

# Einfluß von hohen GHz vegetative

J. Kantz, J. Waldmann,  
F.M. Landstorfer, F. Lang,  
J. Müller, K.P. Hadeler

## 1. Zusammenfassung

Ziel der Studie (vgl. [1]) war die Untersuchung einer möglichen Beeinflussung des menschlichen vegetativen Nervensystems durch hochfrequente Signale. Hierzu wurden 50 Testpersonen (Probanden) mit einem periodischen Mehrfrequenzsignal, bestehend aus einer Sequenz von sechs unterschiedlichen Frequenzen im Frequenzbereich von 5,8 GHz bis 110 GHz, befeldet. Die Modulation des Befeldungssignals orientiert sich an kommerziell erhältlichen Radar- und Kommunikationssystemen. Die Feldstärke der Signale am Ort der Versuchsperson betrug 15 V/m. Dies entspricht etwa 25% des Referenzwerts der elektrischen Feldstärke nach IC-NIRP.

Die Untersuchung eines Probanden dauerte 90 Minuten. Die Testpersonen wurden in einer von zwei möglichen Befeldungsphasen 15 Minuten befeldet. Während des gesamten Versuches wurden Parameter des vegetativen Nervensystems wie Puls, Blutdruck (systolisch und diastolisch) sowie Hauttemperatur und Hautleitfähigkeit aufgezeichnet. Im Anschluss an die Befeldungsversuche wurden die Messdaten medizinisch und statistisch ausgewertet.

## 2. Medizinische Parameter

Mögliche nicht-thermische Wirkungen von Mikrowellen auf den menschlichen Organismus können am besten und genauesten durch Beobachtung des vegetativen Nervensystems erfasst werden. Um mögliche Auswirkungen des Mikrowellen-

signals auf das vegetative Nervensystem zu untersuchen, wurden folgende Parameter während der Befeldungsversuche aufgezeichnet.

- Elektrokardiogramm (EKG)
- Blutdruck (systolisch und diastolisch)
- Hauttemperatur
- Hautleitfähigkeit

Von einer zusätzlichen Blutentnahme während der Befeldungsversuche wurde Abstand genommen, da Vorversuche zeigten, dass durch die Blutabnahme die aufgezeichneten Parameter erheblich beeinflusst werden.

Weitere Voruntersuchungen verdeutlichten die Empfindlichkeit der gemessenen Parameter: schon eine Annäherung einer anderen Person an den Probanden verursachte eine starke Änderung der Messparameter. Damit konnte gezeigt werden, dass bei einer möglichen Beeinflussung der Testperson die aufgezeichneten Parameter geeignet sind, diese Störung zu detektieren.

Um jegliche Beeinflussung durch die Umgebung zu vermeiden (sowohl Beeinflussung in Form von ungewollter elektromagnetischer Strahlung (im Unterscheid zur gewünschten Befeldung) als auch Beeinträchtigung in Form von akustischen Signalen), wurden die Befeldungsversuche in der Antennenmesskammer des Instituts für Hochfrequenztechnik der Universität Stuttgart durchgeführt. Zur bestmöglichen Isolation von der Umgebung und zur Schaffung gleicher Versuchsbedingungen wurde den Testpersonen Musik („Das wohltemperierte Klavier“ von J.S. Bach) über Kopfhörer vorgespielt.

# -Signalen auf das Nervensystem

## 3. Der Befeldungsversuch

### Messablauf

Bild 3.1 zeigt den zeitlichen Ablauf des Befeldungsversuches. Die 30-minütige Beruhigungsphase zu Beginn des Versuches erlaubt der Testperson, sich an die Umgebung zu gewöhnen und ermöglicht eine Äquilibration der gemessenen vegetativen Parameter. Der Beruhigungsphase folgte eine erste mögliche Befeldungsphase von 15 Minuten mit anschließender 15-minütiger Erholungsphase sowie eine zweite mögliche Befeldungsphase mit erneuter 15-minütiger Erholungsphase. Jede Testperson wurde hierbei entweder in der ersten oder in der zweiten möglichen Befeldungsphase befeldet, wobei 25 zufällig gewählte Testpersonen in der ersten Phase und die 25 anderen Testpersonen in der zweiten Phase befeldet wurden.

