

Schutz von Personen in elektromagnetischen Feldern des

Achim Bahr



Einleitung

In diesem Projekt im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit [10] wurde untersucht, inwiefern Personen mit Herzschrittmachern und Defibrillatoren durch elektromagnetische Felder des heutigen GSM Mobilfunks, DECT, UMTS, Power Line Communication und Induktionsfunktanlagen beeinträchtigt werden. Ziel der Studie im Bereich UMTS war eine präventive Folgenabschätzung über elektromagnetische Störungen von Herzschrittmachern und Defibrillatoren insbesondere im Hinblick auf die dort verwendeten Modulationsarten und die Häufung von Feldquellen durch die Mehrfachnutzung von Standorten. Die theoretisch und experimentell ermittelten Ergebnisse wurden in einem weiteren Schritt in praktischen Versuchen mit freiwilligen Probanden verifiziert.

Im Rahmen dieses Beitrags werden die Ergebnisse zur Störbeeinflussung von Herzschrittmachern durch GSM und UMTS Mobilfunksignale vorgestellt. Die Untersuchung der Fragestellung erfolgt gemäß Bild 1 anhand der „strukturierten Methode“, die eine Kombination von zwei Teilmodellen darstellt. Zum einen beinhaltet das Kopplungsmodell den Mechanismus der Transformation eines elektromagnetischen Feldes außerhalb des Körpers in eine Störspannung am Eingang des Implantates. Das Verträglichkeitsmodell gibt an, ab welcher Störspannung mit einem Fehlverhalten des Implantates zu rechnen ist. Das Zusammenführen der beiden Teilmodelle ermöglicht eine qualifizierte Beurteilung der Beeinflussung der Implantate in elektromagnetischen Hochfrequenzfeldern. Die strukturierte Methode wurde bereits in verschiedenen Studien im Auftrag der Forschungsgemeinschaft Funk zur Untersuchung dieser Fragestellung erfolgreich eingesetzt (u. a. [6][7]).

mit Herzschrittmachern Mobilfunks

Die Untersuchung des Kopplungsmodells erfolgt auf der Basis von numerischen Simulationen mit der Methode der finiten Differenzen im Zeitbereich. Das Verträglichkeitsmodell wird anhand von Störfestigkeitsmessungen ermittelt. Hierzu werden verschiedene Mobilfunkstörsignale durch geeignete HF-Quellen erzeugt und dem zu testenden Implantat leitungsgebunden zugeführt.

Aufbau und Funktionsweise von Herzschrittmachern

Ein Herzschrittmacher ist ein implantierbarer elektrischer Impulsgeber, der für eine normale Herzschlagfolge sorgt. Der Aufbau eines Herzschrittmachers ist in Bild 2 wiedergegeben.

Die HSM-Elektronik bestehend aus einem Stimulator- und Analyseteil ist zusammen mit einer langlebigen Batterie in einem biokompatiblen Metallgehäuse un-

tergebracht. Über eine oder mehrere Elektroden, die mit dem Herzen verbunden sind, werden elektrische Impulse zur Stimulation zum Herzen geleitet und ggf. ein vorhandenes Herzsignal wahrgenommen.

Herzschrittmacher können je nach Stimulationsort in zwei Hauptgruppen eingeteilt werden:

- Einkanalschrittmacher, die nur im Vorhof (Atrium) oder der Herzkammer (Ventrikel) stimulieren/wahrnehmen,
 - Mehrkanalschrittmacher, die sowohl im Vorhof als auch in der Herzkammer stimulieren/wahrnehmen.
- Außerdem wird unterschieden zwischen unipolaren und bipolaren Schrittmachern:
- Unipolare Schrittmacher benutzen das Herzschrittmachergehäuse als einen Pol und die Herzschrittmacherelektrode als Gegenpol, der Stimulationsstrom fließt also zwischen zwei räumlich entfernten Punkten.

