



Doctoral Thesis

## **EMF Risk Assessment Exposure Systems for Large-Scale Laboratory and Experimental Provocation Studies**

**Author(s):**

Ebert, Sven

**Publication Date:**

2009

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006092466> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 18636

# **EMF Risk Assessment: Exposure Systems for Large-Scale Laboratory and Experimental Provocation Studies**

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by  
SVEN EBERT

Dipl. Phys., TU Berlin, Germany  
B.Sc. Physics, UMIST, Great Britain  
born December 25th, 1970  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. W. Fichtner, examiner  
Prof. Dr. N. Kuster, Prof. Dr. P. Niederer, co-examiner

2009

# Summary

Various biological and health effects have been suggested as resulting from exposure to radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF) as emitted by mobile phones and other wireless communication devices. With the success of mobile communication technologies since the 1990's, the numbers of people exposed to RF-EMF has increased to such an extent that even small health effects become relevant. Particular concerns also focus on long-term effects such as the promotion of cancer, which might only become evident after a considerable delay. In addition to epidemiological examinations, health risk assessments require laboratory studies. These studies can be divided in *in vitro*, *in vivo* and human studies. For the assessment of health effects, *in vivo* studies are most relevant.

So far, laboratory studies have not provided consistent results. In addition to the probably large inherent variability in biological responses, undefined exposure conditions, variations in exposure and artifacts resulting from the exposure equipment are discussed as possible reasons for inconsistent study outcomes. To foster significant progress in the health risk assessment of low-level RF-EMF exposure from mobile phones, the 5th Framework program of the European Union started a large international toxicological/carcinogenic project (named PERFORM) with a special focus on well-defined, well-controlled and artifact-free RF exposures. The objectives of this dissertation were the development, characterization and successful operation of optimized exposure systems for the *in vivo* and human studies of the European PERFORM project. Significant contributions were achieved for all major requirements of such systems, to realize well-defined, well-controlled,

well-characterized, and artifact-free exposures.

For the large-scale, life-time *in vivo* laboratory study PERFORM A, 1500 mice had to be exposed at two frequencies and four groups (high dose, medium dose, low dose and sham). To be most relevant for risk assessment, the high-dose level needs to be chosen as high as possible but below the thermal threshold of inducing health effects. An experimental study was conducted to assess the thermal regulatory and breakdown thresholds for tube-restrained, whole-body exposed mice. The regulation of temperature started at specific absorption rate (SAR) levels between 2 and 5 W/kg; the level of SAR induced heating that cannot be compensated by the animal (SAR threshold for a thermal breakdown) was assessed to start as low as 6 W/kg under these laboratory conditions. In the PERFORM A study the exposure level of the high dose exposure group was then set at 4 W/kg.

For the mouse studies of PERFORM A, two types of efficient exposure setups for 900 and 1800 MHz signals were developed. The systems allow double-blind study protocols and are fully self-controlled (monitoring exposure and further parameters as oxygen, temperature and humidity) with an auto-detection of malfunctions. The applied exposure signal has a complexity covering different exposure scenarios of mobile phone uses. Different exposure phases included extremely low frequency (ELF) spectral components resulting from the DTX/non-DTX, power saving and environmental control signals. The experimental and numerical dosimetry was conducted with details that have not been provided in any previous study. Assessed were the whole-body averaged and organ averaged SAR for the different exposure phases, including their uncertainties and variations occurring in weight, anatomy, dielectric parameters, posture and positioning. Exposure verification was enabled through a new, experimental, dosimetric temperature method which verifies the exposure at each mouse position in the exposure resonator. Within this project, Dr. Veronica Berdiñas and Dr. Walter Oesch conducted the detailed numerical dosimetry and system software, which are not part of this thesis.

A study has also been performed to compare different mouse exposure systems based on the Ferris wheel concept (the setup used in the widely discussed Adelaide study that has shown a two-fold increase

in lymphoma cancer in transgenic mice and the new developed setups for the exposure of mice in PERFORM A and B). Thereby, a major drawback has been identified for Ferris-wheel-like resonant structures: their sensitivity to asymmetrical load conditions, resonator size, quality factor, asymmetries of mechanical constructions, etc., which can result in higher mode excitation and highly varying exposure conditions. It was shown that variations in whole-body SAR as large as 7.4 dB can occur for mice in the same setup. Several concepts to improve the uniformity and inter-animal variations have been identified within this thesis (small units, use of high permittivity bricks, homogeneous load). In this way, the variations of the PERFORM A setup were limited to less than 2.5 dB. By using a rotational scheme, variations over the life-time study are even as low as 1.2 dB.