Die Versuche wurden als Doppelblindversuch durchgeführt: weder der Versuchsperson noch den Versuchsdurchführenden war die Zugehörigkeit zu der entsprechenden Befeldungsgruppe bekannt.

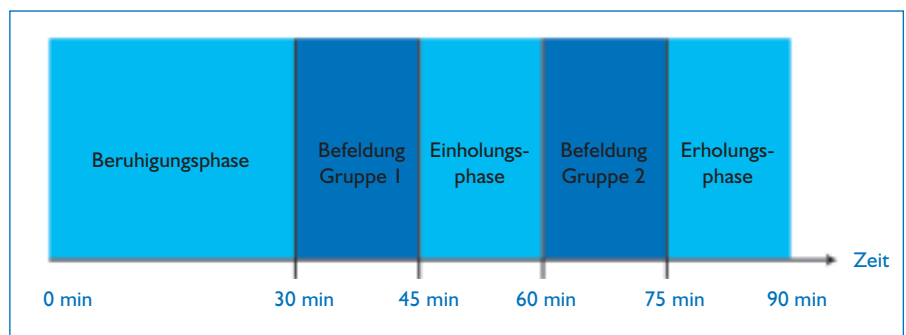


Bild 3.1: Befeldungsablauf

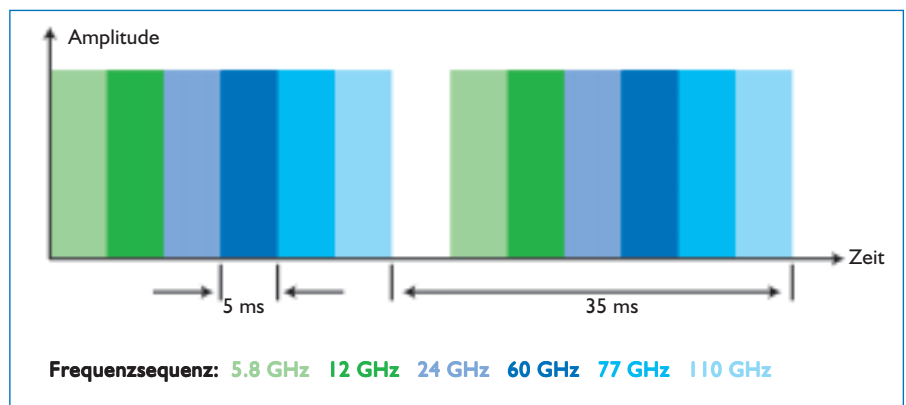


Bild 3.2: Befeldungssignal

### Befeldungssignal

Das Befeldungssignal ist in Bild 3.2 dargestellt. Es handelt sich um eine Sequenz aus sechs unterschiedlichen Frequenzen im Frequenzbereich von 5,8 GHz bis 110 GHz. Die Frequenzen sind jeweils 5 ms aktiv und die Wiederholrate beträgt 35 ms.

Das gewählte Mehrfrequenzsignal ermöglicht die Aussage, dass entweder keine der Frequenzen eine Beeinflussung des vegetativen Nervensystems verursacht oder dass mindestens eine oder mehrere der sechs

