

Science Brunch Nr. 36
23. November 2023 / Haus zum Rüden / Zürich

Wo werden mm-Wellen im Gewebe absorbiert? Forschungsansätze für eine virtuelle Mikrodosimetrie der Haut

**Daniel Erni, Kevin Jerbic, Mandana Jalali,
Jan Taro Svejda und Jürg Fröhlich⁽¹⁾**

Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik (ATE),
Abteilung für Elektrotechnik und Informationstechnik,
Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Universität Duisburg-Essen,
D-4748 Duisburg, Deutschland.

www.ate.uni-due.de

⁽¹⁾ Visiting Scientist, *Fields at Work GmbH*,
CH-8006 Zurich, Schweiz.



UNIVERSITÄT
**DUISBURG
ESSEN**

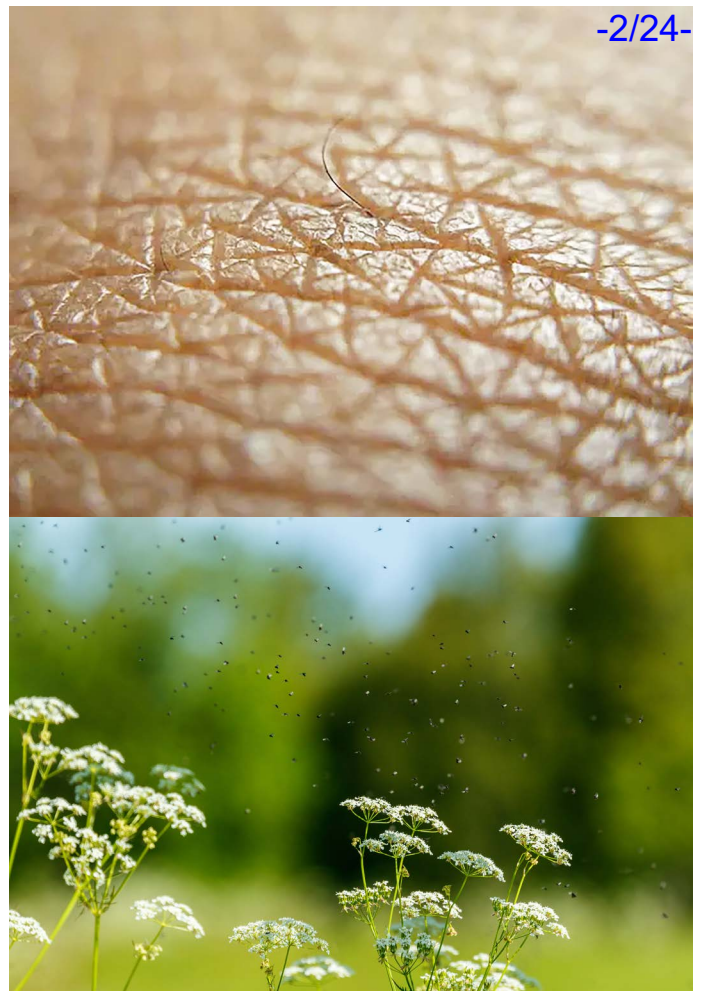
Agenda

- Haut und Hautmodelle
- Einige Fragen zum Einstieg
- Mikrodosimetrie der Haut
- Beispiel einer Messkampagne
- Geschlechtsspezifische Absorption
- Exposition von Insekten
- Zusammenfassung

Wir verdanken die Förderung dieser Forschung durch:



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



Hautmodell III

S. Doğusan, M. Jalali, J. T. Svejda, D. Erni, "Gender-specific electromagnetic power absorption in human skin tissue at 5G/6G frequencies," *GeMIC 2024*, (submitted).

Eindringtiefe (Simulation)

(1) 5G-Frequenzbänder:

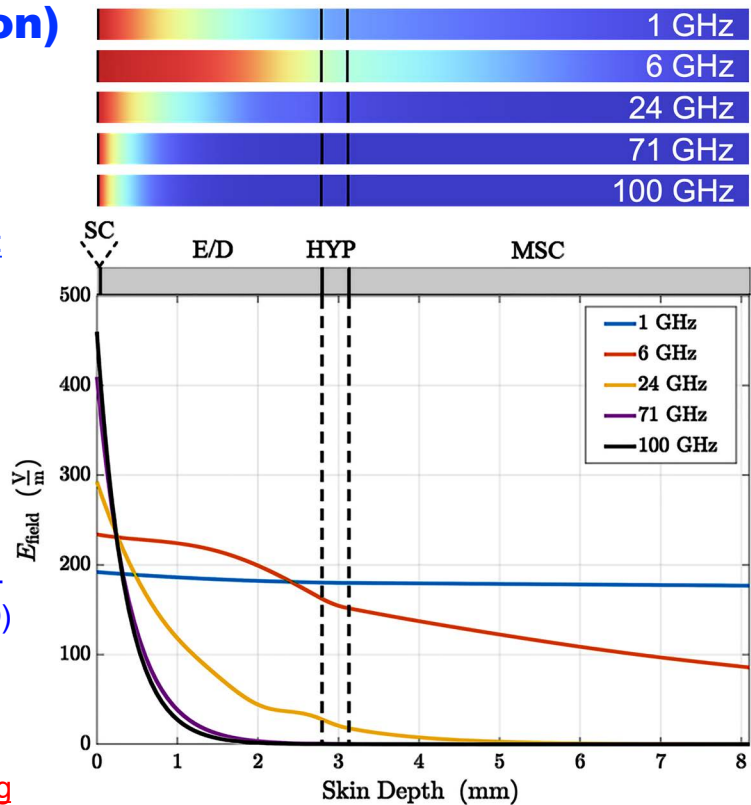
- 5G NR / FR1: ≤ 7.125 GHz
- 5G NR / FR2: 24.25-71 GHz

(2) Eindringtiefe des elektrischen Feldes:
(Haut am Handrücken, männlich):

- $\gg 8$ mm @ 1 GHz ($S_{inc} = 1$ W/m²)
- 7.61 mm @ 6 GHz
- 1.10 mm @ 24 GHz
- 0.42 mm @ 71 GHz
- 0.35 mm @ 100 GHz

(3) Fragestellungen:

- 5G NR / FR2 (24.25-71 GHz): Die Eindringtiefe nimmt dramatisch ab (nur E/D)
- Ist das positiv, wenn das Feld kaum noch in die Haut eindringt?
- Absorption findet in extrem kleinen Volumen statt \Rightarrow signifikante Belastung



