

Breitbandige optoelektrische E-Feld-Sensoren mit minimaler Feldwechselwirkung

Wieland Mann, Klaus Petermann
TU Berlin, Fachgebiet Hochfrequenztechnik, Sekr. HFT4
Einsteinufer 25, 10587 Berlin
wieland.mann@tu-berlin.de

Abstract:

Der Beitrag beschreibt einen E-Feld-Sensor, der aufgrund seiner äußerst kleinen Abmessungen ($5 \times 5 \times 5 \text{mm}^3$) und der rein faseroptischen Anbindung das zu messende Feld nahezu nicht stört. Er ist daher insbesondere für Nahfeldmessungen prädestiniert.

Das Ausgangssignal des Messsystems ist mit einer Bandbreite von mehreren GHz direkt proportional zur Feldstärke am Ort des Sensors. Die spektrale Information bleibt vollständig erhalten, bei der Messung von CW-Signalen steht sowohl die Amplituden- als auch die Phaseninformation zur Verfügung (vektorielle Messung), es können aber auch beliebig modulierte Signale erfasst werden. Durch die Möglichkeit, breitbandig direkt im Zeitbereich zu messen, können z.B. pulsartige Vorgänge sehr gut untersucht werden.

Die gemessene Empfindlichkeit des Sensors ist $50 \mu\text{V}/\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Anwendungsgebiete sind z.B. Nahfeldmessungen an Antennen, Feldhomogenitätsmessungen in TEM- bzw. GTEM-Zellen und in Absorberkammern sowie SAR-Messungen im Bereich der EMVU.

Einführung

In den vergangenen Jahren wurden verschiedene kleine E-Feld-Sensoren in der Literatur vorgestellt. Vielfach handelte es sich dabei um Sensoren, die aufgrund ihres Funktionsprinzips (Dipolantenne mit gleichrichtender Diode im Fußpunkt) zwar die Amplitude des elektrischen Feldes messen, jedoch keine Information über die spektrale Verteilung liefern. Ebenso sind keine Phasenmessungen möglich. Für Messungen etwa der spezifischen Absorptionsrate (SAR) im Bereich der EMVU sind diese Sensoren durchaus ausreichend. Auch für rein überprüfende Feldhomogenitätsmessungen in TEM- bzw. GTEM-Zellen genügt es mitunter, nur die Amplitude zu bestimmen.

Zunehmend wird jedoch gefordert, nicht nur CW-Signale messen zu können, sondern auch modulierte, wie sie in der Realität üblicherweise vorkommen, oder aber pulsartige Signale. Hierfür ist eine zeitaufgelöste Messung erforderlich.

Für Nahfeldmessungen an Antennen ist eine E-Feld-Messung nach Betrag und Phase unabdingbar, um gewinnbringend beim Antennendesign eingesetzt zu werden. Auch Messungen in (G)TEM-Zellen zur Suche nach Ursachen von Feldinhomogenitäten sind i.allg. erst sinnvoll, wenn die gesamte vektorielle Feldinformation erfasst wird.

Seit wenigen Jahren wird ein neuer Ansatz für einen breitbandigen optoelektronischen Sensor verfolgt, der für derartige Messungen geeignet ist. Er nutzt als zentrales Element eine vertikal emittierende Laserdiode (VCSEL, vertical cavity surface emitting laser), deren Strom durch die Feldstärke moduliert wird. Aufgrund der geringen VCSEL-Schwellströme kann eine optische Energieversorgung anstelle von z.B. im Sensor integrierten Primärzellen bzw. Akkus zum Einsatz kommen, wodurch sehr kleine Sensorabmessungen möglich werden. Hierdurch wiederum wird die Feldstörung minimiert.

Sensorprinzip

Das Sensorsystem besteht aus dem eigentlichen Sensor (s. Bild 1a links und 1b) und einer externen Einheit (remote unit, Bild 1a rechts), welche die Lichtquelle für die optische Energieversorgung (500mW-Laserdiode) sowie den optischen Empfänger (O/E-Wandler) enthält. Beide Komponenten sind über Glasfasern miteinander verbunden und können ohne weiteres 100m voneinander entfernt angeordnet sein. Dies ist z.B. dann von Vorteil, wenn im Bereich des Sensors mit Hochspannung gearbeitet wird, dort ein explosionsgefährdeter Bereich vorliegt o.ä.

Das Licht des Lasers wird in ein Faserbündel eingekoppelt und zum Sensor geleitet. Dort findet mittels eines Solarzellenarrays die Rückwandlung in elektrische Energie zur Versorgung der Sensorkomponenten statt.