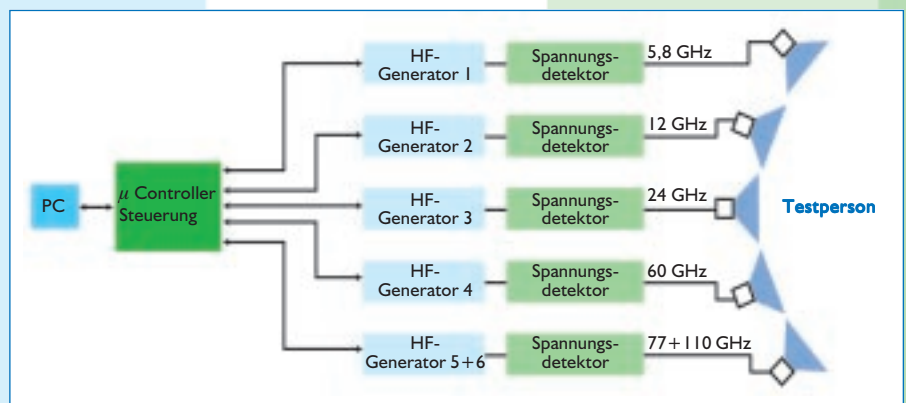


Bild 3.3: Messaufbau



Bild 3.4: Befeldungsmessplatz

Frequenzen eine Wirkung auf das vegetative Nervensystem haben. Der Vorteil des gewählten Signals ist die Möglichkeit, sechs unterschiedliche Frequenzen gleichzeitig zu testen, der Nachteil, dass im Fall einer möglichen Beeinflussung die für die Wirkung ursächlichen Frequenzen nicht unmittelbar bestimmt werden können.

#### Messaufbau

Bild 3.3 zeigt den Messaufbau. Die Erfassung und Aufzeichnung der Messdaten sowie die Auswahl der Befeldungsgruppe wurde vollständig automatisiert.

Die HF-Generatoren wurden von einer Mikrocontrollersteuerung geschaltet. Dabei dienen die eingesetzten Spannungsdetektoren zur Überwachung der Signale. Im Fall einer fehlerhaften Befeldung sollte auf diese Weise ein automatischer Abbruch des Versuches ermöglicht werden.

Die Aufzeichnung der Messparameter erfolgte ebenfalls computergesteuert: Die Aufzeichnung des Elektrokardiogramms sowie die Messung und Aufzeichnung der Hauttemperatur und Hautleitfähigkeit wurden durch den Steuer-PC überwacht. Zusätzlich initiierte die Messsoftware alle drei Minuten eine Messung des Blutdruckes.

#### Befeldungsmessplatz

Bild 3.4 zeigt den Befeldungsmessplatz, aufgebaut in der Antennenmesskammer

des Instituts für Hochfrequenztechnik. Die Versuchsperson befindet sich in 40 cm bzw. – für die Frequenzen 77 GHz und 110 GHz – in 20 cm Abstand zu den Hornantennen. Befeldet wird der Rücken der Testperson. Am linken Oberarm erfolgt die Blutdruckmessung. Am Mittel- und Ringfinger der rechten Hand wird die Hautleitfähigkeit, am Handrücken die Hauttemperatur gemessen. Die EKG Elektroden befinden sich im Brustbereich der Testperson.

## 4. Statistische Auswertung

### Einleitung

Das Ziel der Studie ist die Aufdeckung möglicher Wirkungen von Mikrowellen-Signalen auf das vegetative Nervensystem. Die Untersuchungen werden an einer im Verhältnis zur Gesamtbevölkerung kleinen Stichprobe durchgeführt. Deshalb müssen die Ergebnisse statistisch abgesichert werden. Es ist zu erwarten, dass bei den verwendeten Signalen allenfalls kleine Effekte auftreten können und dass andererseits das vegetative Nervensystem, das ja z.B. auf emotionale Stimuli reagiert, große Variationen von Person zu Person und über der Zeit zeigt. Es sollen also u.U. sehr kleine Effekte bei großer Variabilität gefunden oder ausgeschlossen werden. Zu diesem Zweck wird die Variabilität zwischen den Testpersonen (Probanden) und Beob-

achtungsintervallen bereits durch die Versuchsplanung möglichst vermindert.

Wie in der Statistik üblich, wird für die Zusammenhänge zwischen Effekten, Störungen und Beobachtungen ein Modell angenommen. Anhand der Daten werden die Voraussetzungen für die Anwendung des Modells überprüft. Danach können Parameter geschätzt, Vertrauensintervalle berechnet, Hypothesen geprüft oder Alternativen entschieden werden. Das Ergebnis ist eine Aussage, die mit einer Wahrscheinlichkeit behaftet ist.