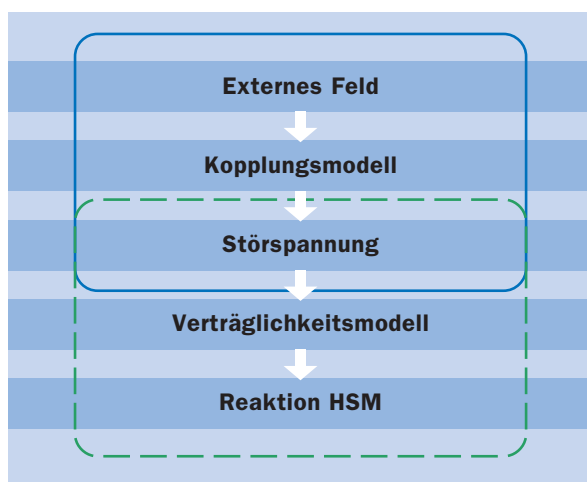


Bild 1: Das Zusammenwirken von Kopplungsmodell und Verträglichkeitsmodell sowie die Bedeutung der Störspannung am Eingang des Implantates.



Bild 2: Aufbau eines Herzschrittmachers.

- Bipolare Schrittmacher benutzen i.a. eine koaxiale Elektrodenanordnung, wobei der Stimulationsstrom nur zwischen Innen- und Außenleiter direkt im Herzen fließt. Moderne Ausführungen können aber auch wahlweise unipolar betrieben werden.

Stand der Normung

Zum Schutz von Personen mit aktiven elektronischen Implantaten ist bis September 2005 noch die Norm DIN EN 50061/A1 (VDE 0750 Teil 9/A1):1996-07 [2] anwendbar. Die DIN EN 50061/A1 ist dabei für die HSM-Hersteller unverbindlich weil nicht harmonisiert. Sie umfasst nur einen eingeschränkten Frequenzbereich von 20 Hz bis 30 MHz. Darüber hinaus sind die entscheidenden Störfestigkeitsanforderungen nur optional, d. h. bei Nichteinhaltung genügt ein Hinweis im Manual.

Die Norm EN 45502-2-1:2003-09 ist im September 2003 auf europäischer Ebene verabschiedet worden [4] und ersetzt die Norm DIN EN 50061/A1, wobei die entscheidenden Störfestigkeitsanforderungen nicht mehr umgehbar sind.

Inhalt dieser europäischen Norm sind neben Störschwellen für das statische Magnetfeld (als einzige äußere Feldgröße zur Sicherstellung der Funktion

von Reedkontakten im HSM!) gerätebezogene Störschwellen der Spannung am Geräteanschluss (HSM-Eingang) im Frequenzbereich von 16 Hz bis 450 MHz. Zur Störfestigkeitsprüfung werden die Störspannungen über R-C-Netzwerke an den HSM-Eingang angelegt, d. h. sie haben keinen erkennbaren Bezug auf die von außen auf den HSM-Träger einwirkenden Felder. Im Frequenzbereich 450 MHz bis 3 GHz nimmt die Norm Bezug auf den amerikanischen Standard ANSI/AAMI PC69 [1]. Der ANSI-Standard sieht in diesem Frequenzbereich gestrahlte Störfestigkeitsmessungen vor, wobei der Herzschrittmacher in Anlehnung an die reale Implantationssituation in einem flüssigkeitsgefüllten Phantom mit dem elektromagnetischen Feld eines Dipols exponiert wird.

Der deutsche Normentwurf E DIN VDE 0848-3-1 (VDE 0848 Teil 3-1):2002-05 [3] soll bestehende Lücken zur Sicherheit von Personen in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern schließen. Durch die Unterscheidung in Einkopplung und Störfestigkeit lassen sich beide Teilaspekte unabhängig voneinander betrachten. Der Normentwurf enthält daher Umrechnungsverfahren, die den Zusammenhang zwischen der an einer implantierten Elektrode indu-

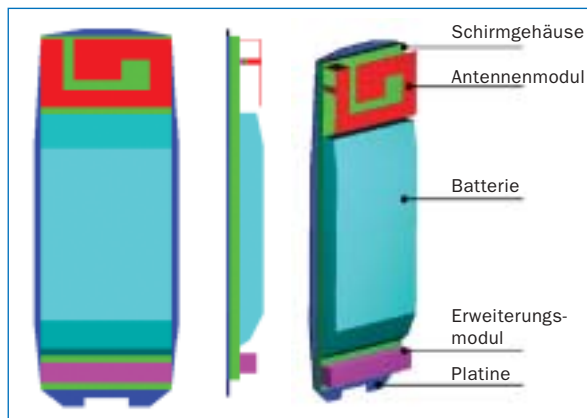


Bild 3: Verwendetes Mobiltelefon mit integrierter Antenne für GSM 900.

