einen Demonstrator realisiert und im Labor vermessen. Der Frequenzbereich erstreckt sich von 500 MHz bis etwa 4 GHz, die Messdynamik umfasst 60 dB, beginnend bei etwa 10 V/m. Die Schirmung des Demonstrators wurde erfolgreich bis 1 kV/m ausgemessen. Gepulste Signale konnten bis zu einer Kürze von 10 ns gemessen werden.

Zur Detektion der Richtung eines HPM-Angriffs mit einem vierkanaligen System wurde das Richtungsverhalten von Spiralantennen mit rückwärtiger Hohlraumkammer ausgenutzt [4]. Jede der vier ausgewählten Antennen hat einen Öffnungswinkel von etwa 90° über einen großen Frequenzbereich. Nutzt man also vier solcher Amplitudenmessschaltungen parallel und versetzt die Antennen um jeweils 90°, so lässt sich der Bereich von 360° in der Horizontalen überwachen und aus den verschiedenen Amplituden der Messpfade die Richtung eines Signales bestimmen. Auch hier wurde ein Demonstrator realisiert. Der Fehler beim Richtungswinkel beträgt im getesteten Frequenzbereich maximal 30°.

4. Konzept zur HPM-Frequenzmessung

Das im vorherigen Kapitel erläuterte Konzept zur Amplitudenmessung sieht nur die Detektion der Einhüllenden des Hochfrequenzsignals vor, wodurch die Frequenzinformation verlorenggeht. Zur genaueren Analyse und Identifizierung von HPM-Signalen ist jedoch auch die zeitgleiche Messung deren Trägerfrequenz erstrebenswert, wofür sich als Konzept ein Laufzeit-Frequenzdiskriminator anbietet (Bild 1) [5].

Der Frequenzdiskriminator besteht aus einem 0°-Leistungssteiler, zwei Koaxialleitungen mit einer definierten Laufzeitdifferenz, einem 180°-Leistungskoppler zur Addition der beiden Zweige und einem linearen HF-Amplitudendetektor. Für sehr niedrige Frequenzen heben sich die beiden gleichphasigen Signale im 180°-Koppler auf, so dass der Detektor keine Ausgangsspannung anzeigt. Für die Frequenz, bei der die Laufzeitdifferenz eine 180°-Phasenverschiebung erzeugt, ergibt sich am Ausgang des 180°-Kopplers die maximale Ausgangsspannung. Zwischen diesen beiden Frequenzen steigt die Ausgangsamplitude linear mit der Frequenz an. Dieses Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass es nicht nur für Dauerstrichsignale (CW) anwendbar ist, sondern auch für impulsmodulierte Signale bis hin zu kurzen Einzelpulsen.

Voraussetzungen für die Realisierung eines solchen Frequenzdiskriminators sind eine konstante Eingangsamplitude, ein sehr gutes Stehwellenverhältnis aller Hochfrequenzkomponenten und ein sehr linearer und gut angepasster HF-Detektor.