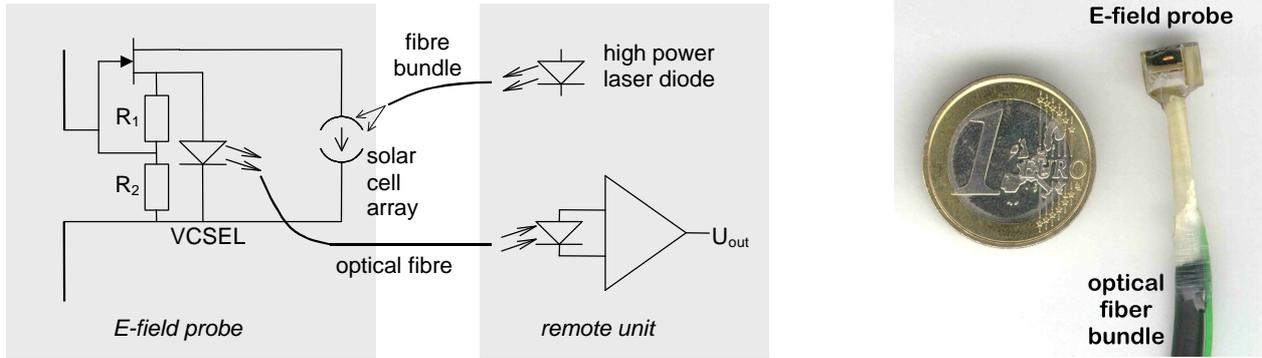


Bild 1: a) Prinzip des Sensorsystems, b) aufgebauter Sensor

Neben dem Solarzellenarray enthält der Sensor im wesentlichen zwei Dipolelektroden, einen HEMT-basierenden Vorverstärker (Sourcefolger) und den VCSEL. Der Laserdioden-Strom wird mit Hilfe des HEMTs durch die von den Dipolelektroden aufgenommene Feldstärke moduliert. Sowohl der HEMT als auch der VCSEL sind bis zu mehreren GHz einsetzbar. Das emittierte Licht wird in eine Glasfaser eingekoppelt, die zu dem optisch-elektrischen Wandler in der externen Einheit führt. Das elektrische Ausgangssignal des Sensorsystems kann dann mittels Oszilloskop, Spektrums- und Netzwerkanalysator, Vektorvoltmeter etc. ausgewertet werden.

Bild 1b zeigt einen aufgebauten Sensor. Das dicke, schwarz umhüllte Faserbündel ist das für die optische Energieversorgung, während die grün umhüllte Faser rechts dahinter die eigentliche Signalfaser ist. Innerhalb des Sensors sind alle Komponenten auf einem Standard-Keramiksustrat von $5 \times 5 \text{mm}^2$ Größe montiert. Die Dipolelektroden an zwei gegenüberliegenden Seiten des Substrates haben eine Größe von ebenso $5 \times 5 \text{mm}^2$.

Messergebnisse

Bild 2 zeigt den gemessenen Dynamikbereich des Sensorsystems bei einer Messfrequenz von 100MHz (Auflösebandbreite 1Hz). Das Eigenrauschen des Sensors liegt bei $50 \mu\text{V}/\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ (rauschäquivalente Feldstärke). Wenngleich dieser Wert noch ca. 20dB vom theoretisch möglichem Limit ($1 \cdot 10 \mu\text{V}/\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$) entfernt ist, ist er doch besser als der aller anderen bekannten und teilweise erheblich größeren Sensoren.

Der 1dB-Kompressionspunkt wird bei einer Feldstärke von 200V/m erreicht, so dass sich ein Dynamikbereich von 132dB (1Hz) ergibt.