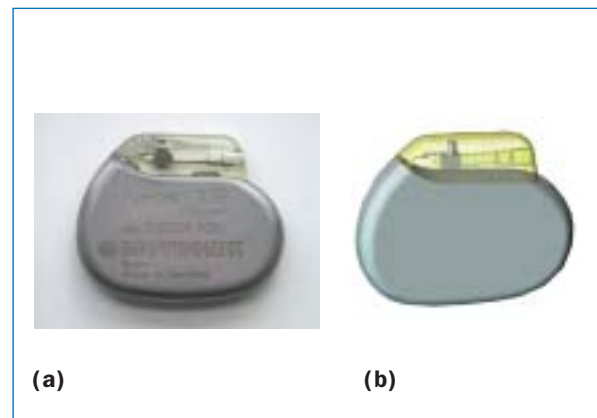


Bild 4: Moderner unipolarer Herzschrittmacher (a) und Simulationsmodell (b).

zierten Leerlaufspannung und den sie hervorruhenden äußeren Feldern beschreiben. Die Geräte selbst werden deshalb in 3 Spannungs-Störfestigkeitsklassen eingeteilt:

- Angemessen störfeste Geräte, deren Träger sich gefahrlos dort aufhalten kann, wo der Aufenthalt der Allgemeinbevölkerung uneingeschränkt zulässig ist und wo nicht auf das lokale oder kurzzeitige Überschreiten der Referenzwerte nach EG/519/1999 [11] hingewiesen wird.
- Eingeschränkt störfeste Geräte, deren Träger gewisse Warnhinweise und Bekanntmachungen speziell für Herzschrittmacherträger beachten müssen.
- Störeffindliche Geräte, deren Schutz nur durch einzelfallbezogene Maßnahmen gewährleistet werden kann.

Auf der Grundlage dieser Klassifizierung könnte in Zukunft einem genau benennbaren Kreis von HSM-Trägern Sicherheit in EMF gewährleistet werden. Voraussetzung ist aber, dass die HSM-Hersteller zukünftig ihre Geräte entsprechend der Störfestigkeitsklasse kennzeichnen. Außerdem müssten auch die Felderzeuger die Bereiche kennzeichnen, in denen die für die Klassifizierung maßgeblichen Feldstärken überschritten werden.

Bei der Beurteilung des beruflichen Einsatzes von HSM-Trägern an EMF-Arbeitsplätzen ist unbedingt zu beachten, dass die Klassifizierung in „Angemessen störfeste Geräte“ nur für Felder gilt, deren Feldstärken unterhalb der Referenzwerte der EU-Ratsempfehlung EG/519/1999 liegen. Die dort festgelegten Feldstärkewerte können an Arbeitsplätzen deutlich überschritten werden, so dass in diesen Fällen immer eine Einzelfallbeurteilung erfolgen muss.

Die Herausgabe des Entwurfs E DIN VDE 0848-3-1 (VDE 0848 Teil 3-1):2002-05 hat eine Flut von bisher noch nicht abgearbeiteten Einsprüchen ergeben. Die HSM-Hersteller wenden sich gegen die Deklarationspflicht der Störfestigkeitsklasse und viele Felderzeuger gegen die Kennzeichnungspflicht bei Überschreitung der Referenzwerte der EU-Ratsempfehlung.

Von deutscher Seite wurde das Normungsvorhaben 0848-3-1 im damaligen TC 211 bei CENELEC als neues Normungsvorhaben eingebracht. Da die erforderliche Anzahl von Mitgliedsstaaten an einer Mitarbeit nicht interessiert war, wurde das Arbeitsvorhaben beendet. Im Jahr 2004 wurde aktuell ein New Work Item Proposal zum Thema aktive Implantate bei CENELEC eingebracht. Dieses Vorhaben wird weiterverfolgt und im Rahmen der TC106X als Nachfolger der TC 211 behandelt.