Einige Fragen zum Einstieg

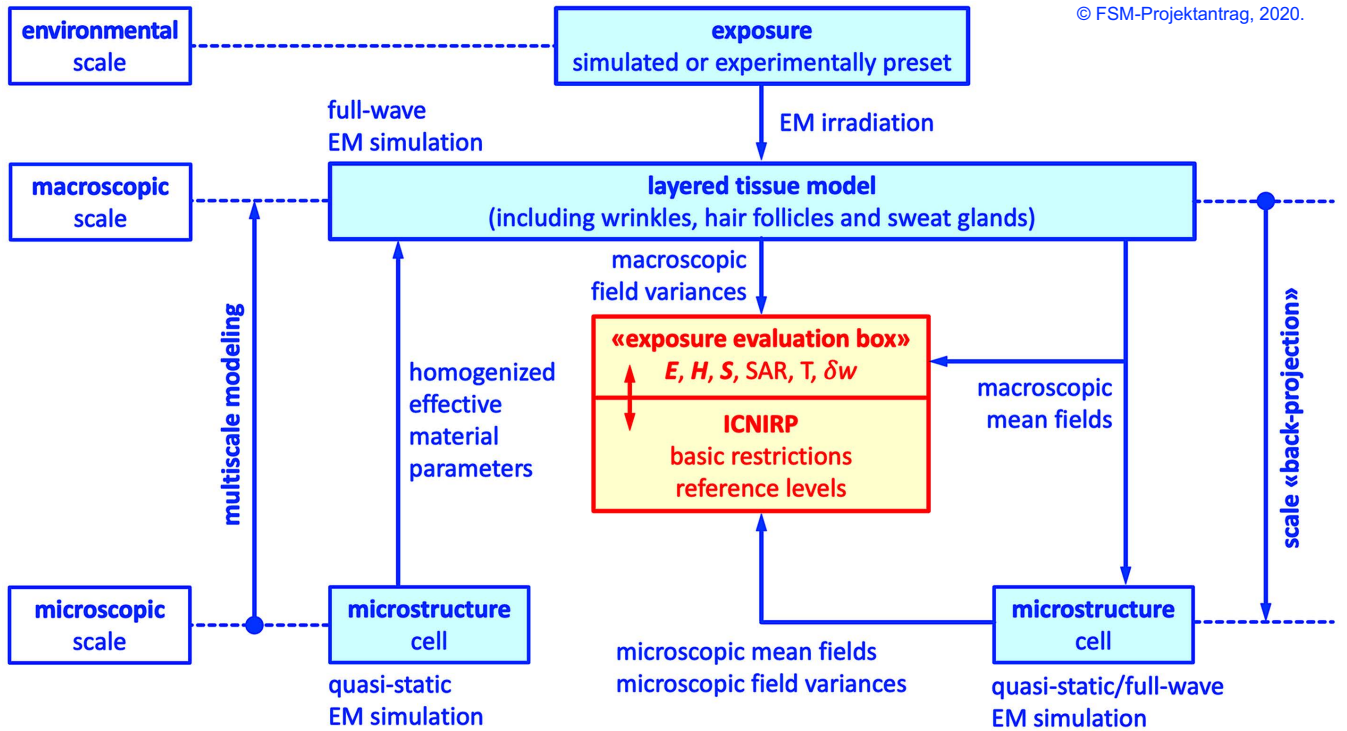
Erstes Fazit

- 5G-Frequenzen – Geringe Eindringtiefen, kleine Absorptionsvolumen:
 \Rightarrow Wo genau wird die eingestrahlte Leistung absorbiert?
- Fazit:
 \Rightarrow Es braucht eine Mikrodosimetrie, die in der Zellskala ansetzt.
- Offene Forschungsfrage:
 \Rightarrow Mikrodosimetrie: Wir untersuchen stark variierenden EM Felder innerhalb der einzelnen Zellen der Haut.
 \Rightarrow Führt das zu einer zusätzlichen, strukturbedingten Streuung der spezifischen Absorptionsrate (SAR), die ein typisches Maß für die elektromagnetische Exposition darstellt?

Mikrodosimetrie der Haut I

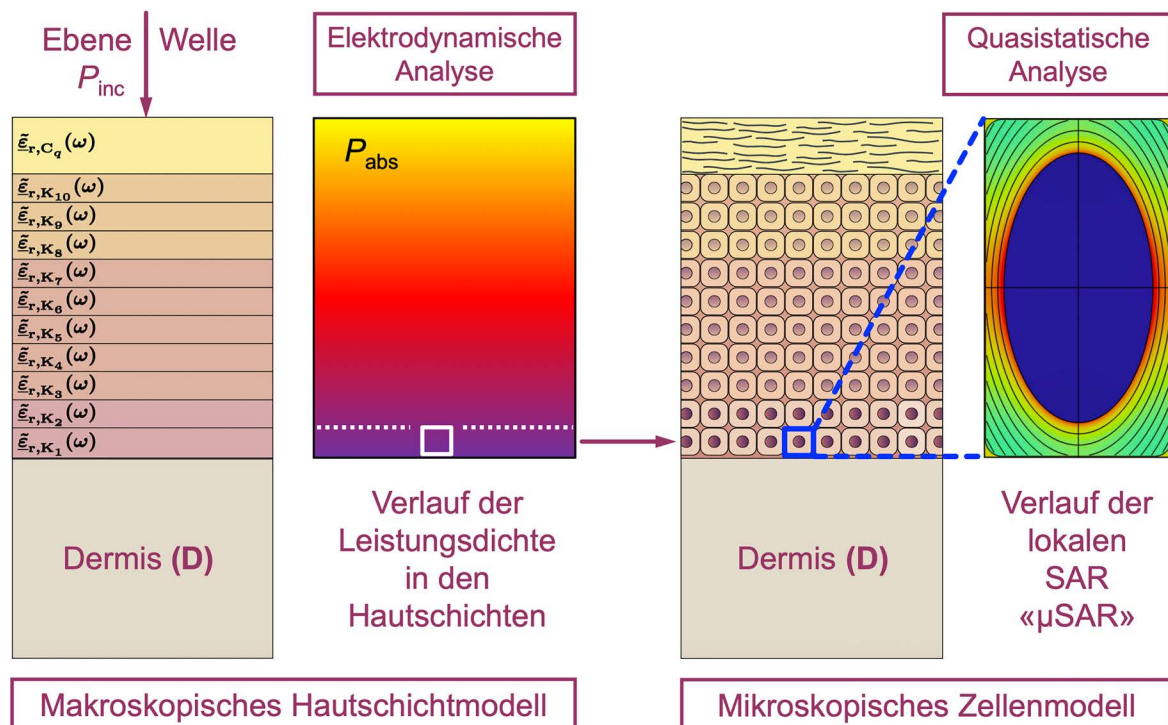
Wie lässt sich die mikroskopische Skala erschliessen?