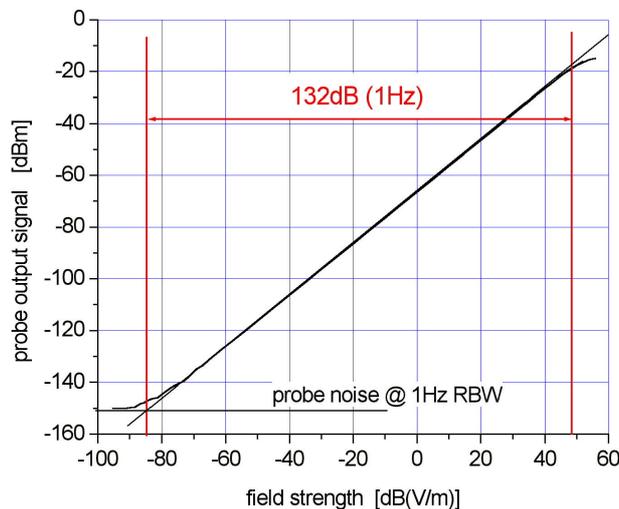


Bild 2: Linearität, Rauschen und Dynamikbereich

Der Frequenzgang ist bei Vernachlässigung parasitärer Kapazitäten und Induktivitäten flach bis hinauf zu mehreren GHz. Diese Grenze ist durch die Modulations-Bandbreite des VCSELS und die Parameter des HEMT gegeben. Im unteren Frequenzbereich ist aufgrund der Widerstände R_1 , R_2 (s. Bild 1a) ein Hochpasscharakter gegeben ($f_{3\text{dB}}$ um 1MHz).

Bild 3a zeigt den Frequenzgang des Sensors bis 500MHz bei Messung mit einer Crawfordzelle (Querschnitt: $45\text{cm} \times 26.5\text{cm}$). Ab 410MHz treten Resonanzen der Zelle auf, so dass die Kurve nur bis etwa 400MHz gültig ist. In diesem Bereich ist der Frequenzgang des Gesamtsystems sehr flach. Für die Messung im GHz-Bereich wurde eine rundkoaxiale TEM-Zelle mit einem Außenleiter-Innendurchmesser von 100mm im mittleren Abschnitt und einer Gesamtlänge von 250mm verwendet. Hier treten Resonanzen ab 1.8GHz auf, bis ca. 4GHz ist die Kurve noch eingeschränkt verwertbar. Deutlich erkennbar ist ein Empfindlichkeitsabfall des Sensorsystems ab ca.

500MHz um 20dB bis 3GHz. Dies kann im wesentlichen durch parasitäre Kapazitäten erklärt werden. Die ausgeprägte (nichtperiodische) Welligkeit im tieffrequenten Bereich (<1..1.5GHz) ist nachweislich kein dem Sensor immanenter Frequenzgang, sondern hat seine Gründe offenbar in bisher noch nicht vollständig geklärten Unzulänglichkeiten der koaxialen TEM-Zelle.

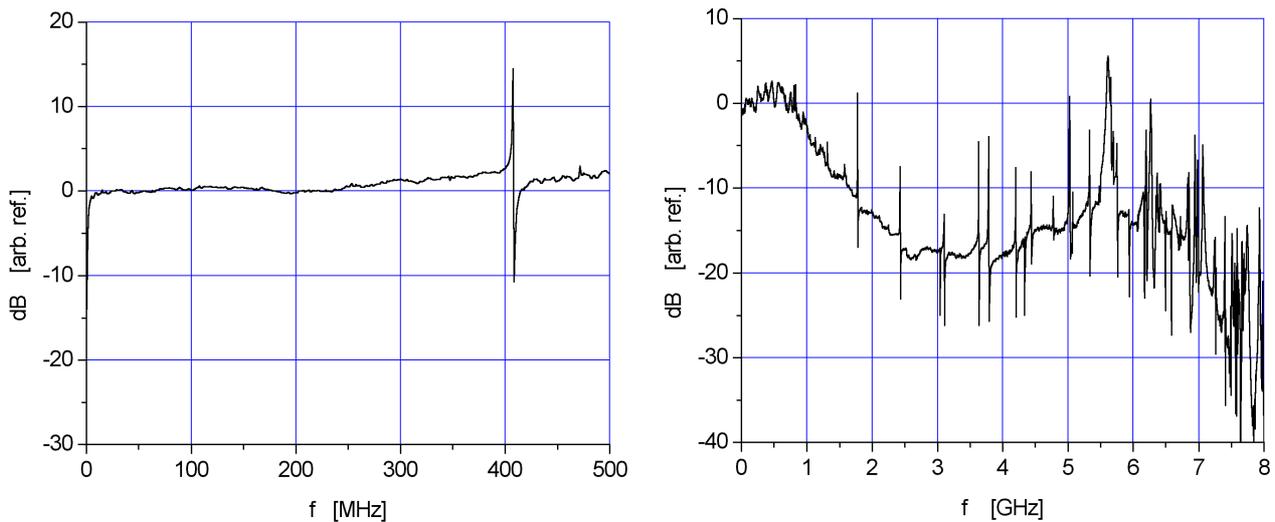


Bild 3: Frequenzgang des Sensors (einschließlich der verwendeten Zelle);
a) Crawfordzelle (Abstand Septum-Außenleiter: 130mm), b) koaxiale TEM-Zelle (100mm Außenleiter-Innendurchmesser)