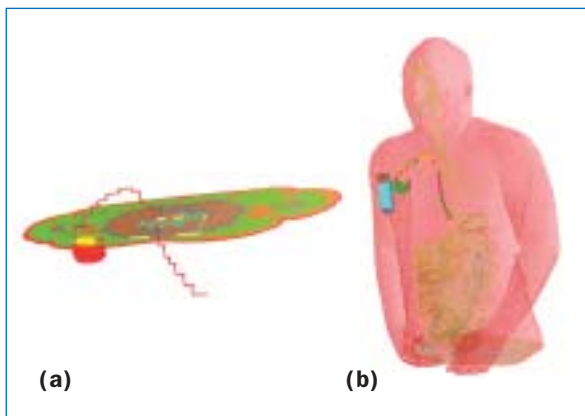


Bild 5: Lage des Herzschrittmachers im Körpermodell bei rechtspektoraler Implantation. Ansicht mit transversaler Ebene des Körpermodells (a) und Ansicht mit transparenter Körperoberfläche und Mobiltelefon im Brustbereich (b).

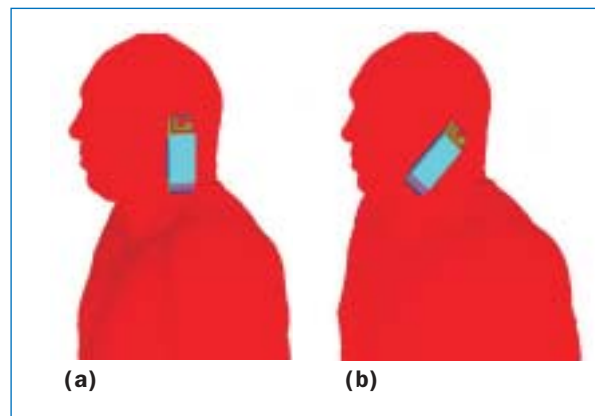


Bild 6: Lage des Mobiltelefons an der linken Kopfseite: senkrechte Orientierung (a) und realistische Telefonposition (b).

| | Aktuelle Simulationen | |
|------------------------------|--|---|
| Körpermodell | Inhomogenes, anatomisches Körpermodell (AFRL) mit 40 verschiedenen Gewebearten | Schichtenmodell des menschlichen Körpers mit Haut, Fett- und Muskelgewebe |
| HSM-Modell | Detailliertes Modell orientiert an einem kommerziellen Modell | Einfaches HSM-Modell |
| Implantation | Rechtspektoral anhand der anatomischen Details des Körpermodells | Ebene Lage des HSM und der Elektrode im Schichtenmodell des Körpers |
| Feldquelle im Nahfeld | Modell eines Mobiltelefons mit integrierter Antenne | Dipol |

Tabelle 1: Unterschiede in den Simulationsmodellen [6]

Numerische Untersuchung des Kopplungsmodells

Das Kopplungsmodell beschreibt den Zusammenhang zwischen den elektromagnetischen Feldern, die von einer Feldquelle (z. B. einem mobilen Endgerät) emittiert werden und der Störspannung am Herzschrittmachereingang unter Berücksichtigung einer realen Implantationssituation. Als Expositionsszenarien werden berücksichtigt:

- Endgerät in verschiedenen Abständen vor der Brust,
- Endgerät in Telefonierposition (am rechten und linken Ohr),
- Exposition im Fernfeld einer Basisstationsantenne.

Modellbildung

Das Endgerätemodell basiert auf einem Mobiltelefon mit integrierter Antenne. Bild 3 zeigt die verwendete Mobiltelefonplattform mit der Antenne für GSM 900. Für GSM 1800 und UMTS werden veränderte, jeweils dem Frequenzbereich angepasste Antennen eingesetzt.