© FSM-Projektantrag, 2020.



Mikrodosimetrie der Haut II

Wie lässt sich die mikroskopische Skala erschliessen?

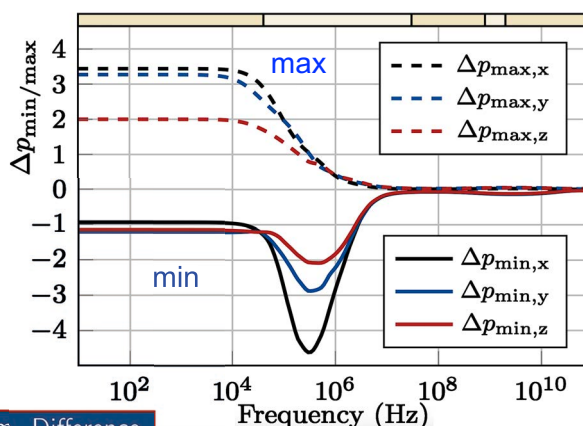
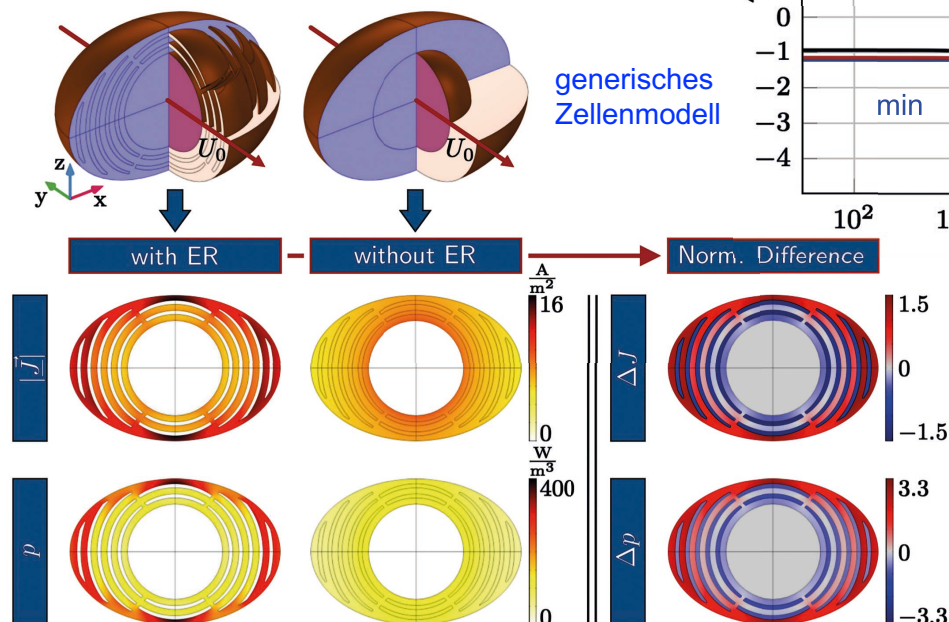


Mikrodosimetrie der Haut III

Kleinste Skala – Zellenmodell

(1) Einfluss der Organellen (i.e. ER):

– Simulation der Zelle im quasistatischen E-Feld



(2) Allgemeines Fazit:

- $\Delta X = (X_{ER} - X_{woER}) / (X_{ER})$
- Verteilte Struktur (ER):
 - vergrößert P_{abs}
 - schirmt Zellkern ab

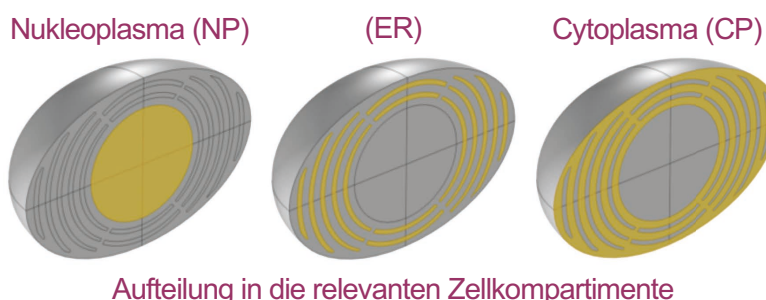
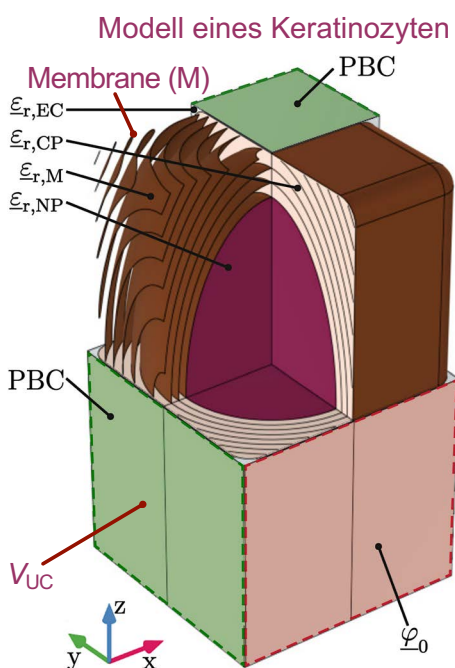
K. Jerbic, J. T. Svejda, B. Sievert, A. Rennings, J. Fröhlich, and D. Emi, "The importance of subcellular structures to the modeling of biological cells in the context of computational bioelectromagnetics simulations," *Bioelectromagnetics*, 44(1-2), 26, 2023.

Mikrodosimetrie der Haut IV

Kleinste Skala – Zellenmodell

Kevin Jerbic, *Computational multiscale models for microdosimetric investigations of skin tissues under electromagnetic exposure*. Dissertation University of Duisburg-Essen, Duisburg, 2024.

(3) Wo genau wird die Leistung in der Zelle absorbiert?