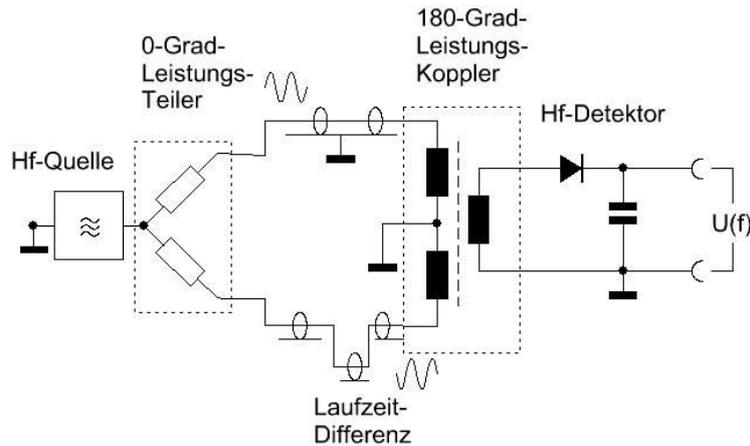


Bild 1: Prinzipschaltbild des HPM-Frequenzdiskriminators

5. Realisierung eines HPM-Detektionssystems mit Frequenzbestimmung

Für den Demonstrator wurde dazu ein integrierter Frequenzdiskriminator eingesetzt, der durch einen integrierten Breitband-Begrenzerverstärker mit konstanter Ausgangsamplitude in einem Dynamikbereich von 60 - 70 dB angesteuert wird. Bild 2 zeigt die realisierte Wandlung der Frequenz zu einer Ausgangsspannung. Man erkennt die sehr gute lineare Proportionalität zur Frequenz zwischen 1 und 5 GHz. Unterhalb 1 GHz bis herab zu 400 MHz ist eine Messung mit schlechterer Auflösung möglich. Die Diskriminatorkennlinie gilt nicht nur für CW-Signale, sondern auch für pulsmodierte Signale. In den Ausgangssignalen des Frequenzdiskriminators ist bei unterschiedlichen Impulsbreiten ein Anfangsüberschwinger von ca. 40 ns zu beobachten, danach ist das Impulsdach eingeschwungen. Damit können an Impulsen ab ca. 100 ns Breite zuverlässige Frequenzmessungen durchgeführt werden (Bild 3).

Parallel dazu wird eine Amplitudenmessschaltung, wie im Kapitel 3 beschrieben, eingesetzt. Hinter den Dämpfungsgliedern teilt sich der Signalweg in zwei Zweige auf. Zur Amplitudenmessung dient wie in [1] ein logarithmischer Verstärker/Detektor, der bei einem HF-Eingangspegel von typisch $-60 \dots 0$ dBm ein linear mit dem dB-Wert ansteigendes Basisband-Impulssignal liefert. Dessen Impulsamplitude wird in einem Kanal des nachfolgenden Digitaloszilloskops gemessen und im Messrechner in Feldstärke kalibriert ausgegeben.

Zur Frequenzmessung muss dem Frequenzdiskriminator ein Signal mit relativ konstantem Pegel angeboten werden, da dieser nur im Bereich von $-10 \dots +5$ dBm pegelunabhängig arbeitet. Daher muss dieser Zweig mit einem Begrenzerverstärker beginnen, dessen Verstärkung so hoch ist, dass bei Eingangspegeln von $-60 \dots 0$ dBm ein näherungsweise konstanter Ausgangspegel für den Frequenzdiskriminator vorhanden ist.

In der hier vorgestellten Arbeit werden sowohl der logarithmische Verstärker/Detektor wie auch der Begrenzerverstärker durch ein Modul realisiert. Es besitzt einen Amplitudendetektor-Videoausgang und einen Begrenzeroutput. Dieser ist zwar nur für den Frequenzbereich 1500...2500 MHz spezifiziert, hält aber im Frequenzbereich 500...3000 MHz für den Pegelbereich $-60...0$ dBm die begrenzte Amplitude für den Frequenzdiskriminator genügend konstant. Im Pegelbereich $-40...0$ dBm beträgt der nutzbare Frequenzbereich sogar 500...5000 MHz. Die Videoamplitude fällt zwar oberhalb 3500 MHz deutlich ab, jedoch kann dieser Fehler bei Kenntnis der Frequenz korrigiert werden.

