

Projektbeschreibungen

Abgeschlossene Projekte

Mehrskalige computergestützte elektromagnetische Modellierung und Validierung von elektrischem Strom- und Energiefluss in der Mikrostruktur von Hautgewebe bei mm Wellen-Frequenzen (MicroBioEM)

Prof. Dr. Daniel Erni/Universität Duisburg-Essen

Diese Studie umfasst ein genaues mehrskaliges elektromagnetisches (EM) Gewebemodell, welches in der zellulären Mikrostruktur ansetzt und sich in einem Bottom-up-Ansatz zu einem realistischen numerischen frequenzabhängigen makroskopischen Hautmodell entwickelt. Die so simulierten EM Felder in diesem mehrschichtigen Hautmodell können umgekehrt im Rahmen eines Top-down-Ansatzes wiederum in deren mikroskopische Skala projiziert werden, d.h. in die zelluläre Mikrostruktur der entsprechenden Hautschicht. Damit ergibt sich eine computergestützte (virtuelle) Mikrodosimetrie der Haut, die eine detaillierte Bewertung der Exposition durch EM Wellen bei 5G- bzw. bei mm-Wellen-Frequenzen in allen Grössenskalen der Haut ermöglicht. Insbesondere lässt sich hiermit erstmals auch die Frage beantworten, wo genau in der menschlichen Hautstruktur die EM Wellen vorwiegend absorbiert werden.

Abschlussbericht Seite 22



Project Descriptions

Completed Projects

Multi-Scale Computational Electromagnetic Modeling and Validation of Electrical Current and Energy Flow in the Microstructure of Skin Tissue at mm Wave Frequencies (MicroBioEM)

Prof. Dr. Daniel Erni/University of Duisburg-Essen

This study includes an accurate multi-scale electromagnetic (EM) tissue model that starts in the cellular microstructure and develops into a realistic numerical frequency-dependent macroscopic skin model in a bottom-up approach. The simulated EM fields in this multilayer skin model can in turn be projected back into the microscopic scale, i.e. into the cellular microstructure of the corresponding skin layer, using a top-down approach. This results in a computer-aided (virtual) microdosimetry of the skin, which enables a detailed assessment of exposure to EM waves at 5G or mm-wave frequencies at all size scales of the skin. In particular, for the first time it is possible to answer the question of where exactly in the human skin structure the EM waves are predominantly absorbed.

Final report page 22

Minigehirne aus dem Labor – Wirkungen von HF-EMF (5G) auf die Gehirnentwicklung und Neurodegeneration

Prof. Dr. Meike Mevissen, Dr. Angélique Ducray/Universität Bern,
Dr. Myles Capstick/IT'IS Foundation, Schweiz

Das Projekt zielt darauf ab, das Verständnis der Auswirkungen von modulierter Hochfrequenzstrahlung vom Typ 5G NR FR1 (<6 GHz) auf die neuronale Entwicklung und neurodegenerative Krankheiten zu verbessern. Verschiedene Studien von Mini-Gehirnen, sogenannte Gehirn-Organoide, die einen grossen Teil der Komplexität des menschlichen Gehirns abbilden, werden verwendet. Neben dem neuronalen Phänotyp sowie dem Reifestadium der Nervenzellen werden Biomarker von Signalwegen analysiert, die an der neuronalen Differenzierung und Degeneration beteiligt sind.

Abschlussbericht Seite 26



Brain in a Dish – Effects of RF-EMF (5G) on Brain Development and Neurodegeneration

Prof. Dr. Meike Mevissen, Dr. Angélique Ducray/University of Bern,
Dr. Myles Capstick/IT'IS Foundation, Switzerland

The project aims to improve the understanding of the impact of 5G NR FR1 (<6 GHz) RF-EMF exposure on neuronal development and neurodegenerations. Different stages of brain organoids/mini brains, in a model system that captures most of the complexity of the human brain, are used to identify molecular biomarkers to characterize the neuronal phenotype, its maturity, and involved signaling pathways that play a role in neuronal differentiation and degeneration.

Final report page 26

Projektbeschreibungen

Project Descriptions

Mehrskalige computergestützte elektromagnetische Modellierung und Validierung von elektrischem Strom- und Energiefloss in der Mikrostruktur von Hautgewebe bei mm Wellen-Frequenzen (MicroBioEM)

Wo in der menschlichen Haut wird die elektromagnetische Welle absorbiert?