(4) 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 %

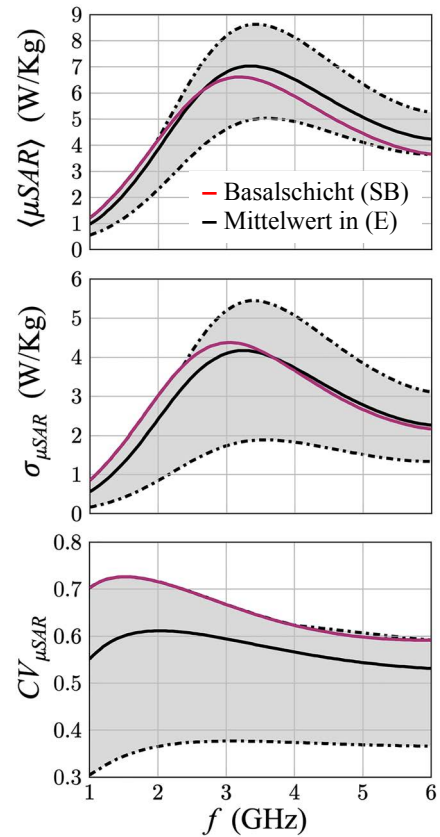
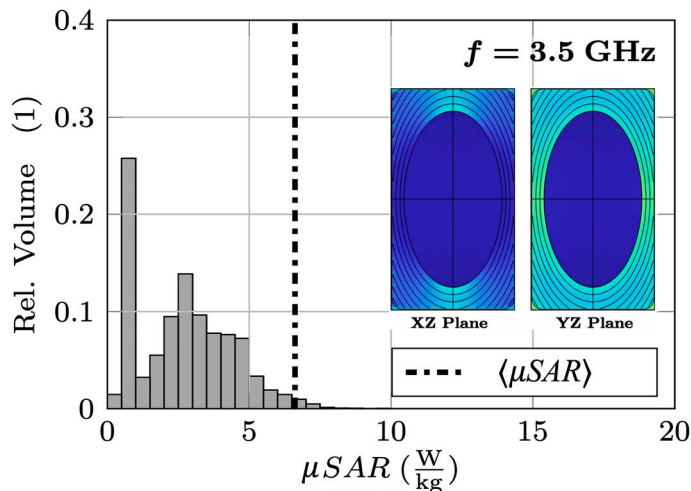
- Im Cytoplasma wird am meisten Leistung absorbiert
- μSAR ist in den Membranen am größten (Zelle 6.46W/Kg)

Mikrodosimetrie der Haut V

Kleinste Skala – Zellenmodell

(5) Statistik der μSAR -Verteilung in den Keratinocyten:

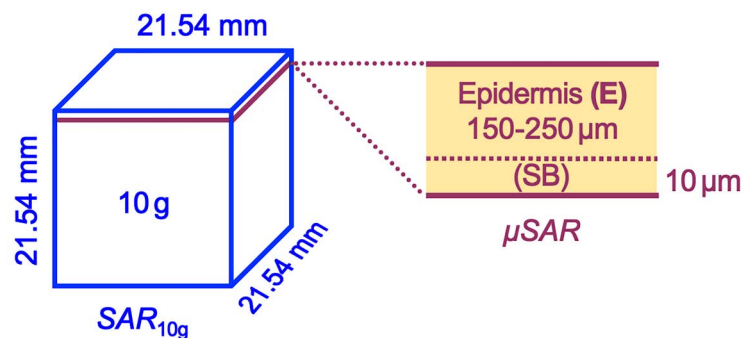
- Histogramm der μSAR im Volumen einer Basalzelle im (SB), jedoch ohne Membrananteile (cf. Offset $\langle \mu SAR \rangle$).
- Maximum der $\langle \mu SAR \rangle \Leftrightarrow$ Minimum der Leistungsreflexion.
- $CV_{\mu SAR}$: Die μSAR streut in (E) bei 3.5GHz im Mittel um 58%!



Mikrodosimetrie der Haut VI

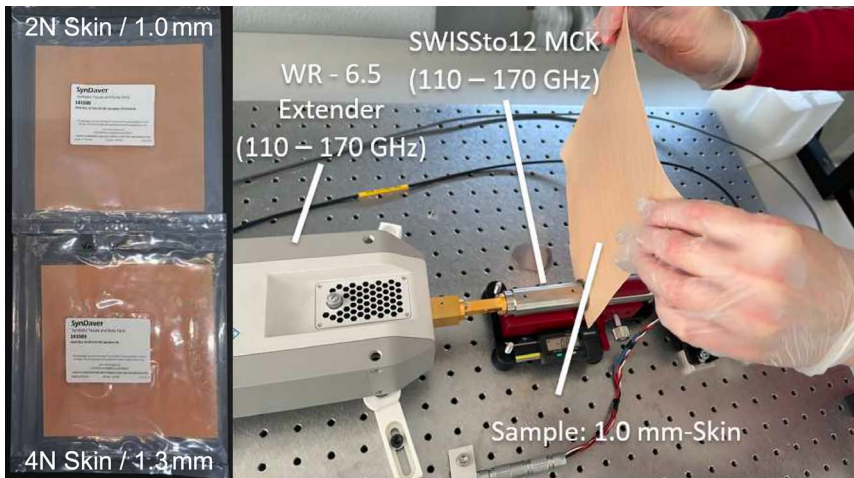
Zweites Fazit

- In der Basalzellschicht (SB) und insgesamt auch in der Epidermis (E) streuen die lokalen μSAR -Werte in der mikroskopischen Skala erheblich.
- Achtung: Die μSAR kann aus Prinzip nicht mit den durch die ICNIRP empfohlenen (lokalen) SAR_{10g} -Basisgrenzwerte von 2 W/kg (am Kopf, Torso) bzw. 4 W/kg (an den Extremitäten) verglichen werden:



Messkampagne mit Hautproben I

Messproben aus künstlicher Haut



(1) Hautphantome:

- **SynDaver™:**
 - 3D gedruckt (?), pflanzlich
 - 20 cm x 20 cm
 - kaukasisch
 - anatomisch & physikalisch inspiriert (el., mech., temp.)
 - ein- und mehrschichtig
 - äquivalent zum Vorderarm
- **Hautproben:**
 - 2N: 1.0 mm / 4N: 1.3 mm

$$T_P[\text{dB}] = S_{21}[\text{dB}] \Big|_{\text{Luftspalt}} - S_{21}[\text{dB}] \Big|_{\text{Haut}}$$

(schwarze Kurve) (rosa Kurve)

(2) Penetration loss T_P (Eindringverluste):

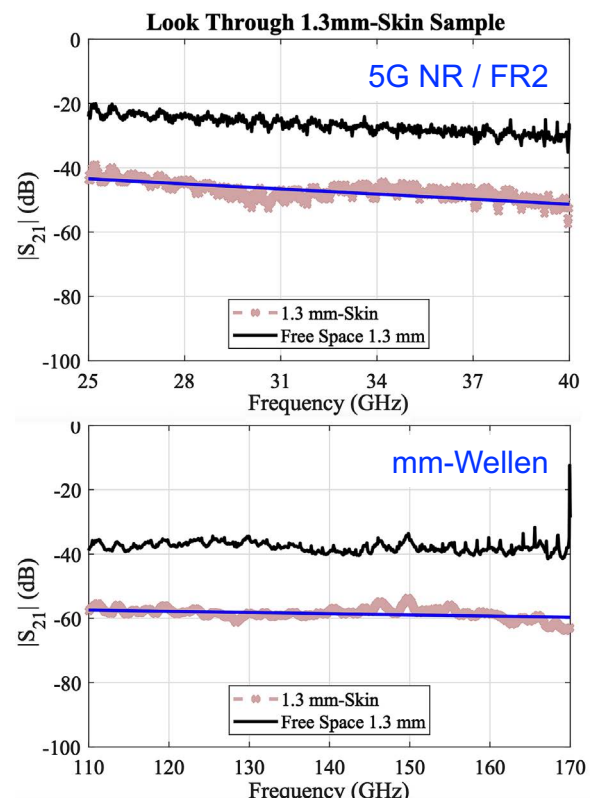
- **Nettoverlustleistungsfaktor T_P** in der künstlichen Hautschicht (Hautsample).
- **Messung des Transmissionsfaktors S_{21}** im gesamten Messaufbau (SWISSto12).