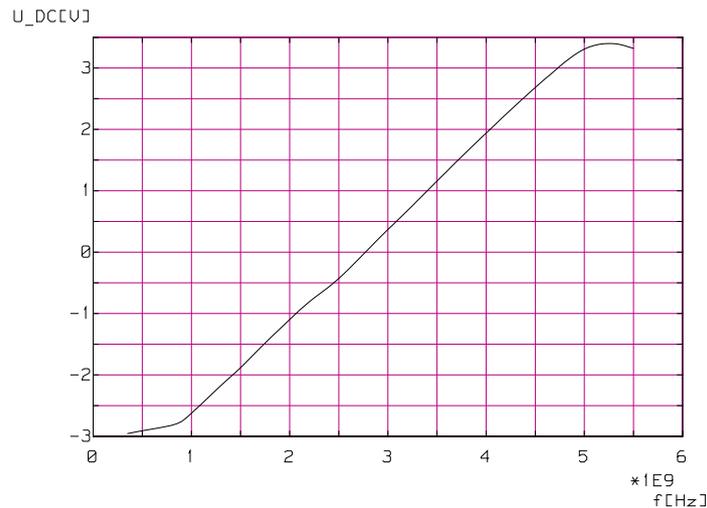


Bild 2: Kennlinie des Frequenzdiskriminators.

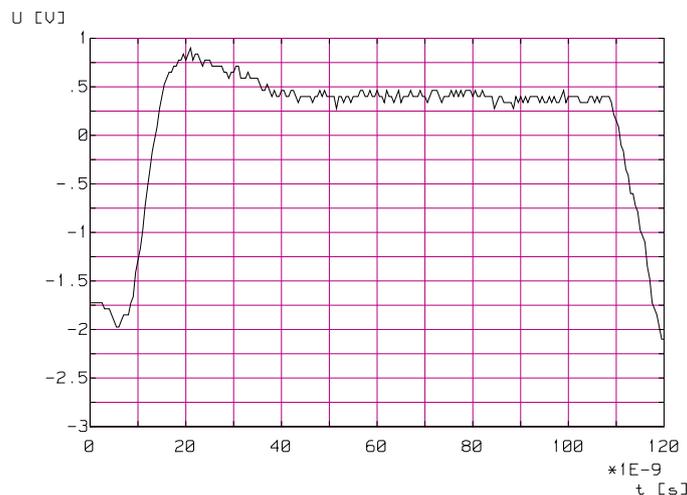


Bild 3: Ausgangsimpuls des Frequenzdiskriminators, HF-Pulslänge = 100 ns.

Das Blockschnittbild des HF-Teils des HPM-Detektors mit Frequenzmessung ist in Bild 4 dargestellt. Dieser besteht aus den oben beschriebenen Einzelkomponenten, eingebaut in ein HF-dichtes Gehäuse mit sehr guter Schirmwirkung (Bild 5, rechts unten). Dadurch ist es auch in einer gefährdeten Umgebung mit Feldstärken bis über 10 kV/m zu betreiben. Die Stromversorgung des HF-Teils erfolgt gut gefiltert aus einer geschützten Batterieeinheit oder einem geschützten Netzgerät.