Furthermore an optimized exposure system was developed for the human provocation study PERFORM C (a study considered to be one of the largest studies with human volunteers within the EMF risk assessment context). The study design foresees exposures of subjects for a duration of three hours or even longer. This requires an exposure system enabling head movements during exposure and was realized with a new, low-weight antenna mounted on a flexible and comfortable headset. The setup also incorporated a heated plate at the ear lobe of subjects on the exposed side to simulate the thermal load from, e.g., contact pressure or battery heat of a mobile phone during usage. The dosimetry and uncertainty assessments were conducted using measurements and simulations. Artifacts, such as field and SAR distortion due to EEG electrodes, were considered.

The final project covered by this thesis was an accurate assessment of the B-fields resulting from the amplifier supply currents of mobile phones. For the first time, B-field distributions and B-field waveforms were accurately measured for several commercial phones. The study showed that B-fields up to  $75 \mu\text{T}$  and rise times of  $1.4 \text{ T/s}$  are present. Although the maximum field strengths from several harmonics of 217 Hz exceeded the ICNIRP guideline levels, it still is not expected that the relevant current density in the body is also above the threshold, since exposure peaks are very local. This work resulted in a proposal for a worst-case test signal to be used for combined RF/ELF studies.

For the conclusion of the summary the biological results are pre-

sented here. The PERFORM A mouse studies covered two combined chronic toxicity and carcinogenicity studies performed at Fraunhofer Institute of Toxicology and Experimental Medicine (ITEM) in Germany and one co-carcinogenicity study performed at Istituto di Ricerche Biomediche *Antoine Marxer* (RBM) in Italy. The outcomes of the three studies showed no toxic/carcinogenic effects, even for the high-dose group with an exposure in the range where the thermal regulation mechanism within the animals starts being triggered. The study at RBM was also set up as a replication study of the Adelaide study; however, their findings were not confirmed. The Department of Health Science at the Karolinska Institute in Sweden examined in the human study PERFORM C effects of RF fields on self-reported symptoms, as well as the detection of fields after a three hour exposure time. A well-defined study group was chosen including subjects reporting symptoms attributed to mobile phone use. The results revealed that neither group were able to detect RF exposure better than by chance. The results also showed that headaches were more commonly reported after RF exposure than in the sham-exposed control group, mainly due to an increase in the subject group not reporting symptoms attributed to mobile phone use. The higher prevalence of headaches justifies and requires the further investigation of possible physiological correlations.

# Zusammenfassung

Elektromagnetische Felder von Mobiltelefonen und anderen drahtlosen Geräten sind im Verdacht verschiedene biologische und gesundheitliche Effekte auszulösen. Seit den 1990er Jahren verbreiteten sich die mobilen Kommunikationstechnologien sehr erfolgreich; inzwischen sind eine so grosse Anzahl von Menschen durch die elektromagnetischen Hochfrequenzfelder (ELF-RF) von Mobiltelefonen exponiert, dass auch geringste gesundheitsgefährdende Auswirkungen sehr relevant wären. Sorge bereiten insbesondere auch Auswirkungen, die erst mit einer zeitlichen Verzögerung auftreten, wie z. B. Krebs. Die Einschätzung des Gesundheitsrisikos erfordert epidemiologische Studien und Laborstudien (*in vitro*, *in vivo* und Studien mit Freiwilligen), wobei *in vivo* Studien als besonders relevant gelten.

Bisher lieferten Laborstudien inkonsistente Ergebnisse. Das wird verschiedenen Ursachen zugeschrieben: u. a. einer grossen Bandbreite inhärenter (biologischer) Reaktionen, ungenau definierten Expositionsbedingungen, Variationen in der Exposition oder auch durch Artefakte bei Expositionssystemen. Für einen bedeutenden Fortschritt in der Gesundheitsrisikoeinschätzung von ELF-RF Expositionen durch Mobiltelefone wurde im 5. Rahmenprogramm der Europäischen Union ein grosses, internationales, toxikologisch/karzinogenes Forschungsprojekt (mit dem Namen PERFORM) gestartet, u. a. mit dem Ziel wohl-definierter, wohl-kontrollierter und artefaktfreier Expositionen. Zielsetzungen dieser Dissertation waren die Entwicklung, Charakterisierung und erfolgreiche Durchführung optimierter Expositionsanlagen für die *in vivo* Studien und die Freiwilligenstudie des Europäischen Projekts PERFORM. Dabei wurde ein bedeutender Beitrag für alle Hauptanforderungen solcher Systeme erzielt, um wohl-definierte,

wohl-kontrollierte, wohl-charakterisierte und artefaktfreie Expositionen zu ermöglichen.

