



Bundesamt
für Strahlenschutz

Spotlight on EMF Research

Spotlight on “A Gaussian process based approach for validation of multi-variable measurement systems: Application to SAR measurement systems” by Bujard et al. in IEEE Access (2024)

Kategorie [Hochfrequente Felder, Dosimetrie/Exposition]

Spotlight - Sep/2025 no.3 (Deu)

Kompetenzzentrum Elektromagnetische Felder (KEMF)

1 Einordnung des Artikels in den Kontext durch das BfS

Vor der Einführung eines drahtlosen Endgeräts wie z. B. eines Mobiltelefons auf dem europäischen Markt muss der Hersteller nachweisen, dass eine bestimmte räumlich und zeitlich gemittelte lokale Spezifische Absorptionsrate (SAR) unter 2 W/kg liegt, wenn das Gerät in der Nähe des Kopfes oder des Rumpfes betrieben wird. Um dies nachzuweisen, werden SAR-Messsysteme verwendet, deren Sensoren das elektrische Feld messen, welches in einem Phantom (Modell des menschlichen Körpers oder Teilen davon, in diesem Fall: Kopf und Rumpf) erzeugt wird, das mit einer Gewebesimulationsflüssigkeit gefüllt ist. Solche Systeme müssen validiert werden, bevor sie von den Geräteherstellern oder anderen Stellen verwendet werden können. Um solche Systeme zu validieren, müssen sie unter einer ausreichenden Anzahl genau definierter Bedingungen getestet werden, bei denen die erzeugten SAR-Werte mit bekannten Werten verglichen werden können. In zwei Normen [2, 3] werden die Validierungsverfahren von den internationalen Normungsgremien IEC und IEEE festgelegt. In den letzten Jahren haben neue Entwicklungen von SAR-Messsystemtechnologien sowie die Notwendigkeit, die beiden Normen [2, 3] zu harmonisieren, zu einer unüberschaubar großen Anzahl von Testkonfigurationen geführt, um SAR-Messsysteme umfassend zu validieren. Das Ziel des zu besprechenden Papiers [1] ist die Einführung einer stochastischen Validierungsmethode, um dieses Problem zu lösen.

2 Resultate und Schlussfolgerungen aus der Perspektive von Bujard et al.

Moderne SAR-Messsysteme sind in der Lage, Messungen in einer Vielzahl von Bedingungen durchzuführen, einschließlich verschiedener Frequenzen, Antennen- und Modulationsarten, Gerätepositionen, Gerätedrehwinkel und mehr. Jede Kombination dieser Parameter bestimmt einen Punkt im hochdimensionalen Konfigurationsraum des Messsystems. Theoretisch müsste das System zur Validierung an jedem Punkt des Konfigurationsraums getestet werden, das heißt, es müssten Testmessungen durchgeführt und mit bekannten Zielwerten verglichen werden. In der Praxis ist dies in einem realistischen Zeitrahmen nicht machbar. Die Autoren schlagen eine Methode auf der Grundlage der sogenannten räumlichen Regression bzw. des „Krigings“ vor, die aus der Geostatistik [4] bekannt ist, um das Verhalten des Messsystems an einem beliebigen Punkt des Konfigurationsraums vorherzusagen. Dabei wird nur eine handhabbare Teilmenge der tatsächlich möglichen Messungen herangezogen.

Die Methode basiert auf den folgenden Schritten. Zunächst wird eine ausreichend große Anzahl von Testmesspunkten zufällig, aber in wohldefinierter Weise gleichmäßig über den Konfigurationsraum verteilt. Dies geschieht mit Hilfe des „Latin Hypercube Sampling“, einer Methode der zufälligen Abtastung, bei der eine räumliche Anhäufung der Punkte vermieden wird. Die Anzahl der Punkte hängt von der Art des Messsystems ab und wird von den Autoren empirisch bestimmt (z. B. 400 für Array-Systeme). Es wird angenommen, dass der Messfehler ein Gaußscher Zufallsprozess mit konstantem Mittelwert (unabhängig vom Konfigurationspunkt) und einer Kovarianz ist, die nur von der Entfernung der Konfigurationspunkte untereinander abhängt. Auf Basis dieser Messungen wird in einem zweiten Schritt eine lineare Funktion entwickelt. Die Parameter dieser Funktion werden so bestimmt, dass die Funktion als bester linearer erwartungstreuer Schätzer fungiert [4]. Diese lineare Funktion ermöglicht es, innerhalb eines berechenbaren Konfidenzintervalls zu schätzen, was das System an jedem anderen Punkt im Konfigurationsraum messen würde. Da drittens nicht klar ist, ob das resultierende Modell zuverlässig ist, z. B. aufgrund einer unzureichenden Anzahl von Messpunkten oder Fehlern bei der Numerik, muss es selbst überprüft werden. Das korrekte mathematische Modell würde eine Vorhersage für einen beliebigen Punkt im Konfigurationsraum liefern, und die Ergebnisse der Testmessungen wären um diesen Punkt herum normalverteilt. Daher schlagen die Autoren vor, eine bestimmte Anzahl weiterer Messungen an Punkten durchzuführen, die nicht in der ursprünglichen Testmenge (die zur Erstellung des Kriging-Modells verwendet wurde) enthalten sind. Wenn diese Messergebnisse um den vom Kriging-Modell (Schritt 1) vorhergesagten Wert normalverteilt sind (innerhalb einer wohldefinierten Genauigkeit), wird es als vertrauenswürdig eingestuft. Die Prüfung der Normalität erfolgt mit dem aus der Statistik bekannten Shapiro-Wilk-Test. Mithilfe des Kriging-Modells schlagen die Autoren viertens einen Suchalgorithmus vor, der den Konfigurationsraum auf Teilmengen absucht, in welchen das Kriging-Modell mit hoher

Wahrscheinlichkeit über einer maximal erlaubten Differenz zwischen Vorhersagewert und dem bekannten Zielwert liegt (MPE, definiert in der Norm [3]). Anders gesagt handelt es sich um Teilmengen des Konfigurationsraums, die „kritisch“ sind, da das Messsystem die Validierung in diesem Bereich mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht bestehen wird. In einem letzten Schritt muss das Testlabor eine Reihe von Messungen in der kritischen Menge durchführen, um zu prüfen, ob das System auch noch in diesen kritischen Teilmengen gut funktioniert, oder ob es tatsächlich nicht besteht.