A. Prokscha, F. Sheikh, M. Jalali, Y. Zantah, B. Sievert, M. Al-Hasan, D. Erni, and T. Kaiser, "A look through artificial human tissues at Ka-band and D-band," *IWMTS 2023*, 2023.

Messkampagne mit Hautproben II

Eindringverluste

Sample	Frequenz (GHz)	T_p (dB)
Skin 2N (1.0 mm)	25	17.42
	32.5	18.09
	40	19.21
	110	16.85
	140	13.13
	170	13.78
Skin 4N (1.3 mm)	25	19.41
	32.5	20.37
	40	20.98
	110	18.74
	140	19.32
	170	21.87

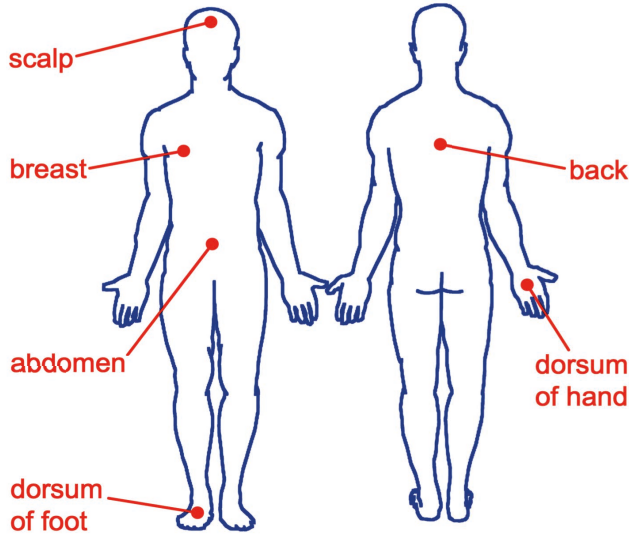


- **D-Band:** Dünne Schicht \Rightarrow Verluste nehmen ab?

Geschlechtsspezifische Absorption I

Erste Simulationsstudie

S. Doğusan, M. Jalali, J. T. Svejda, D. Erni, "Gender-specific electromagnetic power absorption in human skin tissue at 5G/6G frequencies," *GeMIC 2024*, (submitted).



- Türkische Studie zu Schichtdicken der Haut.
- Geschlechtsspezifisch aufgeschlüsselt.
- 180 Hautproben: 90 (weiblich), 90 (männlich)
- Hautschichten: SC, E+D, HYP, MUSC

- Anwendung des entwickelten Hautmodells im Frequenzbereich von 1–100 GHz (5G, 6G).
- Simulation der absorbierten Leistung (W/m) in der jeweiligen Hautschicht der Studie.

Original Article

Measurement of Epidermis, Dermis, and Total Skin Thicknesses from Six Different Body Regions with a new Ethical Histometric Technique

Pembe Öltüke, Bilsevin Ince¹, Naila Kokbudak², Sidika Fındık, Fahriye Kilinc
 Departments of Pathology and ¹Plastic and Reconstructive and Aesthetic Surgery, Meram Faculty of Medicine, Necmettin Erbakan University, ²Department of Pathology, Numune State Hospital, Konya, Turkey

Abstract

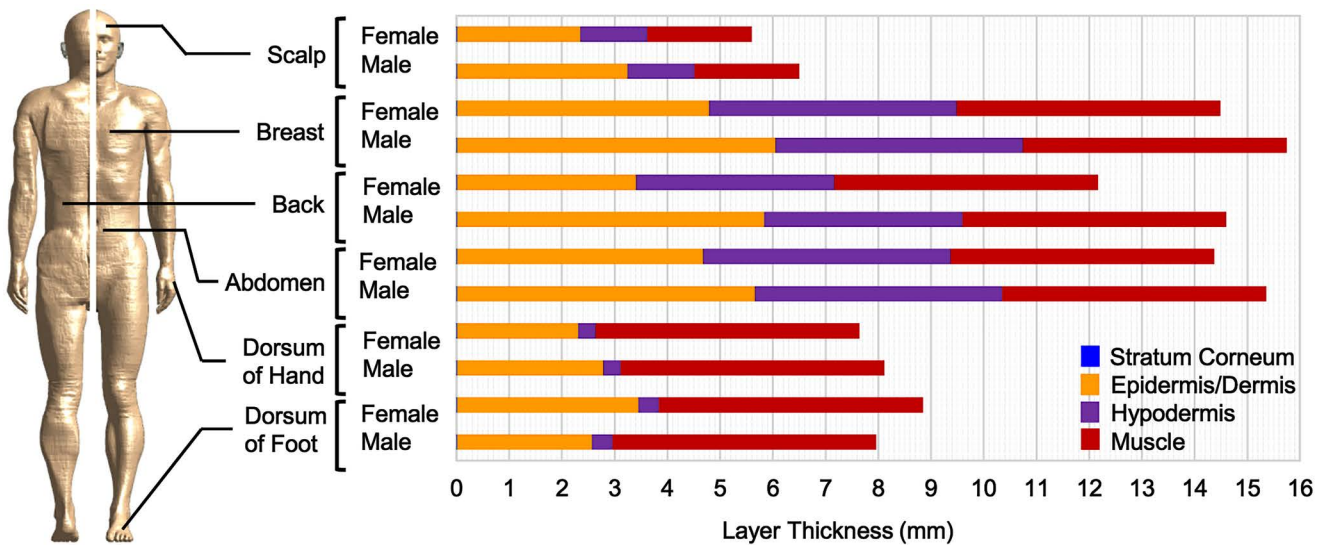
Introduction: Although it is important to know the normal values of dermis, epidermis, or total skin thicknesses (ST) for some drugs and vaccine research, skin-related clinical investigations, and skin transfer operations used in plastic surgery, it would not be ethical to take new biopsies from healthy volunteers to measure their ST. This study aims to describe a new ethical histometric technique for the measurement of skin layers and to determine the mean ST of some major body regions in the people living in our region. **Materials and Methods:** A total of 180 skin samples from six major body regions of 90 males and 90 females were enrolled in the study. The measurements were performed histometrically from appropriate skin samples obtained from the pathology archive. The samples were classified according to the six different parts of the body (scalp, abdomen, back, dorsum of foot, dorsum of hand, and the breast). **Results:** The mean epidermal thickness ranged from 76.9 ± 26.2 to 267.4 ± 120.6 µm. The thickest epidermis was found in the dorsum of foot in women (267.4 ± 120.6 µm) while the thinnest was found in the breast in men (5888 ± 2422.3 µm). The mean dermal thickness ranged from 2115 ± 946.4 to 5888 ± 2422.3 µm. The thickest dermis was found in the breast in men (5888 ± 2422.3 µm), while the thinnest dermis was found in the dorsum of hand in women (2115 ± 946.4 µm). **Conclusions:** Human ST varies according to ethnic origin. It was determined that the dermis and epidermis of Anatolian people are thicker than that of the previously reported other ethnic groups. The skin pathology archive can be used to create maps of the body's skin structure.