Die Absorption der elektromagnetischen (EM) Wellen findet in und unter der Hautoberfläche statt. Die damit verbundenen Eindringtiefen der EM Felder nehmen mit zunehmender Frequenz rasch ab und liegen z. B. beim höheren Frequenzband des 5G-Standards (NR/FR2: 25,25–71 GHz) im Bereich von 1,10 mm bis 0,42 mm. Damit stellt sich die Frage, ob das nun als positiv zu bewerten ist, wenn das EM Feld kaum noch in die Haut eindringt und die tieferen Hautschichten somit unbelastet bleiben? Umgekehrt betrachtet findet die Absorption nur noch in einer dünnen Hautschicht und somit in einem sehr kleinen Gewebevolumen statt, woraus eigentlich eine signifikante, sehr lokale Belastung der Haut resultieren könnte. Und gerade hier setzt unsere Studie an.

Das menschliche Hautsystem gehört wegen ihres inhomogenen Schichtaufbaus und den damit verknüpften randomisierten Gewebemikrostrukturen, aus rein technischer Sicht betrachtet, sicher zu den komplexesten «Materialsystemen». Von aussen nach innen betrachtet, findet sich zuerst das Stratum corneum (SC), eine dünne Hornzellenschicht (Schichtdicke: 15–20 µm), die als tote Version der nachfolgenden, 150–250 µm dicken Epidermis (E) fungiert. Letztere besteht aus Keratinozyten, welche in der vitalen Basallzellenschicht an der Grenze zur darunterliegenden Dermis (D) erzeugt werden und innerhalb von 30 bis 50 Tagen, unter Änderung ihrer Gestalt und Zusammensetzung (z.B. abnehmender Wassergehalt), in Richtung SC nach aussen wandern. Die Dermis (1,5–5,5 mm) enthält die versorgenden Blutgefäße, Schweißdrüsen sowie Haarwurzeln und grenzt an die Hypodermis (HYP), die das wenige mm dicke Fettgewebe repräsentiert und sich wiederum an das darunterliegende Muskelgewebe (MUSC) anschliesst. Für unsere Studie stand die Epidermis im Zentrum unseres Interesses, was sich zwar mit der geringen Eindringtiefe des EM Feldes gut begründen lässt; viel wichtiger ist hier jedoch die mikrodosimetrische Analyse der EM Energieeinträge in die vitale Basallzellenschicht.

Antragsteller	Prof. Dr. Daniel Erni
Institution	Universität Duisburg-Essen, Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik (ATE)
Laufzeit	1.1.2021 – 31.12.2023
Kontakt	daniel.erni@uni-due.de
Status	abgeschlossen

Multi-Scale Computational Electromagnetic Modeling and Validation of Electrical Current and Energy Flow in the Microstructure of Skin Tissue at mm Wave Frequencies (MicroBioEM)

Where in the Human Skin is the Electromagnetic Wave Absorbed?

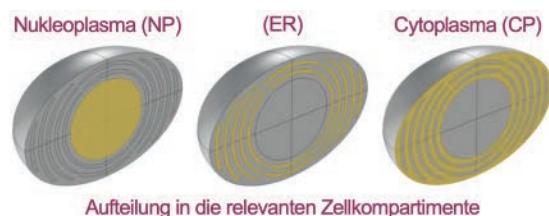
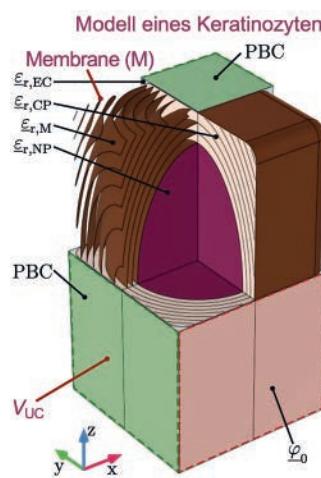
The absorption of electromagnetic (EM) waves takes place in respective under the surface of the skin. The associated penetration depths of the EM field decrease rapidly with increasing frequency and are, for example, in the range of 1.10–0.42 mm for the higher frequency band of the 5G standard (NR/FR2: 25.25–71 GHz). This raises the question of whether this should be seen as positive if the EM field barely penetrates the skin leaving the deeper layers of the skin virtually unaffected? Conversely, absorption only takes place in the outmost thin layer of skin and therefore in a very small volume of tissue, which could actually result in significant, very localized EM exposure of the skin. And this is precisely where our study comes in.

