



Beitrag der Ingenieurwissenschaft in der EMVU-Forschung

Gernot Schmid

Die mittlerweile seit fast zwei Jahrzehnten im Blickfeld des öffentlichen Interesses stehende Forschungstätigkeit hinsichtlich möglicher gesundheitlicher Auswirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder des Mobilfunks („EMVU-Forschung“) wird in den letzten Jahren erfreulicher Weise zunehmend als das wahrgenommen, was sie tatsächlich ist. Nämlich als äußerst komplexe interdisziplinäre Wissenschaft, bei der sowohl Biologen beziehungsweise Mediziner als auch Ingenieure gleichermaßen gefordert sind.

Dass dies nicht immer so war, davon legt eine nicht unbedeutende Anzahl von „frühen“ wissenschaftlichen EMVU-Arbeiten Zeugnis ab. In vielen dieser Arbeiten wurden, mit zumeist aus biologischer/medizinischer Sicht durchaus anspruchsvollen experimentellen Methoden, unterschiedlichste Studien (in vitro, in vivo, Humanstudien) hinsichtlich möglicher Beeinflussungen diverser biologischer Endpunkte durch die Exposition in hochfrequenten elektromagnetischen Feldern durchgeführt.

Den technisch/physikalischen Aspekten des Versuchsdesigns wurde von den, hauptsächlich biologisch/medizinisch ausgebildeten Autoren, jedoch bedauerlicherweise oftmals zu wenig Bedeutung beigemessen, obwohl über die grundlegenden physikalischen Interaktionsmechanismen zwischen elektromagnetischen Feldern und menschlichem Gewebe bereits seit den 1950er Jahren wissenschaftliche Publikatio-

nen vorliegen (wenn auch nur basierend auf den damals noch sehr einfachen Modellen). Intuitiv kamen als „Expositionseinrichtungen“ teilweise handelsübliche Funkgeräte beziehungsweise Mobiltelefone oder von anderen HF-Quellen gespeiste Antennen in „ein-“ beziehungsweise „ausgeschaltetem“ Zustand in der „Nähe“ der Versuchsobjekte beziehungsweise Versuchspersonen zum Einsatz, ohne nähere Definition der Befeldungsbedingungen.

Erst als viele dieser Studien widersprüchliche, aus medizinisch/biologischer Sicht nicht erklärbare Ergebnisse lieferten, wurde zunehmend Rat bei Ingenieuren mit Erfahrung auf dem Gebiet der Hochfrequenztechnik gesucht und es konnte bald klar gemacht werden, dass die Schaffung definierter Expositionsbedingungen innerhalb eines vorgegebenen Versuchsdesigns nicht ohne weiters zu bewerkstelligen, sondern dafür beträchtlicher ingenieurwissenschaftlicher Aufwand notwendig ist.

Durch diese Einsicht wurde in den frühen 1990er Jahren geradezu ein Boom der EMVU-bezogenen Ingenieurwissenschaften ausgelöst. Experimentelle Methoden zur Messung der elektrisch relevanten Eigenschaften der Körpergewebe wurden optimiert und ermöglichten in weiterer Folge eine dielektrische Katalogisierung einer Vielzahl von Körpergeweben über den gesamten technisch interessanten Frequenzbereich. Methoden zur Messung der Strahlungsabsorption in einfachen Körperphantomen wurden entwickelt und innerhalb weniger Jahre zur Serienreife gebracht, sodass praktisch gleichzeitig mit dem Einsetzen der weltweiten, in ungeheurem Ausmaß um sich greifenden Verbreitung der modernen Mobilfunktechnologie bereits standardisierte Methoden für personenschutzrelevante Zulassungsprüfungen verfügbar waren.

Weiter ermöglichte die ebenfalls in diesem Zeitraum einsetzende Leistungssteigerung und Verbreitung von Personalcomputern erstmals eine sinnvolle Software-Implementierung von bereits länger bekannten numerischen Methoden zur Berechnung allgemeiner elektromagnetischer Felder, wie zum Beispiel der FDTD-Methode (finite-difference time-domain).

Vor allem auf diesem Gebiet, der sogenannten „numerischen Dosimetrie“, ist die rasante Entwicklung in den letzten beiden Jahrzehnten beeindruckend. Waren die Möglichkeiten für die numerische Berechnung der elektromagnetischen Strahlungsabsorption im Körper Ende der 1980er Jahre noch auf Körpermodelle bestehend aus wenigen tausend kubischen Elementarzellen mit mehreren Zentimetern Kantenlänge beschränkt, so standen ein Jahrzehnt später bereits Körpermodelle mit mehreren Millionen Elementarzellen im Millimeterbereich zur Verfügung und konnten auch rechentechnisch (hinsichtlich Computerressourcen) bewältigt werden.