In der grossen *in vivo* Langzeit-Laborstudie PERFORM A wurden 1500 Mäuse bei zwei Frequenzen exponiert, unterteilt in Hochdosis-, Mitteldosis-, Niedrigdosis- und Sham-Gruppen. Um die Risikoabschätzung zu optimieren, muss die höchste applizierte Dosis so hoch wie möglich gewählt werden, aber unterhalb des Schwellenwerts liegen, ab dem gesundheitliche Auswirkungen auftreten. Dafür wurden in einer experimentellen Studie die beiden Schwellenwerte einsetzen und Zusammenbruch der Körpertemperatur-Regelung durch Ganzkörper EMF-RF Exposition für in Röhren fixierte Mäuse bestimmt. Die Temperaturregulation setzte bei einer spezifischen Absorptionsrate (SAR) zwischen 2 und 5 W/kg ein und kann bereits ab 6 W/kg unter den applizierten Laborbedingungen zusammenbrechen. In der PERFORM A Studie wurde daraufhin die Exposition der Hochdosisgruppe auf 4 W/kg eingestellt.

Für die PERFORM A Mausstudien wurden zwei effiziente Expositionsanlagen entwickelt – für 900 MHz und für 1800 MHz Signale. Die Anlagen ermöglichen Doppelblindstudien, sind selbstkontrollierend (Sensoren überwachen die Exposition und weitere Parameter wie Sauerstoff, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, etc.) und erkennen Störungen automatisch. Das applizierte Expositionssignal ist komplex und stellte verschiedene Expositionsszenarien dar, die beim Gebrauch von Mobiltelefonen auftreten, wie niederfrequente Spektralbestandteile resultierend aus den DTX/non-DTX, Energieeinsparungs- und Umgebungskontrollsignalen. Es wurde eine umfangreiche experimentelle und numerische Dosimetrie und Unsicherheitsanalyse mit mehr Details als in bisherigen Studien durchgeführt. Für die verschiedenen Expositionsphasen wurden die durchschnittlichen Ganzkörper-SAR Werte sowie die durchschnittlichen SAR Werte für einzelne Organe ermittelt, einschliesslich ihrer Unsicherheiten und Variationen in Bezug auf Masse, Anatomie, dielektrischen Parametern, Lage und Position. Dabei ermöglichte eine neue, experimentelle, dosimetrische Methode mittels Temperaturmessungen die Untersuchung der Expositionen an jeder Position im Resonator. Innerhalb des Projekts wurden die numerischen Simulationen von Dr. Veronika Berdiñas und die Systemsoftware von Dr. Walter Oesch erstellt, sie sind somit nicht Teil dieser Dissertation.



Eine weitere Studie vergleicht drei verschiedene Maus-Expositionssysteme, die auf dem Ferris-Wheel Konzept basieren. Untersucht wurden das Ferris-Wheel Expositionssystem aus der viel diskutierten Adelaide-Studie, die eine Verdoppelung der Lymphom-Krebs-Rate in RF exponierten, transgenen Mäusen festgestellt hat, sowie die beiden neu entwickelten Maus-Expositionssysteme von PERFORM A und B. Die Studie hat wesentliche Nachteile von Ferris-Wheel Expositionssystemen aufgedeckt: ihre Empfindlichkeit bezüglich einer asymmetrischen Lastverteilung, zu grosser Resonator Dimensionen, des Qualitätsfaktors und mechanischer Resonator Asymmetrien. Dadurch können höhere Moden angeregt werden und stark variierende Expositionen auftreten. Die Studie zeigt, dass Schwankungen der Ganzkörper-SAR bis zu 7.4 dB zwischen Mäusen im gleichen Resonator auftreten können. Es werden verschiedene Konzepte vorgeschlagen, die die Gleichförmigkeit der Einzeltier-Exposition sowie die Tier-zu-Tier-Variationen verbessern (kleiner Resonator Durchmesser, Vergrößerung der Distanzen zwischen Nachbarn, homogene Lastverteilung). Auf diese Weise konnten die Variationen im PERFORM A Resonator auf unter 2.5 dB reduziert werden. Durch den Einsatz eines Rotationsschemas wurden die auftretenden Variationen während der Langzeit-Studie sogar auf 1.2 dB reduziert.