From a purely technical point of view, the human skin system is certainly one of the most complex “material systems” due to its inhomogeneous layered structure and the randomized tissue microstructures associated with it. Viewed from the outside in, the stratum corneum (SC), a horny cell layer (layer thickness: 15–20 µm), acts as a dead version of the subsequent epidermis (E), which is 150–250 µm thick. The latter consists of keratinocytes, which are generated in the vital basal cell layer at the lower boundary to the subsequent dermis (D) and migrate outwards towards the SC within 30–50 days, changing their shape and composition (e.g. decreasing water content). The dermis (1.5–5.5 mm) contains the supplying blood vessels, sweat glands and hair roots and borders on the hypodermis (HYP), which represents the few mm thick adipose tissue and in turn connects to the underlying muscle tissue. For our study, the epidermis was the focus of our interest, which can be well justified by the low penetration depth of the EM field; however, the microdosimetric analysis of the EM energy uptake into the vital basal cell layer is much more important here.

Unser numerischer Modellierungsansatz für die virtuelle Mikrodosimetrie beruht auf einer quasi-statischen EM Feldsimulation der zellulären Gewebemikrostruktur, namentlich der einzelnen Zelle mit ihren wesentlichen Substrukturen (d.h. ihren volumenanteiligen Zellkompartimenten) wie z.B. der Zellkern, das endoplasmatische Retikulum (ER), die meisten Organellen umhüllenden, wenige Nanometer dicken Zellmembranen (M), sowie das Nukleoplasma (NP) und das Zytosplasma (CP). Im Falle der Epidermis umfasst die Simulationszelle z.B. die Zellstruktur des Keratinozyten und berücksichtigt anhand der Volumenverhältnisse der Simulations- und der Hautzelle die typische Packungsdichte der Keratinozyten in der entsprechenden Gewebebeschicht. Eine wesentliche Errungenschaft der Studie besteht in der histochemischen Parametrierung der Gestalt und Beschaffenheit zum einen von Keratinozyten in der Epidermis während ihrer Migration an die Hautoberfläche und zum anderen der Korneozyten in der äussersten Hornzellenschicht (SC). Aus der quasi-statischen Analyse der Simulationszelle können nun frequenzabhängige gemittelte effektive Permittivitäten (d.h. die dielektrischen Funktionen) der Gewebemikrostruktur ermittelt werden [1]. Damit gelingt mit dieser Studie erstmals eine hochpräzise EM Modellierung der beiden äussersten Hautschichten.

Our numerical modeling approach for a virtual microdosimetry is based on a quasi-static EM field simulation of the cellular tissue micro-structure, namely the single cell with its essential substructures (i.e. its volume fractional cell compartments) such as the nucleus (N), the endoplasmic reticulum (ER), the cell membranes (M) enveloping most of the organelles, which are only a few nanometers thin, as well as the nucleoplasm (NP) and the cytoplasm (CP). In the case of the epidermis, for example, the simulation cell comprises the cell structure of the keratinocyte and considers the typical packing density of the keratinocytes in the corresponding tissue layer based on the volume ratios of the simulation cell and the proper skin cell. A major achievement of the study is the histochemical parameterization of the shape and composition of keratinocytes in the epidermis during their migration to the skin surface and of corneocytes in the outermost corneocyte layer (SC). From the quasi-static EM analysis of the simulation cell, frequency-dependent averaged effective permittivities (i.e. the dielectric functions) of the tissue micro-structure can now be determined [1]. For the first time, this study enables high-precision modeling of the two outermost skin layers.

Abbildung 1: Modellierung der Energieeinträge in einen Keratinozyten aus der Basallzellenschicht der Epidermis: (links) vereinfachtes Zellenmodell mit den wesentlichen Organellen umfasst von der quaderförmigen Simulationszelle mit der Spannungsanregung (V_{UC}) den entsprechenden periodischen Randbedingungen (PBC); (rechts) Unterscheidung der resultierenden Zellkompartimente sowie die Verlustleistungsbilanz in dieser Zellstruktur [1,2].