Die Entwicklung und Prüfung des Modells sind wichtige Schritte, die im Zusammenhang mit der medizinischen Fragestellung durchgeführt werden. Die statistische Aussage wird dann durch formale Berechnung gewonnen, wichtig ist dann wieder die Interpretation und Bewertung der Ergebnisse, also die Verbindung des statistischen Modells mit der praktischen Anwendung. Diese Schritte werden im Folgenden dargestellt.

### Versuchsplanung

Der gewählte Versuchsverlauf eines Cross-over Designs reduziert die Variabilität im Vergleich mit einer denkbaren Aufteilung in befeldete und nicht befeldete Probanden. Der Stichprobenumfang von 50 Probanden wurde mit den Physiologen nach deren Erfahrung zur Größenordnung und Variabilität physiologischer Größen festgelegt.

### Ermüdungseffekte

In Vorversuchen zeigte sich, dass auch nach einer Beruhigungsphase noch Beruhigungseffekte auftreten, die eventuelle Befeldungseffekte überlagern; ebenfalls hat die nicht konstante Raumtemperatur einen Einfluss. Da diese Effekte und der eventuelle Befeldungseffekt im Experiment nicht getrennt werden konnten, wurden sie in das Modell aufgenommen. Im Nachhinein erwies sich das Auftreten des Ermüdungseffektes als Vorteil für die Analyse, da hierdurch die Größenordnung ab-

geschätzt werden konnte, die das statistische Modell noch erfasst.

### Statistisches Modell

Es wurde ein lineares Modell zugrunde gelegt, d.h. es wurde angenommen, dass sich die Effekte additiv überlagern: Für jede Messung entsteht der beobachtete Wert durch Addition aus dem Mittelwert, dem Ermüdungseffekt, dem Einfluss der Raumtemperatur, dem möglichen Effekt der Befeldung sowie einer zufälligen Störung. Letztere wird als normalverteilt mit Erwartungswert Null angenommen. Die Linearität ist bei relativ sehr kleinen Effekten angemessen. Abweichungen vom Mittelwert Null sind den Effekten zuzurechnen. Approximative Normalverteilung ist zu erwarten, wenn die Störung durch viele unabhängige Einflüsse verursacht wird. Die Voraussetzungen für die Anwendbarkeit des linearen Modells müssen jedoch überprüft werden.

Die Nullhypothese besagt im vorliegenden Fall, dass kein Befeldungseffekt vorliegt. Für das Modell bedeutet das, dass für jede beobachtete Variable die Differenz der Werte für Befeldung bzw. Nichtbefeldung gleich Null ist, und dass also alle Abweichungen von Null den zufälligen Störungen zuzurechnen sind.

Unter Voraussetzung der Nullhypothese konstruiert man mit Methoden der linearen Algebra eine Testvariable mit bekannter Verteilung [2]. Dann kann man die Wahrscheinlichkeit, dass die beobachteten Effekte durch zufällige Variation verursacht sind, explizit beschreiben. Man kann also die Wahrscheinlichkeit der fälschlichen Ablehnung der Nullhypothese angeben (auf der Grundlage des angenommenen Modells).

### Anschauliche Deutung

Zur Deutung des Ergebnisses ziehen wir das bekannte Beispiel des Produzenten und des Konsumenten herbei. Beide wünschen ein gleichmäßig gutes Produkt ohne „Effekte“.

Die Nullhypothese besagt „Es treten keine Effekte auf“, d.h. gewisse Unterschiede sind mit der üblichen Variabilität erklärbar. Beide Kontrahenten wünschen, dass diese Hypothese zutrifft. Für eine konkret durchgeführte Probe können Abweichungen auftreten. Es sei die Wahrscheinlichkeit dafür, dass unter der Nullhypothese ein beobachteter Effekt von zufälligen Abweichungen herrührt und nicht von einem echten physischen Effekt. Also ist  $p$  die Wahrscheinlichkeit einer fälschlichen Ablehnung der Nullhypothese „kein Effekt“. Der Produzent wünscht, dass ein kleines  $p$  gewählt werde, um unnötige Zurückweisungen zu vermeiden. Der Konsument möchte eher ein großes  $p$ , damit ein wirklicher Effekt nicht unentdeckt bleibe. In vielen konkreten Situationen wird es so sein, dass ein großes  $p$  dafür spricht, dass die Wahrscheinlichkeit der fälschlichen Annahme der Nullhypothese klein ist. Aber dieser „Fehler der zweiten Art“ lässt sich im Rahmen des Modells nicht quantifizieren.

