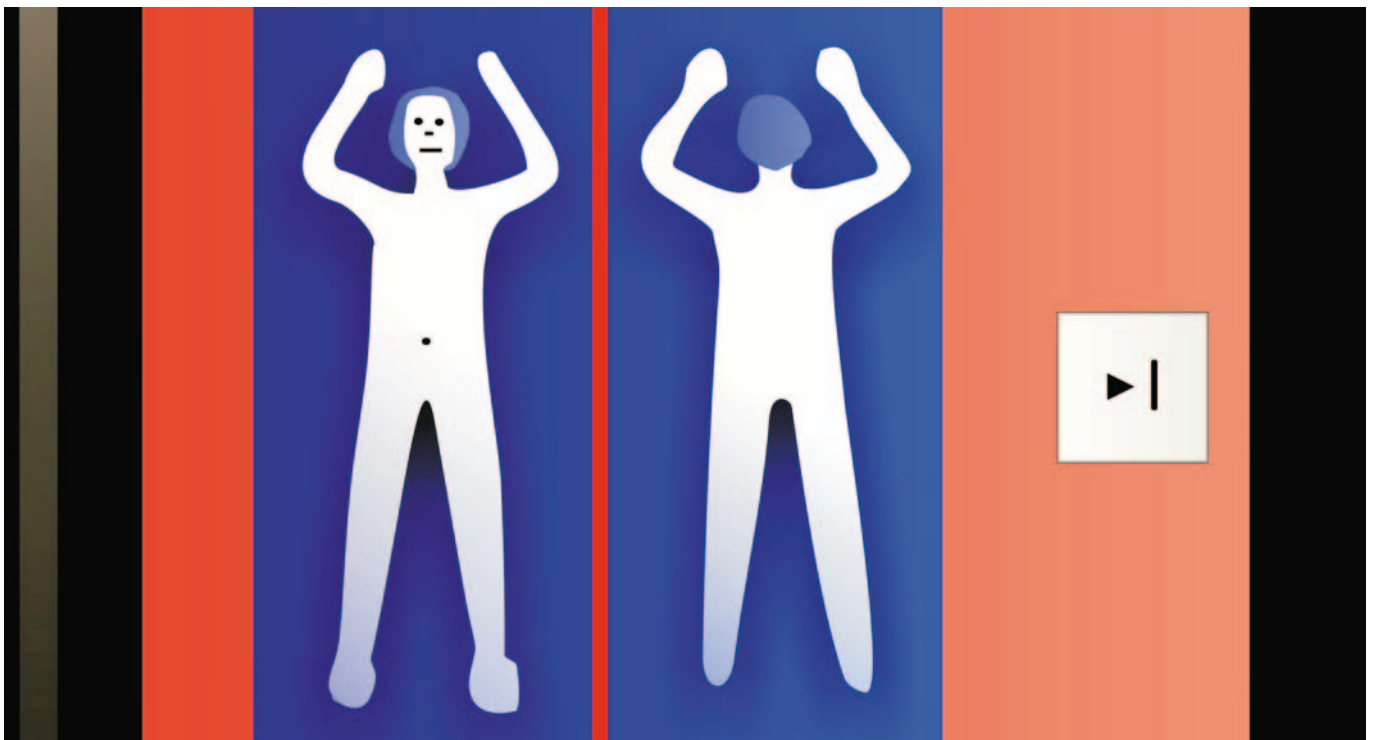


TAGUNGSBERICHT

Christian Jastrow

FORSCHUNG ZUR GENOTOXIZITÄT VON TERAHERTZ-STRABLUNG

Erste Ergebnisse vom Abschluss-Workshop des Projekts „Gentoxische Effekte von THz-Strahlung in vitro?“