Keywords: Dermis, epidermis, histometric, skin thickness

Turkish Journal of Plastic Surgery, vol. 26, no. 2, p. 56-61, 2018.

Geschlechtsspezifische Absorption II

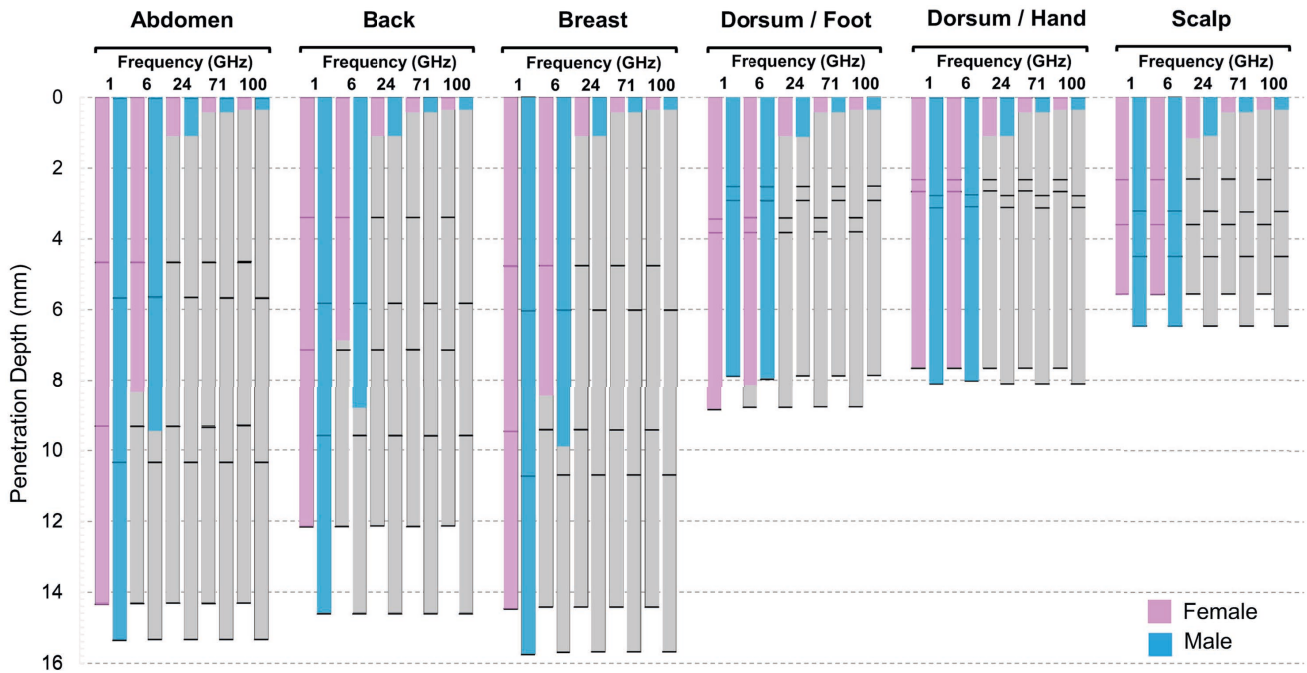
Grosse Variation der Hautschichtdicken



- Variationen sind stark positions- und geschlechtsspezifisch.