Die Eignung des Sensors für Zeitbereichsmessungen wurde mittels eines periodischen Rechtecksignals (Grundfrequenz 3MHz, Tastverhältnis 1:5) überprüft, welches in die Crawford-Zelle eingespeist wurde. Abgesehen vom additivem Sensorrauschen, welches durch eine Mittelung unterdrückt werden kann, sind nahezu keine Signalformunterschiede zwischen dem Quellsignal und dem Sensorausgangssignal zu erkennen (Bild 4a). Der zeitliche Versatz ergibt sich durch die Signallaufzeit im Sensorsystem (ca. 20m optische Faser).

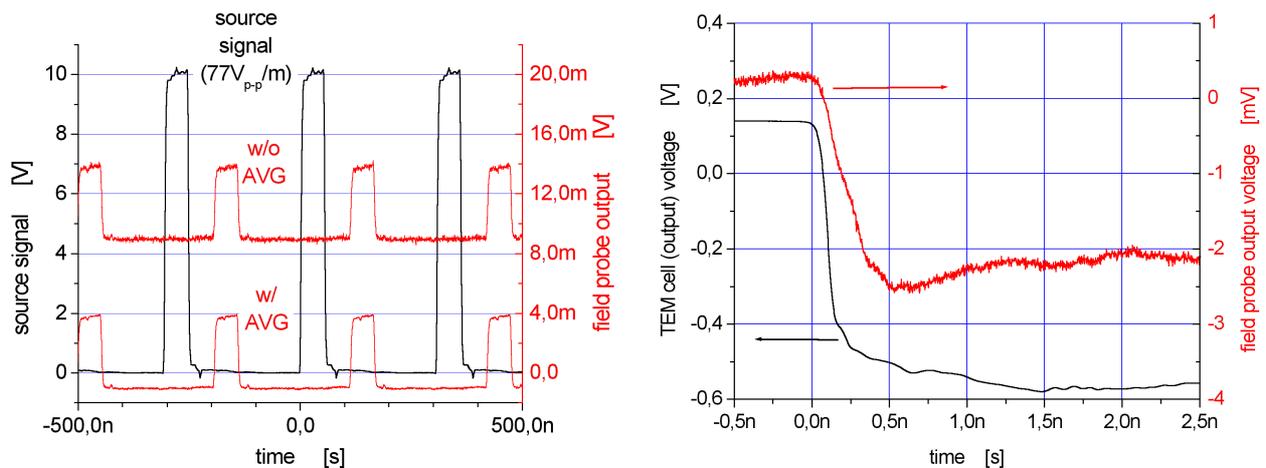


Bild 4: Messungen im Zeitbereich.
a) Pulsfolge (schwarz: Quellsignal; rot, Mitte: ungemitteltes Sensorsignal; rot, unten: Sensorsignal nach Mittelung)
b) Abschätzung der Anstiegszeit (schwarz: Ausgangssignal der TEM-Zelle; rot: gemitteltes Sensorsignal)

Zudem wurde mit Hilfe eines schnellen Pulsgenerators die Anstiegszeit des Sensorsystems abgeschätzt. Die schwarz gezeichnete, unverrauschte Kurve in Bild 4b zeigt als Referenz das Ausgangssignal der rundkoaxialen TEM-Zelle, an dessen Eingang das Signal des Pulsgenerators eingespeist wurde. Die leicht verrauschte, rot gezeichnete Kurve zeigt das gemessene Ausgangssignal des Sensorsystems, wobei der Zeitversatz durch die Signallaufzeit für die Darstellung entfernt wurde. Das Rauschen des Sensors und des Oszilloskops wurde durch eine (synchronisierte) Mittelung über mehrere Messungen unterdrückt. Das Sensorsignal schwingt leicht über und hat eine Anstiegszeit in der Größenordnung von 250ps. Unter der Annahme, dass das Ausgangssignal der TEM-Zelle zur Feldstärke im Innern proportional ist (bis auf Laufzeitversatz), ist dieser Wert wegen der deutlich steileren Flanke des Ursprungssignals auch etwa gleich der Anstiegszeit des Sensorsystems.