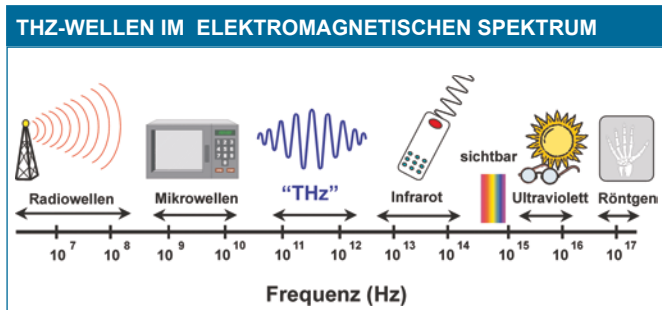


Seit einigen Jahren wird gerade vor dem Hintergrund potenzieller terroristischer Anschläge über den Einsatz von Ganzkörperscannern an Flughäfen öffentlich diskutiert, begleitet von teilweise heftigen Kontroversen um ethische, aber auch gesundheitliche Auswirkungen dieser Technologie. Auch wenn die aktuellen Geräte noch mit Frequenzen im Millimeterwellenbereich von circa 30 GHz arbeiten, wird oft schon von THz-Scannern gesprochen, um die verwendete Technik von den bisherigen Röntgenscannern abzugrenzen. Bereits in naher Zukunft werden diese jedoch auch THz-Frequenzen (Frequenzen über 100 GHz) verwenden. Auch andere Anwendungen mit THz-Technologie wie industrielle Qualitätskontrollen, Spektroskopie und mittelfristig auch hochbitratige Kommunikationssysteme kommen in zunehmendem Maße auf den Markt. Daher stellt sich auch für den Frequenzbereich oberhalb von 100 GHz immer dringender die Frage nach dem Gesundheitsschutz in nicht-ionisierenden elektromagnetischen Feldern (EMF).

Hintergrund und Motivation

Es ist nach wie vor umstritten, ob EMF mit Leistungsdichten unterhalb der thermischen Wirkungsschwelle nachteilige Auswirkungen auf lebende Organismen haben können. Der von dieser thermischen Wirkungsschwelle abgeleitete Grenzwert für die Leistungsflussdichte bei der allgemeinen Exposition der Bevölkerung wurde von der Internationalen Strahlenschutzkommission (International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection - ICNIRP) für den Frequenzbereich von 2 GHz bis 300 GHz auf 1 mW/cm² festgelegt. Oberhalb von 300 GHz existieren jedoch nur allgemeine Sicherheitsgrenzwerte für den Umgang mit Laserstrahlung, jedoch keinerlei Grenzwerte für die allgemeine Exposition der Bevölkerung.

Bisher liegen auf Grund technischer Schwierigkeiten bei der Erzeugung von THz-Wellen nur wenige umfassende Studien vor, die sich



mit biologischen Effekten von THz-Strahlung beschäftigen. Darüber hinaus wurden die vorliegenden Studien meist nicht durch andere Arbeitsgruppen verifiziert oder kommen, ebenso wie Studien zu anderen Frequenzbereichen, zu widersprüchlichen Ergebnissen.

Um die Datenbasis für die zukünftige Festsetzung von Grenzwerten oberhalb von 300 GHz zu verbreitern und existierende Ergebnisse zu verifizieren, hat das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) im Januar 2008 das Projekt „Gentoxische Effekte von THz-Strahlung in vitro“ gestartet und damit eine Serie breit angelegter Feldexpositionsexperimente initiiert. Mit der Projektleitung und -durchführung wurde die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig beauftragt. Als nationales Metrologieinstitut (Metrologie = Lehre von Maßen und Maßsystemen) sichert sie die präzise Messung der verwendeten Leistungsflussdichten auf Grund ihrer Kompetenz im Bereich der Messunsicherheitsanalyse. Mit der Durchführung der biologischen Analyse und der Gentoxizitätstests (Genotoxizität = Schädigung von Erbmasse) wurde das renommierte Institut für Toxikologie der Julius-Maximilians-Universität Würzburg beauftragt. Die Ergebnisse des Projekts wurden am 6. und 7. Dezember 2010 im Rahmen eines internationalen Workshops in der PTB in Braunschweig präsentiert und mit Wissenschaftlern verschiedenster Fachrichtungen diskutiert.