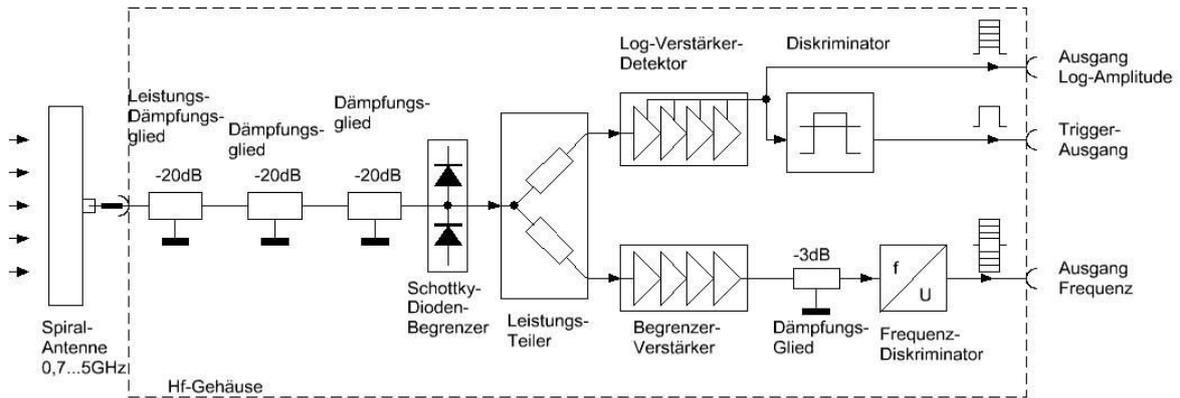


Bild 4: Blockschaltbild des HF-Teils des HPM-Detektors mit Frequenzmessung

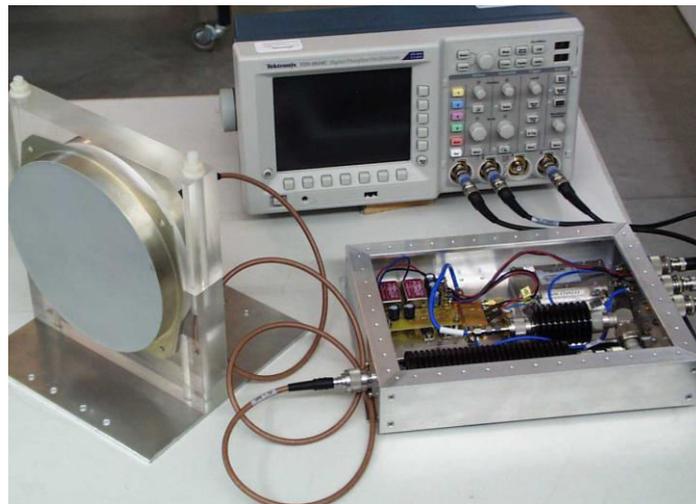


Bild 5: Demonstrator des Konzeptes der Frequenzerkennung und einkanaler Amplitudenmessung

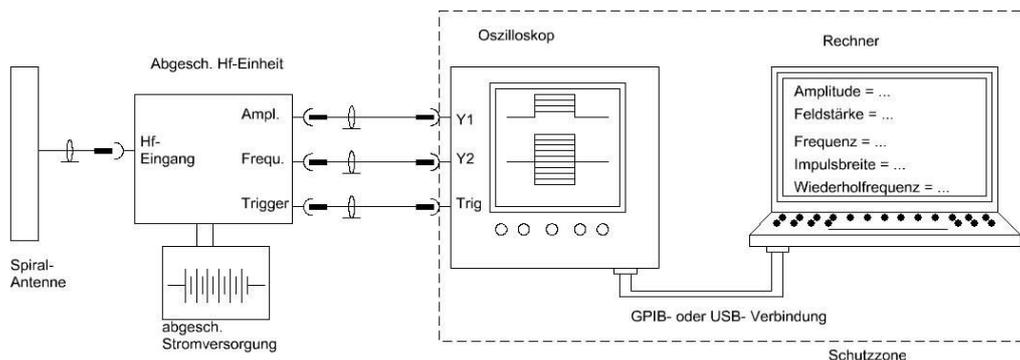


Bild 6: Blockschaltbild des gesamten HPM-Detektors mit Frequenzmessung

Das Digitaloszilloskop zur Signalauswertung ist über drei gut geschirmte Koaxialkabel mit dem HF-Teil verbunden. Es muss, ebenso wie der Steuerrechner, in einer Schutzzone mit genügender Schirmwirkung betrieben werden (Bild 6). Das Oszilloskop ist mit dem Steuerrechner über eine GPIB- oder eine USB-Datenleitung verbunden. Wenn als Oszilloskop ein USB-Oszilloskop ohne Bildschirm verwendet wird, so kann dies auch zusammen mit dem HF-Teil in einer abgeschirmten Einheit untergebracht werden (wie in Kapitel 7 erläutert). In diesem Fall ist die Datenleitung als Lichtwellenleiter-USB-

Verbindung ausgeführt. Nur der Steuerrechner muss dann in einer Schutzzone betrieben werden oder entsprechend gehärtet ausgeführt sein.