Anwendungsbeispiel: Nahfeldmessung an Patchantennenarray

Der Sensor wurde zusammen mit einem Netzwerkanalysator (R&S ZVCE) für eine zweidimensionale Nahfeldmessung an einem 5-elementigen Patchantennenarray bei 1.9GHz eingesetzt. Der Scanbereich war

400mm×250mm groß. Gemessen wurde die Feldstärke in Kopolarrichtung bei einem Abstand von 20mm zwischen Antennensubstrat und Sensor.

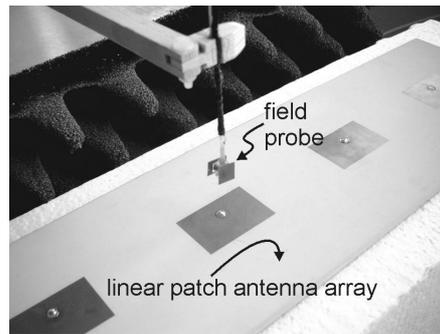


Bild 5: Planare Nahfeldmessung an einem Patchantennenarray

Der Abstand benachbarter Patches entspricht der halben Freiraum-Wellenlänge. Bei der Messung wurde nur das mittlere Element angeregt. Die Anschlüsse der anderen Elemente wurden offen gelassen.

Die gemessene (kopolare) E-Feldkomponente ist in Bild 6 gezeigt. Gemessen wurde mit einem Raster von 3×3mm. Zur besseren Orientierung sind die Substratkanten und die einzelnen Patches mit eingezeichnet. Aufgrund des begrenzten Scanbereichs ist die Antenne nicht vollständig in dieser Darstellung enthalten.

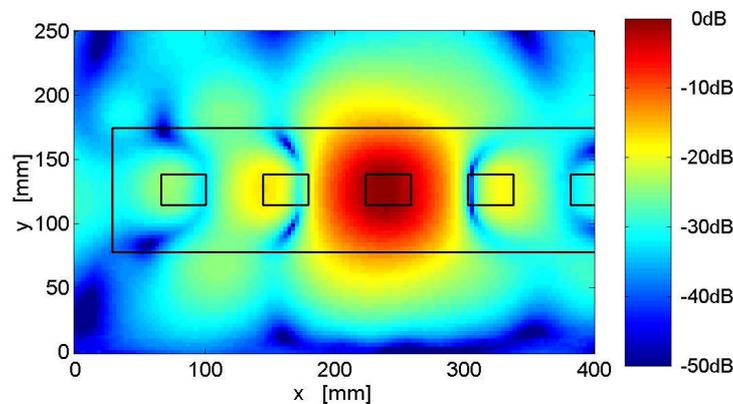


Bild 6: Gemessene E_y -Verteilung (normiert auf Maximum)

Sehr gut erkennbar ist die gegenseitige Kopplung zwischen den Antennenelementen. Die vier nicht gespeisten Patches werden vom mittleren Patch mit angeregt, so dass sich an diesen Positionen lokale Maxima der Feldstärke ergeben.

Zusammenfassung

Der vorgestellte E-Feld-Sensor stellt einen äußerst vielversprechenden Ansatz zur sowohl zeit- als auch frequenz aufgelösten Messung elektrischer Felder dar. Aufgrund der kleinen Abmessungen und der rein optischen Energieversorgung und Signalabführung ist die Feldstörung minimal, so dass insbesondere Nahfeldmessungen sehr genau möglich sind.

Die experimentell nachgewiesene Empfindlichkeit liegt bei $50\mu\text{V}/\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$, theoretisch ist noch eine Verbesserung um ca. 20dB auf $1..10\mu\text{V}/\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ möglich. Derzeit ergibt sich ein Dynamikbereich von 132dB (1Hz), zukünftig werden voraussichtlich 150dB erreichbar sein.

Der Frequenzgang ist bis 500MHz relativ flach und fällt darüber bis 3GHz um ca. 20dB ab. Die Eckfrequenz von 500MHz kann durch den Einsatz von hierfür besser geeigneten Halbleiterkomponenten und einen kleineren Aufbau bis zu einigen GHz hin erhöht werden.

Für (i. allg. schmalbandige) vektorielle Nahfeldmessungen z.B. an Antennen ist der Sensor hervorragend geeignet. Selbst für direkte breitbandige Zeitbereichsmessungen ist der Sensor mit seiner Anstiegszeit von ca. 200..250ps noch gut einsetzbar.

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Projektes, R. Ziegler für Hilfe beim Aufbau des Sensors sowie Prof. G. Mönich für zahlreiche wertvolle Hinweise insbesondere bei der Frequenzgangmessung und A. Kortke und S. Zinal für die Durchführung der Patchantennenmessung.