Bild 4 zeigt das Foto des modellierten unipolaren Herzschrittmachers und das entsprechende Simulationsmodell. Gezeigt ist das metallische Gehäuse mit

dem dielektrischen Verbindungskopf (Header). Im Header befindet sich der Elektrodenanschluss für eine unipolare Elektrode. Die Modellierung des Herzschrittmachergehäuse erfolgt als ideal leitfähiges Volumen. Zur Untersuchung des Kopplungsmodells wird der Herzschrittmacher in rechtspektoraler Implantationsweise in das Körpermodell des US-amerikanischen Air-Force-Research-Laboratory [9] eingebracht. Das Modell basiert auf dem „Visible-Human“-Datensatz und liegt in einer räumlichen Auflösung von 1 mm vor. Das Modell unterscheidet ca. 40 verschiedene Gewebearten. Die dielektrischen Eigenschaften der biologischen Gewebe werden mit Hilfe des parametrischen Modells von Gabriel [5], das im Frequenzbereich von 10 Hz bis 100 GHz verwendbar ist, bestimmt. Die Implantationstiefe des Herzschrittmachers beträgt 5 mm, Bild 5 zeigt Ansichten des in das Körpermodell integrierten Herzschrittmachers.

Das Mobiltelefon wird gemäß Bild 5b mit paralleler Ausrichtung zum Herzschrittmacher vor der Brust positioniert. Damit ergibt sich ein minimaler Abstand von 5,5 cm zwischen Herzschrittmachergehäuse und Mobiltelefon.

Bild 6 zeigt die Positionierung des Mobiltelefons am Kopf. Es werden zwei Konfigurationen untersucht: (a)

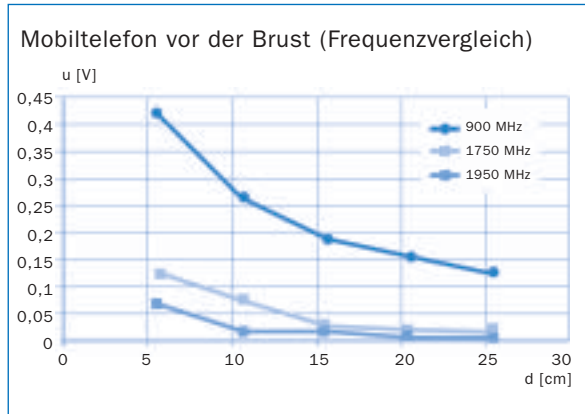


Bild 7: Grafische Darstellung der Störspannung (Amplitude) für verschiedene Abstände und Frequenzen zwischen Herzschrittmachergehäuse und Mobiltelefon vor der Brust ($P = 1 \text{ W}$).

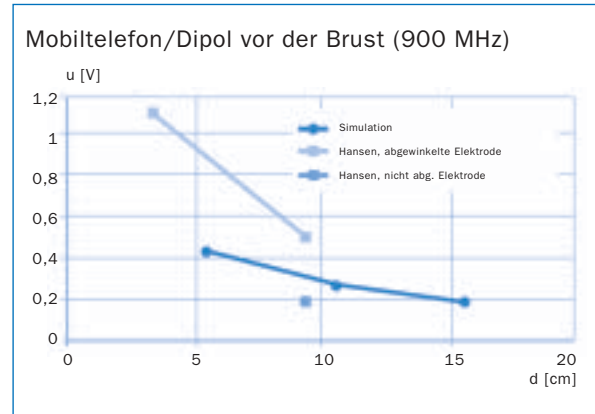


Bild 8: Vergleich der ermittelten Störspannung für verschiedene Abstände zwischen Herzschrittmachergehäuse und Mobiltelefon vor der Brust mit den Ergebnissen in [6] für eine Frequenz von 900 MHz.

Die Telefonachse ist parallel zur Körperachse orientiert. (b) Das Telefon befindet sich in einer realistischen Telefonierposition.

Ergebnisse

In Bild 7 sind die Ergebnisse für das Expositionsszenario „Mobiltelefon vor der Brust“ für die Frequenzen 900 MHz, 1750 MHz und 1950 MHz dargestellt. Es wird deutlich, dass die Störspannung für 900 MHz mehr als 10 dB höher ist als für die beiden übrigen Frequenzen.