Geschlechtsspezifische Absorption III

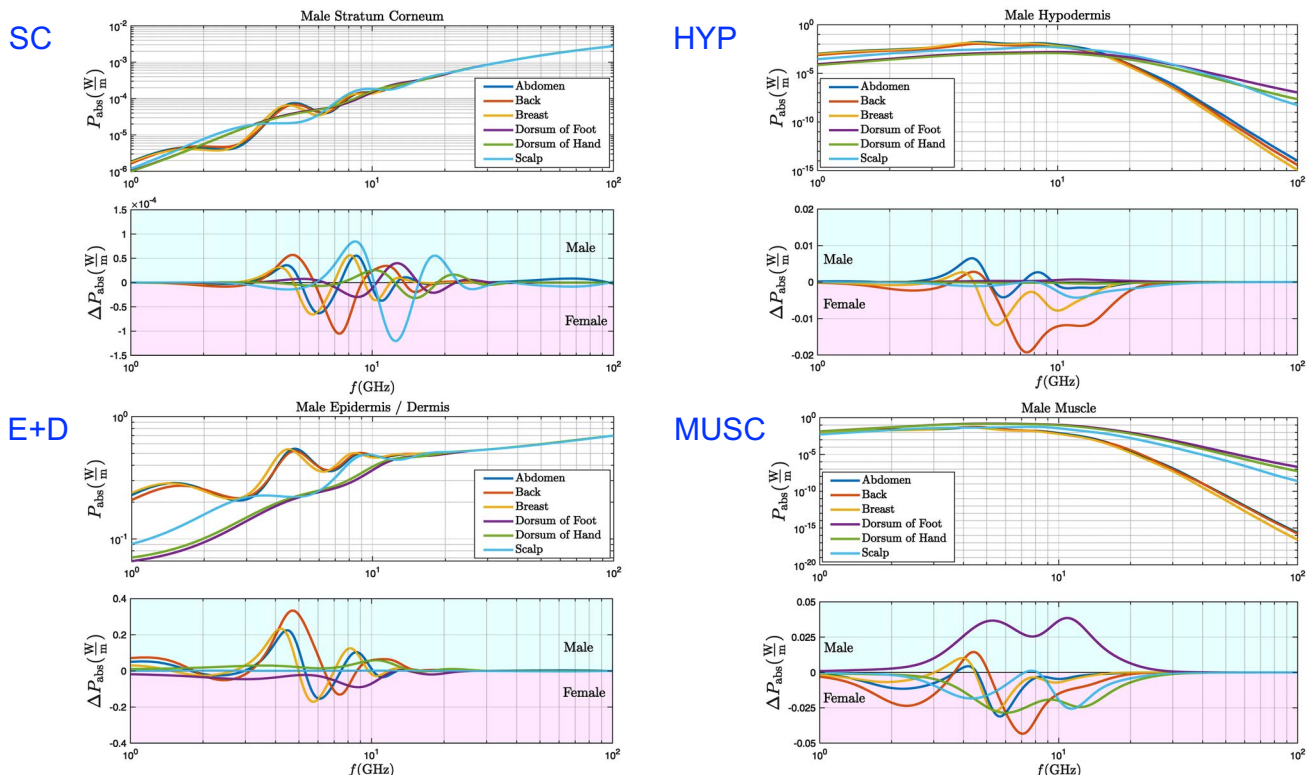
Eindringtiefen



Geschlechtsspezifische Absorption IV

Leistungsabsorption

S. Dođusan, M. Jalali, J. T. Svejda, D. Erni, "Gender-specific electromagnetic power absorption in human skin tissue at 5G/6G frequencies," *GeMIC 2024*, (submitted).



Geschlechtsspezifische Absorption V

Diskussion und Fazit

S. Doğusan, M. Jalali, J. T. Svejda, D. Erni, "Gender-specific electromagnetic power absorption in human skin tissue at 5G/6G frequencies," *GeMIC 2024*, (submitted).

(1) Eine erste Interpretation der Ergebnisse:

- Wesentliche geschlechterspezifische Unterschiede treten zwischen 3-25 GHz auf.
- SC: Die äußerste Hautschicht weist die geringste sowie geschlechterunspezifischste Absorption auf ($\Rightarrow 15 \mu\text{m}$).
- E+D: Die männlichen Proben absorbieren im Mittel mehr Strahlungsleistung.
- HYP: Die weiblichen Proben absorbieren im Mittel mehr Strahlungsleistung.
- MUSC: Die weiblichen Proben absorbieren im Mittel mehr Strahlungsleistung (wesentliche Ausnahme: male dorsum of foot, male E+D ist dort 26 % dünner).

(2) Fazit:

- 5G NR / FR1: **betroffen** ($\leq 7.125 \text{ GHz}$)
- 5G NR / FR2: **nicht betroffen** (24.25-71 GHz)

Exposition von Arthropoden I

NIS-Studien an Insekten

(1) Erste umfassende BAFU-Literaturstudie:

- 132 Journal Publikationen:
 - NF: 0 – 100 kHz $n = 76$
 - HF: 100 kHz – 6 GHz $n = 47$
 - VHF: 6 GHz – 300 GHz $n = 9$
- Allgemeine Erkenntnisse:
 - 60% der Studien sind unvollkommen
 - Potentielle Wirkungen bei $f < 6 \text{ GHz}$
 - Evidenzgrad oberhalb 6 GHz schwach
 - Dringender Forschungsbedarf!

(2) Bienenstudien bei 5G/6G (THz-Frequenzen):

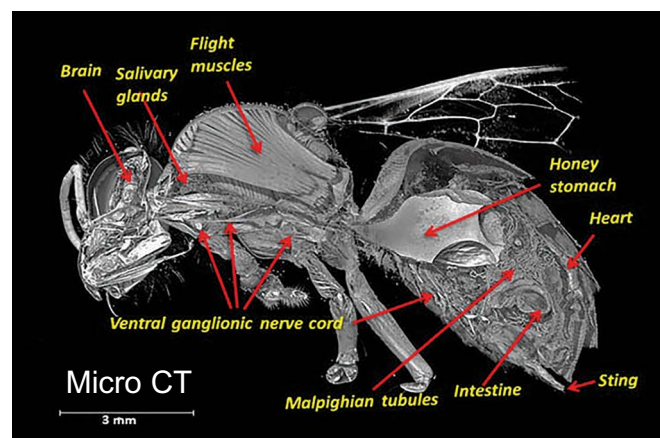
- 5G/6G: Kurze Wellenlängen \Rightarrow **Resonanzen**
- Modelle für Mikrodosimetrie \Rightarrow **sehr komplex**

J. Alba-Tecedor, I. Alba-Alejandre, "Comparing micro-CT results of insects with classical anatomical studies: The European honey bee (*Apis mellifera*, Linnaeus, 1758) as a benchmark (Insecta: Hymenoptera, Apidae)," *Microscopy and Analysis (Europe)*, vol. 40, pp. 12-15, Jan./Feb. 2019.

Wirkung von nichtionisierender Strahlung (NIS) auf Arthropoden

Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU)
18.08.2022

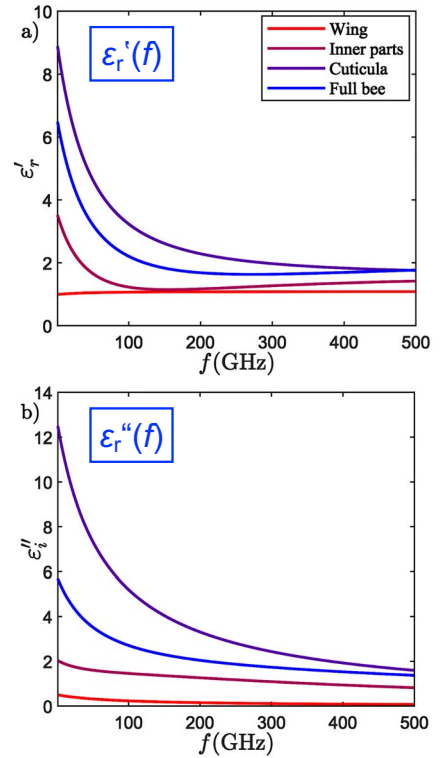
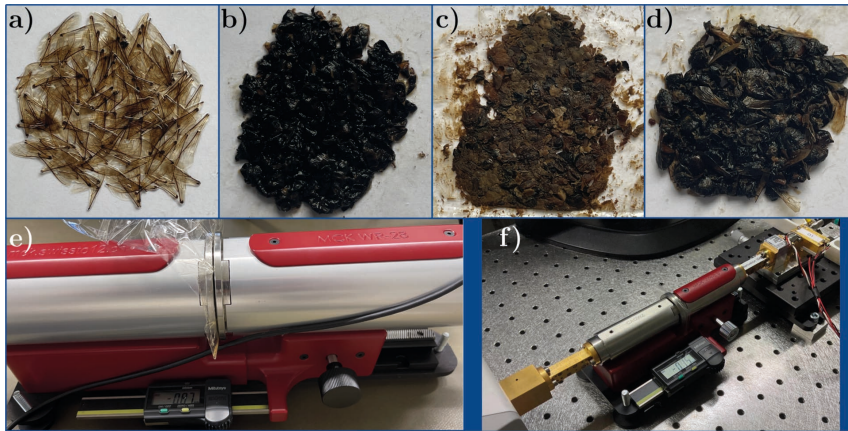
M. Mulot, T. Kroeber, M. Gossner, and J. Froehlich, "Wirkung von nicht-ionisierender Strahlung (NIS) auf Arthropoden," report commissioned by the **Bundesamts für Umwelt (BAFU)**, Neuenburg, Switzerland, 2022.