6. Softwarekonzept

Im derzeitigen Entwicklungsstadium wurde eine Basissoftware für den Vierkanaldetektor zur Richtungserkennung realisiert. Die Software steuert hauptsächlich das im Demonstrator verbaute Oszilloskop, setzt Trigger und berechnet die Amplituden. Eine erste Version einer grafischen Benutzeroberfläche zeigt entweder eine vereinfachte Darstellung mit grober Pegelanzeige ähnlich einer Ampel sowie die Richtung eines HPM-Angriffs (Bild 7) oder eine Oberfläche mit vier Oszillogrammen der Rohdaten der Messkanäle (Bild 8, rechts).

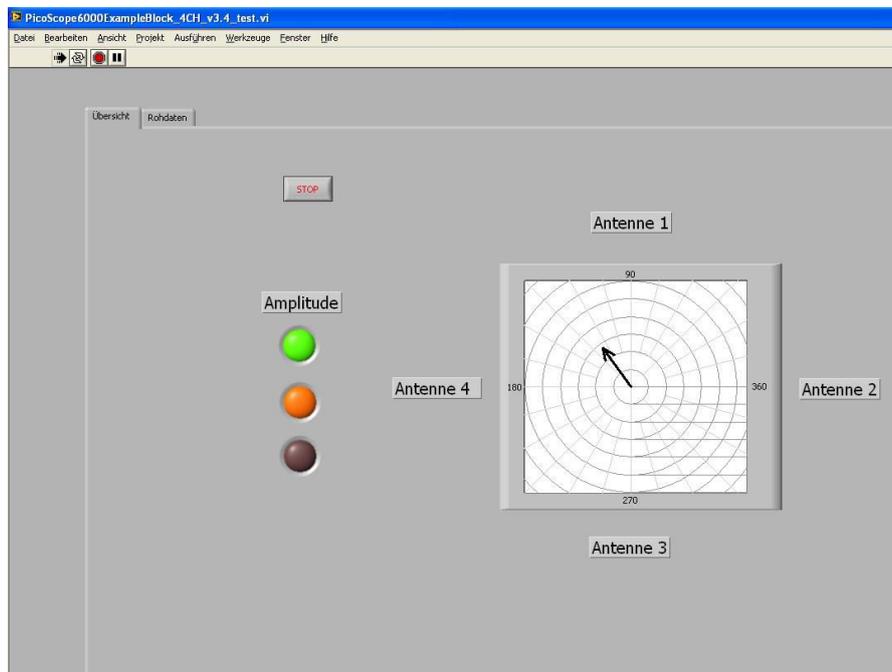


Bild 7: Bild der grafischen Benutzeroberfläche in einer ersten Entwicklungsversion

7. Kompaktes Konzept

Das Konzept eines kompakten Gesamtsystems mit integrierter Spannungsversorgung und Signalübertragung per Lichtwellenleiter wurde im Labor, wie auch bei Freifeldmessungen, erfolgreich bestätigt (Bild 8). Der abgeschirmte HF-Teil (links) enthält die Detektormodule, Dämpfungsglieder, Begrenzer, ein PC-basiertes Vierkanal-USB-Oszilloskop, die Spannungsversorgung sowie einen Medienkonverter für die Datenübertragung über eine Glasfaserverbindung zu einem PC mit der Nutzeroberfläche (rechts).