Aber nicht nur hochaufgelöste anatomische Körpermodelle von Menschen wurden entwickelt, sondern auch solche von Versuchstieren, was einen Meilenstein für die Entwicklung von Expositionssystemen für Tierversuche darstellte. Es war damit erstmals möglich, die Absorptionsmechanismen gewebespezifisch zu analysieren und damit in weiterer Folge Vergleiche zwischen gewebespezifischer Absorptionsverteilung in Versuchstieren und Menschen unter praktisch relevanten Expositionsbedingungen anzustellen. Heute, ein weiteres Jahrzehnt später, steht eine Reihe von aus medizinischen MRT-Aufnahmen gewonnenen, hochaufgelösten, CAD-basierten Körpermodellen, sowohl von Kindern unterschiedlichen Alters als auch von männlichen und weiblichen Erwachsenen, mit über 100 unterscheidbaren Gewebebereichen zur Verfügung. Die erreichbare räumliche Auflösung dieser Modelle erstreckt sich in den Submillimeterbereich und die gegenwärtig verfügbaren Hard- und Softwareressourcen erlauben Berechnungen mit mehreren hundert Millionen Elementarzellen auf guten Arbeitsplatzcomputern. Auf entsprechend ausgerüsteten Computerclustern sind bereits über eine Milliarde Zellen problemlos rechenbar.

Es war vor allem diese enorme Entwicklung der numerischen Dosimetrie, die zur signifikanten Verbes-

serung der technisch/physikalischen Aspekte von Versuchsdesigns in EMVU-relevanten wissenschaftlichen Studien führte. Einerseits konnte man mit diesen neuen, leistungsstarken Methoden die Unzulänglichkeiten der Expositionsmethoden der eingangs erwähnten „frühen“ Arbeiten belegen, und andererseits hatte man nun die Möglichkeit, für spezifische biologische/medizinische Untersuchungen gezielt Expositionssysteme zu entwickeln, die nicht nur eine qualitative, sondern auch eine quantitative, gewebespezifische Aussage zur tatsächlich während der Untersuchung herrschenden Exposition ermöglichten.

Damit war spätestens seit Ende der 1990er Jahre allgemein klar, dass EMVU-relevante biologische/medizinische Studien nur auf Basis einer engen Kooperation fachkompetenter Vertreter aus den Bereichen Biologie beziehungsweise Medizin und Ingenieurwissenschaften zu sinnvollen und wissenschaftlich haltbaren Ergebnissen führen können. Die enge Kooperation von Biologen beziehungsweise Medizinern und Ingenieuren wurde damit zu einer, seitens der Geldgeber für EMVU-Studien gestellten Grundbedingung, wodurch in den vergangenen Jahren eine Reihe von ausgefeilten High-Tech Expositionseinrichtungen für die unterschiedlichsten Untersuchungen (in vitro, in vivo und Humanstudien) entstanden sind. Definierte, innerhalb bekannter Unsicherheitsgrenzen liegende Expositionsbedingungen, (doppel)blind applizierbare Multi-Level-Exposition mit einer Vielzahl möglicher Signalformen bei minimaler Einschränkung der Versuchsobjekte beziehungsweise Versuchspersonen unter kontrollierten Umgebungsbedingungen sind selbstverständliche Qualitätskriterien von heutigen Expositionssystemen geworden und bilden eine solide physikalische Basis für die biologische/medizinische Versuchsdurchführung.

Ein weiterer, mit der oben beschriebenen Entwicklung der dosimetrischen Methoden und den Expositionssystemen eng in Zusammenhang stehender, jedoch auch allgemein in der EMVU-Forschung wichtiger Aspekt ist die Frage der erzielbaren Genauigkeiten beziehungsweise das Ausmaß der (Expositions-) Unsicherheiten, mit denen man es in typischen Hochfrequenz-Befeldungssituationen zu tun hat. Das Wissen um den Unsicherheitsbereich in dem man sich bewegt, beziehungsweise die Quantifizierung seiner

Forschung

Grenzen und das Erkennen der sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Interpretation des Versuchsergebnisses, wird zu Recht oft als ein wesentliches Qualitätskriterium einer wissenschaftlichen Arbeit definiert. Weiterhin ist die Definition von Unsicherheitsgrenzen bei der Expositionserfassung in elektromagnetischen Feldern ein wichtiger Aspekt im Hinblick auf die Festlegung von Sicherheitsgrenzwerten. Auch hier lieferten die Fortschritte auf dem Gebiet der numerischen Berechnung elektromagnetischer Felder essentielle Beiträge.