Bei dem Workshop standen neben der Vorstellung des Projektes und seiner Ergebnisse vor allem Themen im Vordergrund, die in inhaltlicher Beziehung zum laufenden Projekt stehen. So wurden nicht nur aktuelle Forschungsprojekte zu Körperscannertechnologien vorgestellt, sondern insbesondere mögliche Effekte und Wechselwirkungen von elektromagnetischer Strahlung mit biologischen Systemen behandelt. Während Professor Roland Glaser allgemeine Wirkmechanismen elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme vorstellte, diskutierte Dr. Alfonsina Ramundo-Orlando speziell den Einfluss von THz-Wellen auf Zellmembranen. Auch die Rolle einer möglichen Beeinflussung des Spindelapparates während der Mitose wurde dabei erörtert. Einen Einblick in die aktuelle Studiensituation und eine Übersicht der bisher untersuchten Frequenzbereiche gab Dr. Sarah Drießen vom Forschungszentrum für

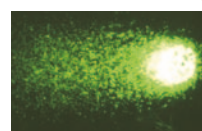
Elektromagnetische Umweltverträglichkeit an der RWTH Aachen (femu). Dr. Frank Gollnick vom Wissenschaftlichen Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste (WIK) gab abschließend eine Einschätzung zu den vorliegenden Ergebnissen unter besonderer Berücksichtigung der Probleme und Fallstricke in der Forschung zu den biologischen Wirkungen elektromagnetischer Strahlung, besonders in Laborstudien.

Die Projektstruktur – Was wurde untersucht?

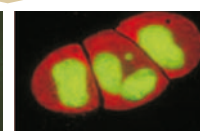
Als Projektleiter stellte Dr. Thorsten Schrader von der PTB zunächst die grobe Projektstruktur und die technischen Aspekte der Arbeiten vor: Um einen möglichst breiten Frequenzbereich abzudecken, wurden zwei verschiedene menschliche Hautzelltypen (HaCaT-Zellen und primäre menschliche Fibroblasten) bei drei verschiedenen Frequenzen (106 GHz, 380 GHz und 2,52 THz) mit kontinuierlicher THz-Strahlung dreier Leistungsflussdichten (bzw. fünf bei 2,52 THz) beim und unterhalb des Grenzwertes unter Fernfeldbedingungen für jeweils 2 und 8 Stunden exponiert. Die Zellen wurden dann mittels Comet Assay und Mikrokernstest auf DNA- und Chromosomenbrüche beziehungsweise Chromosomenfehlverteilungen während der Zellteilung untersucht. Weitere Expositionen, bei denen das Doppelte des gültigen Grenzwertes erreicht wird (2 mW/cm^2), werden in Kürze folgen.

EXPOSITIONSMATRIX UND UNTERSUCHTE ENDPUNKTE

	mW/m ²	HaCaT-Zellen		Fibroblasten	
		2h	8h	2h	8h
106 GHz	0	x	x	x	x
	0,04	x		x	
	0,4	x		x	
	0,9	x	x	x	x
380 GHz	0	x	x	x	x
	0,03	x		x	
	0,3	x		x	
	0,6	x	x	x	x
2,52 THz	0	x	x	x	x
	0,04	x		x	
	0,1	x		x	
	0,2	x	x	x	x
	0,4	x		x	
	0,9	x		x	



Comet Assay

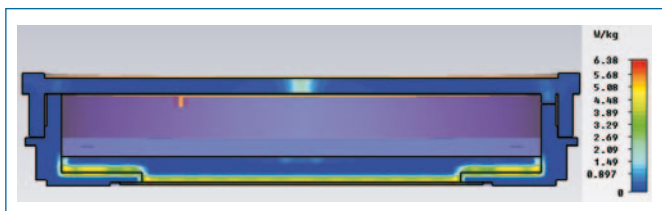


Mikrokernstest

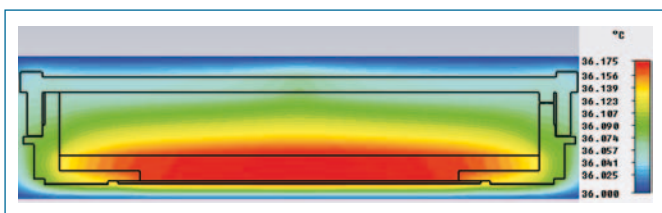
Auf die Exposition anderer Zelltypen wurde verzichtet, da die Eindringtiefe elektromagnetischer Felder in den menschlichen Körper bei 100 GHz bereits unterhalb von 1 mm liegt und daher vorrangig nach Effekten in Hautzellen gesucht werden sollte.