Exposition von Arthropoden II

5G/6G-Exposition von Europäischen Honigbienen

(1) Materialcharakterisierung der «Bienenbestandteile»:



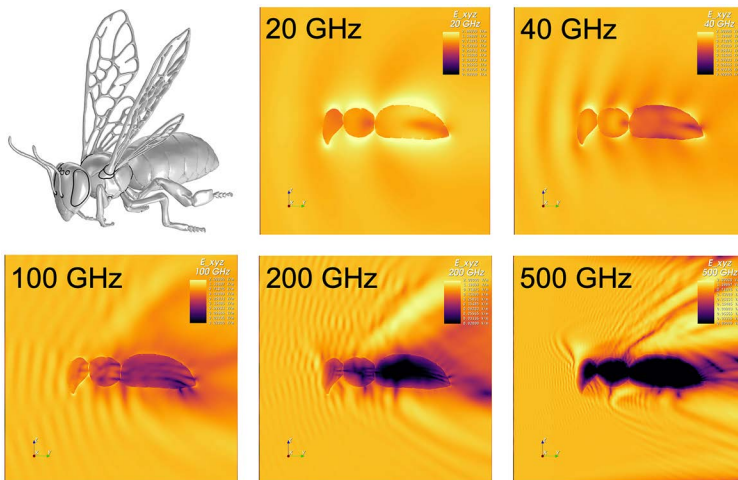
- (a) Flügel / (b) Cuticula / (c) Innereien / (d) gesamte Biene
- Messaufbau: Transmissions-/Reflexions-Setup (SWISSto12) für das K_a-Band (26.5-40 GHz) und D-Band (110-170 GHz).
- Dielektrische Funktion: 5-Pol-Debye-Modell für 1-500 GHz

M. Jalali, J. T. Svejda, and D. Erni, "THz Interaction with western honey bees," Tutorial Session 6 – Insect and plant monitoring, *IWMTS 2023*, 2023.

Exposition von Arthropoden III

5G/6G-Exposition von Europäischen Honigbienen

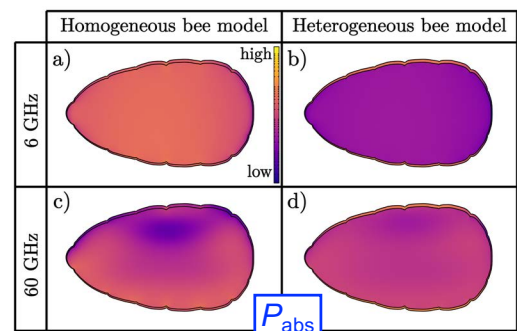
(2) Erste Simulationsstudien am digitalen Zwilling der *Apis mellifera*:



- Elektromagnetische 3D-FDTD-Simulation am Bienenmodell

F. Sheikh, A. Prokscha, A. Batra, D. Lessy, B. Salah, B. Sievert, M. Degen, A. Rennings, M. Jalali, J. T. Svejda, P. Alibeigloo, E. Mutlu, C. Preuss, R. Kress, S. Clochiatti, K. Kolpatzck, T. Kubiczek, I. Ullmann, K. Root, F. Brix, U. Kraemer, M. Vossiek, J. C. Balzer, N. G. Weimann, T. Kaiser, and D. Erni, "Towards continuous real-time plant and insect monitoring by miniaturized THz systems," *IEEE J. Microwaves*, vol. 3, no. 3, pp. 913-937, July 2023.

- Deutliches Eindringverhalten des elektrischen Feldes ≤ 40 GHz (links).
- Mögliche Wirkungen können nur am Bienenmodell mit anatomisch nachempfundenen Organen näher untersucht werden.
- Hat die Cuticula (Chitinpanzer) eine Abschirmwirkung (rechte Spalte)?



Zusammenfassung

- Kleine Eindringtiefen erfordern bei 5G eine mikroskopische Analyse der Energieeinträge in die Haut (Mikrodosimetrie).
- Membranen und Cytoplasma spielen bei der Leistungsabsorption eine wichtige Rolle.
- Felder, Ströme, Leistungsdichten in der Zelle: Wirkmechanismen interdisziplinär untersuchen.
- Ortsaufgelöste Messtechnik des Hautgewebes (Rastersonden, Thermokameras) muss zur Verifikation aufgebaut werden.
- Erste Forschungsergebnisse zu geschlechter- und ethnospezifischen Expositionsstudien liegen vor: ⇒ Vergleichsstudien.
- Insekten sind unsere Freunde: Was wäre ein geeignetes Expositionsmaß? SAR ?

Es gibt neue interessante Fragestellungen und einen entsprechend großen Forschungsbedarf.



Besten Dank.



Dr. Mandana Jalali

- Leiterin ATE-BioEM Center
- Biophotonics und Bio-Electromagnetics
- Bienen-Mikrodosimetrie



Dr.-Ing. Jan Taro Svejda

- Projektleiter MRT/CEM
- mm-Wellen-/THz-Antennen, Chipantennen-Messtechnik
- Computational EM (CEM)



M.Sc. Kevin Jerbic

- Doktorand
- Mehrskalige mm-Wellen-THz-Oberflächenmodelle (Materialcharakterisierung)



Dr. sc. techn. Jürg Fröhlich

- Gastwissenschaftler, Fields at Work GmbH
- Bioelectromagnetics
- Medizintechnik/MRT



Mobile Material Characterization and Localization by EM Sensing



NRW-Netzwerk zur exzellenten Terahertzforschung für Kommunikation, Lokalisierung, Materialcharakterisierung, Medizintechnik & Umweltmonitoring



6G-Forschungshub für offene, effiziente und sichere Mobilfunksysteme
BMBF / Mobilkommunikation & 6G