### Kontrolle der Voraussetzungen

Nach Durchführung der Messungen wurden die Daten in ASCII Dateien zur statistischen Auswertung übergeben und auf grobe Fehler und Unstimmigkeiten untersucht. Durch diese nicht automatisierte Inspektion können z.B. durch verrutschte Messfühler ungültig gewordene Messungen entdeckt werden.

Dann wurde mit Methoden der mathematischen Statistik geprüft, ob die Voraussetzungen eines linearen Modells gegeben waren: Voraussetzung der approximativen Normalverteilung mit einem Mahalanobis-Test auf statistische Ausreißer [4] und mit einem Shapiro-Wilk-Test für jede einzelne Variable [4]. Der Einfluss von eventuellen statistischen Ausreißern wurde eingehend und auf den Einzelfall bezogen untersucht, indem die Rechnungen jeweils mit und auch ohne die potentiellen Ausreißer durchgeführt wurden, insbesondere die Überprüfung der Homogenität der Kovarianzmatrizen [3] (zufriedenstel-

lende Homogenität im gesamten Datensatz, sehr gute Homogenität bei Elimination von Ausreißern).

### Durchführung der Tests

Im eigentlichen Test genügt die jeweilige Testvariable (Ermüdungseffekt, Einfluss der Raumtemperatur, möglicher Befeldungseffekt) F-Verteilungen mit bekannten Freiheitsgraden (abhängig vom Umfang der effektiven Stichprobe und der Zahl der Messvariablen). Für den möglichen Befeldungseffekt ergab sich  $p=0,91$  (Berechnung mit dem Statistikpaket [4]). Das bedeutet, dass man die Existenz von physischen Befeldungseffekten ausschließen kann, selbst wenn man zulässt, dass in etwa 90% aller Experimente die Behauptung „Es gibt keinen Befeldungseffekt“ fälschlich abgelehnt wird. Damit ist die Hypothese „Es gibt keine Befeldungseffekte“ (in Bezug auf die gemessenen Parameter, bei der gewählten Frequenz/den gewählten Frequenzen und Intensität) statistisch gut abgesichert.

## 5. Ergebnisse

Bei der statistischen Auswertung der Messdaten konnte kein Effekt der Mikrowellensignale auf das vegetative Nervensystem nachgewiesen werden.

*Dipl.-Ing. J. Kantz, Dipl.-Ing. J. Waldmann,  
Prof. Dr.-Ing. F. Landstorfer, Institut für  
Hochfrequenztechnik, Universität Stuttgart*

*Prof. Dr. med. F. Lang, Physiologisches  
Institut, Universität Tübingen*

*PD Dr. J. Müller, Institut für Biomathematik  
und Biometrie, GSF München*

*Prof. Dr. K.P. Hadeler, Lehrstuhl für Bioma-  
thematik, Universität Tübingen*

### Literatur:

[1] J. Kantz, J. Waldmann, F. Landstorfer, F. Lang, J. Müller, K.P. Hadeler: *Influence of High-GHz Signals on the Vegetative Nervous System*, Final Report, Stuttgart, April 2003

[2] H. Pruscha: *Angewandte Methoden in der Mathematischen Statistik*, Teubner Verlag, Stuttgart, 1996

[3] J. Hartung, B. Epelt: *Multivariate Statistik*, R. Oldenbourg Verlag München, Wien, 1995

[4] J. Sall, A. Lehmann: *JMP V3.2.2.*, SAS Institute Inc. 1996