Diese Ergebnisse sollen vor dem Hintergrund von Literaturergebnissen [6] eingehender diskutiert werden. Bei der Bewertung der Ergebnisse muss beachtet werden, dass zwischen der untersuchten Anordnung in [6] und der hier untersuchten Konfiguration einige wesentliche Unterschiede bestehen. Diese Unterschiede sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Bild 8 zeigt für die Nahfeldexposition, dass die aktuellen Simulationsergebnisse bei Benutzung eines detaillierten Körpermodells trotzdem in der gleichen Größenordnung liegen wie die Ergebnisse in [6] bei Verwendung eines vereinfachten Schichtenmodells des menschlichen Körpers. Bild 8 verdeutlicht aber auch die zu erwartende Variation der Störspannung auf-

grund der Variation des Abstands zwischen Feldquelle und Herzschrittmacher, der Implantationsweise des Herzschrittmachers und der Art der Feldquelle.

In Bild 9 sind die Ergebnisse für das Szenario „Mobiltelefon am Ohr“ für die Frequenzen 900 MHz, 1750 MHz und 1950 MHz dargestellt. Es zeigt sich, dass die maximal auftretenden Störspannungen um mehr als 20 dB unterhalb der Störspannungen für das Expositionsszenario „Mobiltelefon vor der Brust“ liegen. Falls die Strahlungsquelle weit vom Herzschrittmacherträger entfernt ist wie zum Beispiel bei einer Basisstation, kann unter Vernachlässigung von Umgebungseinflüssen vereinfachend eine homogene ebene Welle zur Beschreibung der räumlichen Feldverteilung angenommen werden. In Bild 10 sind die Ergebnisse der Berechnungen mit einer horizontal und einer vertikal orientierten homogenen ebenen Welle der Amplitude $E = 1 \text{ V/m}$ grafisch dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass die höchsten Störspannungen im 900 MHz Frequenzbereich auftreten.

Störfestigkeitsmessungen

Die leitungsgebundenen Messungen werden für 88 explantierte Herzschrittmacher ohne Änderung der vor-eingestellten Empfindlichkeit durchgeführt. Der Zeit-

raum der Markteinführung der Geräte deckt die Jahre 1980-2003 ab. 5 Herzschrittmarker sind bipolar programmiert, die übrigen werden mit unipolarer Wahrnehmung betrieben.

Störsignale

Für die beiden GSM Varianten bei 900 MHz und 1800 MHz werden die in Bild 11 gezeigten gepulsten HF-Träger als Störsignale definiert. Die Pulslänge der Bursts beträgt 550 ms.

Die Einhüllende gemäß Bild 11a tritt bei einer aktiven Gesprächsverbindung zwischen Mobilteil und Basisstation auf und wird als GSM-Störsignal 1 definiert. Während Gesprächspausen kann das Mobilteil bzw. die Basisstation im DTX-Modus senden. Hierbei wird aus Gründen der Energieersparnis und der Interferenzminimierung der jeweilige Sender über längere Zeiträume abgeschaltet. Dieses DTX-Signal wird als GSM-Störsignal 2 definiert und ist in Bild 11b wiedergegeben.

Bei GSM-Basisstationen ist zu beachten, dass auf dem ersten Kanal in allen acht Zeitschlitz mit der maximalen Sendeleistung gesendet wird. Hierbei sind die beiden ersten Zeitschlitz für Signalisierungszwecke reserviert, die Zeitschlitz drei bis acht können für Verbindungen mit einem Mobilteil belegt werden.

Falls keine Verbindung mit einem Mobilteil existiert, werden Dummy Bursts gesendet. Damit ergibt sich das in Bild 11c dargestellte GSM-Störsignal 3.

Neben den bisher erwähnten GSM-Signalformen, die hauptsächlich bei einer Gesprächsverbindung auftreten, existieren spezielle GSM-Datensignale in Form von HSCSD (High Speed Circuit Switched Data) oder GPRS (General Packet Radio Services). Voraussetzung sind HSCSD- oder GPRS-fähige Endgeräte und Mobilfunknetze.