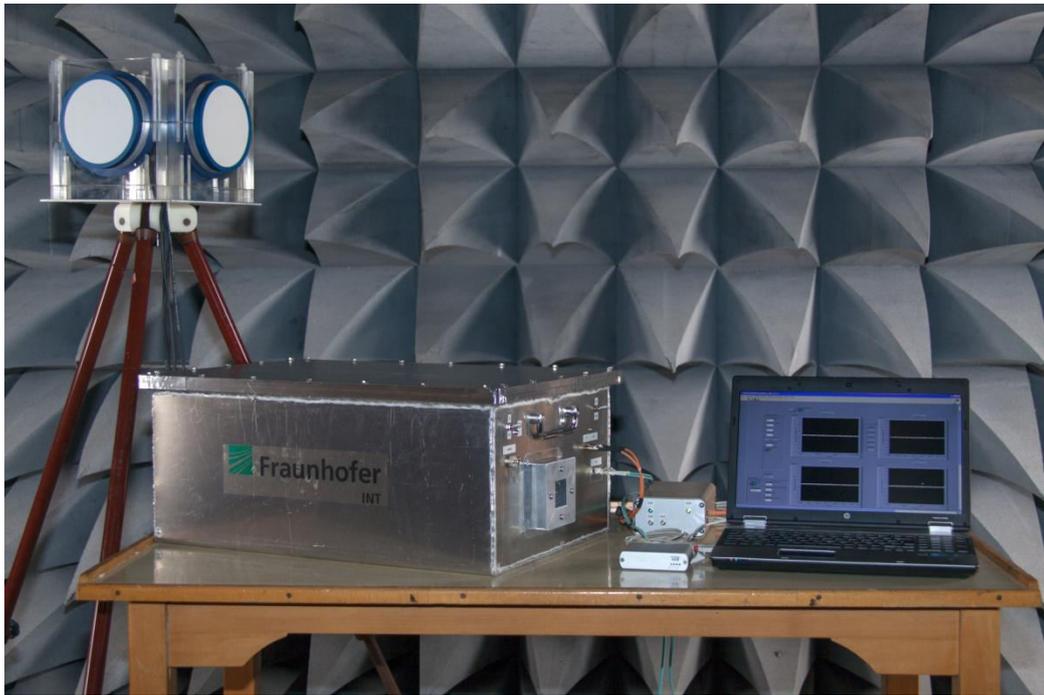


Bild 8: Demonstrator eines kompakten vierkanaligen HPM-Amplitudenmesskonzeptes mit Richtungsdetektion

8. Zukünftige Entwicklung

In einem weiteren Schritt wird die Richtungs- und Frequenzerkennung in einem Detektor vereint. Für den speziellen Einsatz im Detektor werden Antennen nach anderen Gesichtspunkten als die kommerziellen, für den Sendebetrieb optimierten Antennen, entwickelt und können beispielsweise kleiner ausfallen.

9. Referenzen

- [1] Chr. Adami, Chr. Braun, P. Clemens, H.-U. Schmidt, M. Suhrke, and H.-J. Taenzer, HPM detection system for mobile and stationary use, Proceedings of the EMC Europe 2011, York, UK, p. 1.
- [2] R. Hoad and I. Sutherland, The forensic utility on detecting disruptive electromagnetic interference, Proceedings of the 6th European Conference on Information Warfare and Security (ECIW 2007), July 2007.
- [3] D. B. Jackson and G. H. Baker III, High Dynamic Range, Wide Bandwidth Electromagnetic Field Threat Detector, EUROEM 2012 Book of Abstracts, p. 91.
- [4] Chr. Adami, Chr. Braun, P. Clemens, M. Jöster, H.-U. Schmidt, M. Suhrke, and H.-J. Taenzer. HPM Detector with Extended Detection Features. EUROEM 2012 Book of Abstracts, p. 82 und Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 10 Book, to be published.
- [5] Chr. Adami, P. Clemens, M. Jöster, H.-U. Schmidt, M. Suhrke, and H.-J. Taenzer. Ein HPM-Detektionssystem mit Frequenz- und Amplituden-Messung - 1. Prototyp eines einkanaligen Gerätes. Fraunhofer INT Report 26/2013 (Juni 2013).