Desweiteren wurde ein optimiertes Expositionssystem für PERFORM C entwickelt (die Studie gilt als eine der grössten Freiwilligenstudien im Kontext einer EMF-RF Risikobewertung). In dieser Provokationsstudie wurden Probanden für mindestens drei Stunden mit einem Mobilfunksignal exponiert. Das erforderte ein Expositionssystem, welches Kopfbewegungen bei gleichzeitig konstanter Exposition erlaubt. Das wurde mit einer neuen, leichten Antenne realisiert, befestigt an einem flexiblen und bequemen Kopfhalter. Zudem löste auf der exponierten Seite eine beheizte Keramikplatte am Ohrläppchen einen Temperaturreiz aus, der Kontaktdruck- bzw. Batteriewärme des Mobiltelefons während der Benutzung simulierte. Die Dosimetrie und Unsicherheiten des Expositionssystems wurden durch Messungen und Simulationen bestimmt; Artefakte, z. B. Einfluss von EEG Kabeln, wurden berücksichtigt.

Die letzte Studie dieser Dissertation untersucht B-Felder, die durch die Verstärker-Versorgungsströme in Mobiltelefonen verur-

sacht werden. Zum ersten Mal wurden die Magnetfeldverteilung und -wellenform für mehrere kommerzielle Mobiltelefone vermessen. Die Untersuchung zeigt, dass B-Felder bis zu  $75 \mu\text{T}$  und Anstiegszeiten von  $1.4 \text{T/s}$  auftreten. Obgleich die maximalen Feldstärken einiger Harmonischen von  $217 \text{Hz}$  die ICNIRP-Grenzwerte übersteigen, ist nicht zu erwarten, dass die relevante Stromdichte im Körper ebenfalls über dem ICNIRP-Grenzwert liegt, da diese Expositionsspitzen sehr lokal auftreten. Als Ergebnis dieser Studie wird ein Testsignal für kombinierte RF/ELF Studien vorgeschlagen.

Zum Abschluss der Zusammenfassung werden die biologischen Studienresultate vorgestellt. Die PERFORM A Mausstudien beinhalten die Durchführung von zwei kombinierten Giftigkeits- und Karzinogen-Studien am Fraunhofer Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin in Deutschland, sowie eine Co-Karzinogen-Studie am Istituto di Ricerche Biomediche *Antoine Marxer* (RBM) in Italien. Die Ergebnisse der drei Studien zeigen keine negativen Auswirkungen, auch nicht in der Gruppe mit der höchsten Dosis, dessen Expositionsstärke den Temperatur-Regulationsmechanismus in Mäusen auslösen kann. Die Studie bei RBM wurde als Replikationsstudie der Adelaide-Studie konzipiert, jedoch konnten die Resultate nicht bestätigt werden. Das Department of Health Science am Karolinska Institute in Schweden untersuchte in der Freiwilligenstudie PERFORM C die Wirkung von RF-Feldern auf Probanden bezüglich selbst-berichteter Symptome und inwieweit sie RF Felder nach einer dreistündigen Expositionsdauer wahrnehmen können. Die Untersuchung wurde mit einer definierten Expositionsgruppe durchgeführt, die auch Personen einschloss, die über Symptome bei Mobilfunkbenutzung berichteten. Die Ergebnisse zeigen, dass keine Probandengruppe RF Exposition häufiger wahrnehmen konnte als es durch Zufallstreffer möglich wäre. Ferner zeigen die Ergebnisse, dass häufiger von Kopfschmerzen nach der RF-Exposition berichtet wurde als nach der Sham-Exposition, sogar hauptsächlich von Probanden, die sonst von keinen Symptomen bei Mobilfunkbenutzung berichteten. Das häufigere Auftreten von Kopfschmerzen rechtfertigt und erfordert weitere Untersuchungen auf mögliche physiologische Wechselbeziehungen.