Verlustleistungsbilanz im Zellenvolumen: (bei 3.5 GHz)

Größen	(EC)	(CP)	(NP)	(M)
V_i/V_{UC}	3.27 %	68.26 %	25.47 %	3 %
P_i/P_{tot}	2.95 %	48.75 %	3.28 %	45.02 %
$\mu SAR_i/\mu SAR_{tot}$	2.48 %	36.38 %	2.63 %	58.51 %

- Im Cytosplasma wird am meisten Leistung absorbiert
- μSAR ist in den Membranen am größten (Zelle 6.46 W/Kg)

Figure 1: Modeling the energy uptake of a keratinocyte from the basal cell layer of the epidermis: (left) simplified cell model with the essential organelles enclosed by the cuboidal simulation cell with the voltage excitation (V_{UC}) and the corresponding periodic boundary conditions (PBC); (right) differentiation of the resulting cell compartments and the associated power loss balance in this cell structure [1,2].

Mit dem resultierenden makroskopischen Schichtmodell der Haut wurden im Folgenden zahlreiche EM Expositionsszenarien bei gegebener Bestrahlung der Hautoberfläche durchgerechnet, aus denen sich sowohl Eindringtiefen als auch die absorbierten Leistungen und die daraus resultierenden Werte der spezifischen Absorptionsraten (SAR) in den einzelnen Hautschichten bestimmen liessen. Die Pointe der Studie liegt jedoch darin, dass man diese makroskopischen Felder als Anregungsgrößen wiederum direkt in die entsprechende quasi-statische Analyse der zellulären Mikrostruktur (z.B. der Epidermis) einspeisen konnte [1,2]. Für die Keratinozyten in der vitalen Basalzellenschicht zeigte sich so, dass rund 49 % der EM Leistung im Zytosol (CP) absorbiert wird, das einen Volumenanteil von 68 % aufweist. Überraschenderweise werden jedoch 45 % der Leistung in den Membranen (M) absorbiert, die mit einem Volumenanteil von nur 3 % vor allem aus Oberfläche bestehen und mit 58,5 % sogar den höchsten relativen Wert der lokalen spezifischen Absorptionsraten (μ SAR) in diesem hochgradig mikroskopischen Setting besitzt (siehe Abbildung 1). Im unteren Band des 5G-Frequenzbereichs (NR/FR1) z.B. bei 3,5 GHz führt dieses stark inhomogene Absorptionsverhalten in der Basalzellenschicht zu einer strukturbedingten, relativen Streuung der μ SAR von 58 %, was ein interessantes Ergebnis der Studie darstellt.

The resulting macroscopic layer model of the skin was then used to calculate numerous EM exposure scenarios for a given irradiation of the skin surface, from which both penetration depths and the absorbed power together with the resulting values of the specific absorption rates (SAR) in the individual skin layers could be determined. The point of the study, however, is that these macroscopic fields could in turn be fed back directly into the corresponding quasi-static analysis of the cellular microstructure (e.g. the epidermis) as excitation variables [1,2]. For the keratinocytes in the vital basal cell layer, this showed that around 49 % of the EM power is absorbed in the cytoplasm (CP), which has a volume fraction of 68 %. Surprisingly, however, 45 % of the power is absorbed in the membranes (M), which consist mainly of surface with a volume fraction of only 3 % and with 58.5 % even has the highest relative value of the local specific absorption rates (μ SAR) in this highly microscopic setting (see Figure 1). In the lower band of the 5G frequency range (NR/FR1), e.g. at 3.5 GHz, this highly inhomogeneous absorption behavior in the basal cell layer leads to a structure-related relative variation of the μ SAR of 58 %, which is an interesting result of the study.

Abbildung 2:
Charakterisierung von künstlichem menschlichem Gewebe: (links) künstliche Hautproben von Syndaver Labs, die als 20×20 cm grosse Pflaster geliefert werden; (rechts) der SWISS-to12-Charakterisierungsaufbau mit einer Testprobe unter Verwendung des für das D-Band spezifizierten MCK-Kits zusammen mit einem Netzwerkanalysator (VNA) und den entsprechenden Frequenz-Extendern [3].