Das Studiendesign berücksichtigte folgende Qualitätskriterien:

- Positivkontrollen, Sham (Schein)-Expositionen und eine verblindete Versuchsdurchführung gewährleisteten die Aussagekraft der Ergebnisse.
- Unerwünschte Fremdbefeldungen innerhalb der Expositionskammer konnten durch Überprüfung von unbehandelten Kontrollen in einem zweiten Inkubator ausgeschlossen werden.
- Nach einer ersten Probereihe zur genauen Festlegung der Versuchsparameter wurden drei unabhängige Versuchsreihen durchgeführt, um statistisch signifikante Aussagen treffen zu können.
- Zur Ermittlung des Leistungseintrags (Spezifische Absorptionsrate - SAR) in die direkt am Boden haftende Zellschicht und der Probenerwärmung wurden dosimetrische Simulationen mit dem Programm CST Microwave Studio durchgeführt und die Erwärmung während der Expositionen messtechnisch verifiziert.
- Die verwendeten gaußschen Strahlprofile wurden mit einem feinstufigen 2D-Scan abgetastet, um Aussagen über die Feldhomogenität am Ort der Probe treffen zu können. Die für die Expositionsreihen eingestellten Leistungsflussdichten wurden dabei rückgeführt auf die SI-Einheiten gemessen und konnten daher erstmals mit bekannter Messunsicherheit absolut angegeben werden.



SAR-Verteilung innerhalb der Probe bei Anregung mit einer ebenen Welle der Leistungsflussdichte 1 mW/cm²



Erwärmung und Temperaturverteilung innerhalb der Probe bei Anregung mit einer ebenen Welle der Leistungsflussdichte 1 mW/cm²

Die Ergebnisse – Was kam heraus?

Nach einer kurzen Einführung in die beiden verwendeten biologischen Endpunkte „Comet Assay“ und „Mikrokerntest“ und deren Bedeutung in der Zellbiologie stellte Professor Helga Stopper (Universität Würzburg) die Ergebnisse der Untersuchungsreihen vor:

- Sämtliche Proben konnten ausgewertet werden, und die durchweg konstante Zellproliferation¹ lässt eine sorgfältige Probenhandhabung während der gesamten Projektlaufzeit erkennen.
- Die Einzelergebnisse der individuellen Expositionsreihen wiesen naturgemäß zwar Schwankungen auf, gegenüber den scheinexponierten Proben als Negativkontrolle waren die gepoolten Resultate beider Endpunkte statistisch jedoch nicht signifikant erhöht. Daraus kann geschlossen werden, dass bei den getesteten Frequenzen, Intensitäten und Expositionsdauern keine klaren oder konsistenten Effekte auftreten.

Professor Stopper fasste zusammen, dass weder DNA-Schäden noch chromosomale oder genomische Schäden durch die Befeldung induziert wurden. Im Anschluss an die Ergebnispräsentation stellte die Toxikologin jedoch weitere Untersuchungen vor, bei denen Effekte gefunden wurden. In diesen Experimenten wurden an der PTB parallel zum laufenden Projekt zusätzliche Expositionen bei 106 GHz durchgeführt (Mensch-Hamster-Hybridzellen für 30 Minuten). Dabei wurden in Abhängigkeit von der verwendeten Leistungsflussdichte von bis zu 4,3 mW/cm² Störungen des Spindelapparates während der Zellteilung (Mitose) entdeckt. Ähnliche Untersuchungen mit Mobilfunkfrequenzen hatte die PTB bereits zu einem früheren Zeitpunkt durchgeführt und hier ebenfalls Spindelstörungen entdeckt. Die Diskussion der Ergebnisse leitete Professor Stopper mit der offenen Frage nach dem generellen Risiko einer genomischen Schädigung durch THz-Strahlung ein.

Die Diskussion – Gibt es eine Entwarnung?

Trotz des Ergebnisses, dass keinerlei chromosomale oder genomische Effekte gefunden wurden, stellt sich angesichts der entdeckten Spindelstörungen die Frage, warum diese mit den im Projekt verwendeten Protokollen nicht als Mikrokern detektierbar waren. Prinzipiell sollte der verwendete Mikrokerntest auch Störungen während der Mitose detektieren, denn kürzlich veröffentlichte Beobachtungen zeigen, dass auch Mitosestörungen zu Mikrokernen führen können. Nach Aussage von Helga Stopper könnte die Ursache dafür ein „Verdünnungseffekt“ sein, der