Neben den aus der Funktechnik bereits lange bekannten Ausbreitungsphänomenen und den damit zusammenhängenden komplizierten räumlich und zeitlich inhomogenen Feldverteilungen und den komplexen Kopplungsmechanismen im reaktiven Nahfeld von Antennen zeigten die Berechnungen mit detaillierten anatomischen Modellen zusätzlich die biologische Varianz als einen die Gesamtunsicherheitsbilanz signifikant beeinflussenden Faktor auf.

Nimmt man, wie in alltäglichen Befeldungssituationen (unter „unkontrollierten“ Bedingungen) unvermeidlich, noch die Schwankungen der resultierenden Hochfrequenzexposition, verursacht durch mobile Quellen, Sendeleistungsregelung, sowie zeitbereichsbasierte Zugriffs- und Duplexverfahren der modernen Mobilkommunikation hinzu, so wird schnell klar, dass der Unsicherheitsbereich bei der Expositionsbestimmung (im Hinblick auf die Strahlungsabsorption im Körper) unter allgemeinen Bedingungen oftmals deutlich mehr als eine Größenordnung überstreicht.

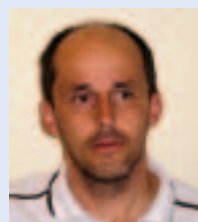
Noch dramatischer stellt sich die Situation dar, wenn man auf die gegenwärtig eigentlich als relevant angesehene Wirkungsgröße der HF-induzierten Gewebetemperaturerhöhung Bezug nimmt. Hier kommen weitere, teilweise mit großen Unsicherheiten behaftete Parameter, wie thermische Gewebeeigenschaften und vor allem die thermoregulatorische Antwort des Körpers hinzu. Unter kontrollierten Bedingungen, wie zum Beispiel biologischen/medizinischen Studien mit entsprechenden, oben erwähnten High-Tech Expositionssystemen, können diese Unsicherheiten heute zumindest in einem für eine seriöse Ergebnisinterpretation notwendigen Rahmen gehalten werden. Die Aufgabe der möglichst zuverlässigen Expositionsbestimmung mit bekannter, möglichst geringer Unsicherheit unter

unkontrollierten Bedingungen, wie in der Praxis üblich mit vielen gleichzeitig einwirkenden Quellen, stellt jedoch eine der größten Herausforderungen der gegenwärtigen EMVU-bezogenen Ingenieurwissenschaften dar.

Der Schwerpunkt der Unsicherheitsbetrachtungen hat sich also in den vergangenen zwei Jahrzehnten verlagert. Am Anfang standen die Unsicherheiten infolge der stark vereinfachten Berechnungsmodelle (wegen noch nicht verfügbarer Körpermodelle und geringer Computerressourcen) im Vordergrund. Durch die erreichten Verbesserungen auf dem Gebiet der numerischen Dosimetrie wurden einerseits die ihr eigenen methodischen Unsicherheiten immer geringer und andererseits wurden zunehmend neue, wesentlich massiver wirkende Unsicherheitsquellen deutlich gemacht.

Es besteht also nach wie vor Bedarf an ingenieurwissenschaftlicher Tätigkeit in der EMVU-Forschung. Abgesehen von der Ausweitung der bestehenden Methoden und Systeme auf neue, künftig genutzte Frequenzbereiche, erscheint das Thema einer zuverlässigen Analyse und einer auf relevanten biologischen/medizinischen Wirkungsgrößen basierenden Beurteilung komplexer (das heißt realer) Expositionsszenarien als eines der wichtigsten Gebiete der künftigen EMVU-bezogenen Ingenieurwissenschaften.

Die Einbindung der klassischen, Elektrodynamik-basierten Hochfrequenz-Dosimetrie in multiphysikalische Modelle in Verbindung mit statistischen Methoden sind dabei möglicherweise die nächsten Schritte, die Verbesserungen in der „makroskopischen“ Expositionserfassung, aber auch neue Einsichten auf dem Gebiet der Mikrodosimetrie, das heißt der Erfassung möglicher elektromagnetisch/biologischer Wechselwirkungen auf zellulärer Ebene bringen könnten.



Dipl.-Ing. Gernot Schmid ist Geschäftsfeldleiter-Stellvertreter im Geschäftsfeld „Sichere Mobilkommunikation“ der Austrian Research Centers GmbH-ARC. Sein persönlicher Arbeitsschwerpunkt liegt im Bereich der experimentellen und numerischen Dosimetrie im Hochfrequenz- und Mikrowellenbereich sowie in der Entwicklung von Expositionseinrichtungen für biologische Experimente