Die Methode wird zunächst auf ein analytisches Beispiel angewandt, bei dem der stochastische Messprozess *a priori* bekannt ist. Als kritische Teilmengen des Konfigurationsraums erweisen sich diejenigen, in denen das anfängliche „Latin Hypercube Sampling“ nur wenige Punkte aufweist, sowie die Randbereiche des Konfigurationsraums. Die Autoren wenden die Methode dann auf zwei Messsysteme an. Das erste ist ein Scanning-System, bei dem ein Roboterarm die elektrische Feldverteilung im Phantom untersucht. Das zweite ist ein Array-System, bei dem eine Anordnung von Sensoren an festen Positionen im Phantom angebracht ist. Im ersten Fall wurden keine kritischen Regionen gefunden, während im zweiten Fall 44 zusätzliche Tests durchgeführt werden mussten, um eine gute Leistung des Systems auch in den kritischen Teilmengen zu gewährleisten. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die vorgeschlagene Methode in der Validierungspraxis effizient funktioniert, da die Anzahl der Tests für übliche Testlaboratorien durchaus handhabbar ist.

3 Kommentare des BfS

Nach aktuellem Wissensstand der Spotlight-Redaktion ist die von den Autoren vorgeschlagene Methode die erste Anwendung der Kriging-Methode in einem Validierungsprotokoll und damit im Kontext der Normung. Validierungsmethoden sind für den Strahlenschutz von großer Bedeutung, da jede Konformitätsprüfung von drahtlosen Endgeräten auf validierten SAR-Messsystemen beruhen muss. Die Methode wird mathematisch präzise dargestellt und verwendet etablierte Methoden. Ihr stochastischer Charakter verhindert, dass Messsysteme an vorgewählten Messpunkten besonders gut kalibriert werden, während andere Bereiche des Parameterraums vernachlässigt werden, da die Latin-Hypercube-Stichprobe bei der Erstellung des Modells für den Messfehler (siehe Abschnitt 2) zufällig ermittelt wird. Die Autoren zeigen, dass die zur Bestätigung des Kriging-Modells verwendeten Algorithmen sowie die Suche nach kritischen Teilmengen für die in der Publikation gewählten Beispiele gut funktionieren. Ein mathematischer Nachweis der Konvergenz der angewandten Algorithmen ist in der Veröffentlichung jedoch nicht enthalten.

Ein mögliches praktisches Problem ist die Anhäufung von kritischen Teilmengen in Randbereichen des Konfigurationsraums, was zu vielen Messungen in Extremsituationen mit geringer praktischer Relevanz führt. Ein weiterer Vorteil der vorgeschlagenen Methode ist ihre Technologieneutralität in dem Sinne, dass kein *a priori*-Wissen über die Art des Messsystems erforderlich ist. Dennoch könnte die Größe der anfänglichen Stichprobenmenge von dem getesteten Messsystem abhängen. Die Tests können unabhängig von einem bestimmten Testlabor durchgeführt werden, und es wird ein leicht zugängliches Software-Tool bereitgestellt [5].

Dieser neu vorgeschlagene Ansatz ist methodisch interessant und fundiert und hat das Potenzial, für die Standardisierung der Validierung von SAR-Messsystemen eingesetzt zu werden, das heißt, zur Harmonisierung der beiden Normen [2, 3] beizutragen. Ein standardisiertes Validierungsverfahren ist (indirekt) für den Strahlenschutz von großer Bedeutung.

Referenzen

- [1] Bujard, C, Neufeld, E, Douglas, M, Wiart, J, Kuster, N. A Gaussian process based approach for validation of multi-variable measurement systems: Application to SAR measurement systems. *IEEE Access*. 2024; 12:60404–60424.
DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3393778>.
- [2] *IEC/IEEE International Standard - Measurement procedure for the assessment of specific absorption rate of human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices – Part 1528: Human models, instrumentation, and procedures (Frequency range of 4 MHz to 10 GHz)*. IEC/IEEE 62209-1528:2020.
DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9231298>.
- [3] *IEC/IEEE Draft International Standard - Measurement procedure for the assessment of specific absorption rate of human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices – Part 3: Vector measurement-based systems (Frequency range of 300 MHz to 6 GHz)*. IEC/IEEE P62209-3/ED2, February 2023.
URL: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=10050412>.
- [4] Chilès, J-P, Delfiner, P. *Geostatistics : modeling spatial uncertainty*. 2nd edition. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118136188>.
- [5] Bujard, C, Neufeld, E, Douglas, M, Wiart, J, Kuster, N. *SAR system validation procedure : user website*.
URL: <http://sarvalidation.site>.

Impressum

Bundesamt für Strahlenschutz
Postfach 10 01 49
38201 Salzgitter

www.bfs.de

Tel.: +49 30 18333-0
Fax: +49 30 18333-1885
E-Mail: spotlight@bfs.de

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
[urn:nbn:de:0221-2025090854688](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0221-2025090854688)

Spotlight - Sep/2025 no.3 (Deu)