¹ Vermehrung von Zellen im Gewebe oder in einer Kultur aufgrund von Zellwachstum und Zellteilung

sich zwischen den Spindelanalysen und dem Mikrokernprotokoll des Projektes ergab, da nur sehr wenige Mitosen während der Befeldungen gestört wurden. Ferner könnte es einen Schwellenwert für die Umwandlung von Mitosestörungen in Mikrokern geben, so die Expertin. In diesem Falle wäre die Festsetzung einer sicheren Dosis möglich – im Gegensatz zu DNA-reaktiven Mutagenen, bei denen bereits ein Molekül eine kritische Mutation auslösen kann. Ein solcher Schwellenwert bei der Mikrokernbildung existiert zumindest für chemische Substanzen, die den Spindelapparat stören. Entsprechend besteht die Möglichkeit, dass sich auch durch die THz-Exposition bewirkte kleinere Störungen des Apparates nicht in Mikrokernen manifestieren und somit auch hier eine Schwelle existiert, zumal eine Reparatur kleinerer Störungen innerhalb der Zelle denkbar zu sein scheint.

Die Projektpartner sind sich einig, dass keinerlei genotoxische Effekte bei den Feldexpositionsexperimenten gefunden wurden. Um den Zusammenhang mit den entdeckten Spindelstörungen genauer zu untersuchen und die Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen, genehmigte das Bundesamt für Strahlenschutz Ende letzten Jahres eine dreimonatige Projektverlängerung, deren Resultate im Frühsommer 2011 erwartet werden. Um den oben genannten Verdünnungseffekt zu vermeiden, werden derzeit Langzeitexpositionen in der PTB durchgeführt. Um darüber hinaus die Empfindlichkeit des Mikrokerntests zu erhöhen, soll die fünffache Menge an Zellen untersucht werden.

DIE PTB KURZ VORGESTELLT

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) mit Sitz in Braunschweig und Berlin ist als nationales Metrologieinstitut zuständig für Wissenschaft und Praxis des richtigen Messens. Ihre Aufgabe ist die Rückführung der Messwerte über „nationale Normale“ auf das SI-Einheitensystem unter Berücksichtigung der Messunsicherheit. In Form von Kalibrierungen gibt sie die Einheiten an die Anwender weiter und ist darüber hinaus beratend für die Eichbehörden tätig. Neben der Mitarbeit in diversen Normungsgremien beschäftigt sie sich hauptsächlich mit Forschung und Entwicklung, um die hohen technologischen Anforderungen der Metrologie erfüllen zu können.



Einigkeit herrschte bei den Experten auch darüber, dass im THz-Frequenzbereich erst der Grundstein für die Untersuchung der Wirkung solcher elektromagnetischen Felder auf biologische Systeme gelegt ist. So stellt sich nicht nur die generelle Frage, ob gefundene Effekte ein Risiko für den Menschen darstellen, so wie dies im Mobilfunkbereich seit vielen Jahren kontrovers diskutiert wird, es müssen bei den jetzigen Studien auch zahlreiche andere Parameter wie Frequenzen, Modulationsarten, Leistungsflussdichten und potenzielle Synergieeffekte variiert werden, um zu einer sicheren Aussage über eventuell nachteilige Effekte von THz-Wellen auf den Menschen zu gelangen.

Literatur zum Forschungsprojekt

ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), Health Phys., vol. 74, pp. 494–522, 1998

Numerical dosimetric calculations for in vitro field exposures in the THz frequency range, C. Jastrow et al., Adv. Radio Sci., Vol. 8, pp. 1-5, 2010

Terahertz radiation induces spindle disturbances in human-hamster hybrid cells, H. Hintzsche et al., Radiat Res, Online ahead of print March 11, 2011

Autor



Christian Jastrow ist Diplom-Ingenieur für Hochfrequenztechnik und Mitglied der Arbeitsgruppe „Elektromagnetische Felder“ der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. Im Rahmen des hier vorgestellten Projekts war er maßgeblich an der Durchführung der Forschungsarbeit beteiligt und neben der technischen Realisierung zusammen mit der Würzburger Arbeitsgruppe verantwortlich für die Exposition und Behandlung der Zellproben.

Kontakt:

Dipl.-Ing. Christian Jastrow
Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Arbeitsgruppe 2.21 - Elektromagnetische Felder
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Tel.: 0531/592-2215
E-Mail: christian.jastrow@ptb.de

<http://www.ptb.de/cms/fachabteilungen/abt2/fb-22/ag-221.html>