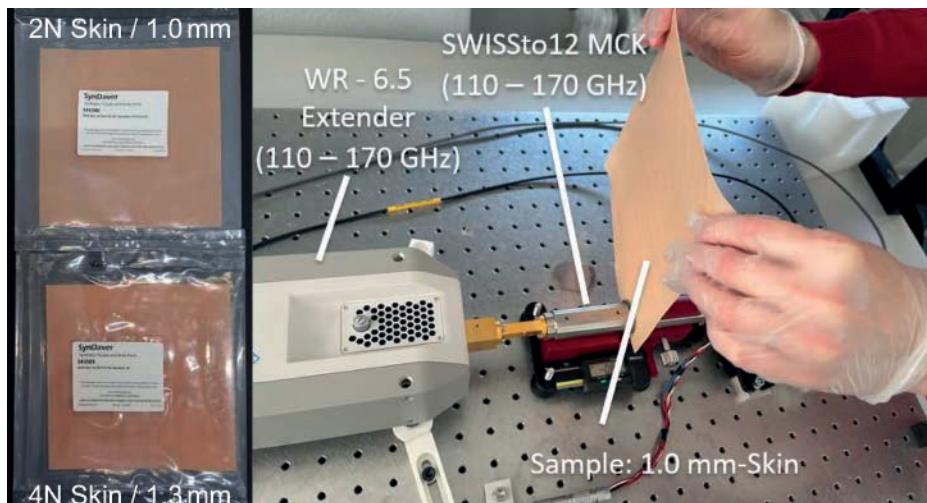


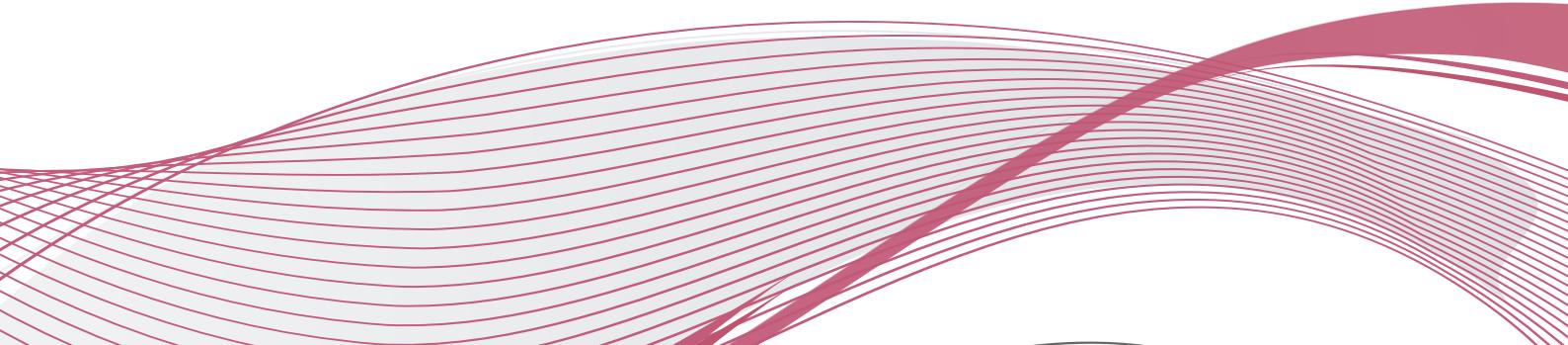
Figure 2: Characterization of artificial human tissue: (left) artificial skin samples from Syndaver Labs delivered as 20×20 cm patches; (right) the SWISS-to12 characterization setup with a test sample using the particular MCK kit specified for the D band together with a vector network analyzer (VNA) and the corresponding frequency extenders [3].



FSM | Forschungsstiftung
Strom und Mobilkommunikation
FSM | Swiss Research Foundation for
Electricity and Mobile Communication

Jahresbericht 2023

Annual Report 2023



IMPRINT
Publisher

Editors
Translation
Design and Layout
Printing
Picture credits

FSM | Swiss Research Foundation for Electricity and Mobile Communication
c/o ETH Zurich, IEF, 8092 Zurich
Jürg Eberhard, Roswitha Coccia
www.DeepL.com/Translator (free version)
Heidi Egger, Printoset, Zurich
Printoset, Zurich
Page 1 (front page), page 11, 15, 19: Adobe Stock
Page 14: FSM



FSM | Forschungsstiftung
Strom und Mobilkommunikation
FSM | Swiss Research Foundation for
Electricity and Mobile Communication

FSM | Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation
c/o ETH Zürich
Institut für Elektromagnetische Felder (ETZ K89)
Gloriastrasse 35
CH-8092 Zürich

*FSM | Swiss Research Foundation for Electricity and Mobile Communication
c/o ETH Zurich
Institute of Electromagnetic Fields (ETZ K89)
Gloriastrasse 35
CH-8092 Zurich*

+41 44 632 59 78
info@emf.ethz.ch
www.emf.ethz.ch