Bei HSCSD können zur Erhöhung der Datenrate mehrere Zeitschlitz belegt werden. Dies kann getrennt für den Uplink und Downlink erfolgen. Als Beispiel für ein derartiges Signal ist in Bild 11d das GSM-Störsignal 4 dargestellt.

Für UMTS werden zwei QPSK-modulierte Störsignale definiert, deren Einhüllende in Bild 12 gezeigt sind. Das UMTS-Störsignal 1 ist Teil des in [8] vorgeschlagenen UMTS-Testsignals zur Durchführung bioelektromagnetischer Experimente. Das Endgerät sendet auf höchster Leistungsstufe in einem schlecht versorgten Gebiet. Typisch sind die in Bild 12a gezeigten Pegelschwankungen um 3 dB.

Zusätzlich wird das UMTS-Störsignal 2 definiert, dessen Wiederholfrequenz im Sinne eines worst case im Bereich der natürlichen Herzfrequenz liegt. Das in

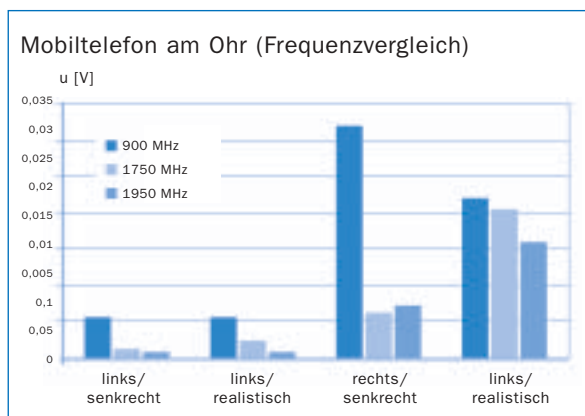


Bild 9: Grafische Darstellung der Störspannung (Amplitude) für verschiedene Positionen des Mobiltelefons am rechten und linken Ohr des Benutzers bei 900 MHz, 1750 MHz und 1950 MHz ($P = 1 \text{ W}$).

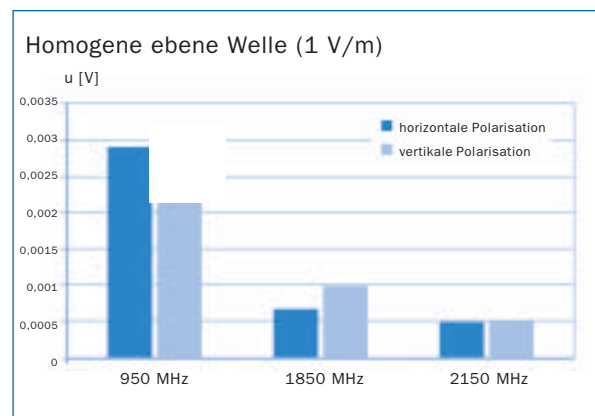


Bild 10: Grafische Darstellung der Störspannung (Amplitude) bei frontalem Einfall einer homogenen ebenen Welle (HEW, $E = 1 \text{ V/m}$).



Bild 12b dargestellte UMTS-Störsignal 2 besitzt eine Periodendauer von 700 ms, wobei die Leistung in einem Bereich von 30 dB schwankt. Dieses Signal könnte in gut versorgten Bereichen mit periodisch angeordneten Hindernissen auftreten, durch die sich ein Mobilfunkteilnehmer hindurchbewegt.

Messaufbau

Der in Bild 13a gezeigte Messaufbau erlaubt die Zuführung leitungsgebundener Störsignale verschiedener Mobilfunkstandards, ggf. simulierter Herzsignale sowie die Messung des Herzschrittmacherverhaltens unter verschiedenen Bedingungen.

Der Messplatz setzt sich aus den folgenden Komponenten zusammen:

- HSM mit Adapteranschlusskabel auf eine koaxiale Leitung,
- EKG-Signalgenerator gemäß [4],
- Störsignalerzeugung mittels HF-Quelle und Modulationsquelle,
- Koppelnetzwerk zur Einkopplung der Störsignale und zur Signaltrennung der Herzschrittmachersignale, Störsignale und EKG-Signale,
- Geräte zur Aufbereitung und Anzeige der getrennten Signale,

- PC zur Aufzeichnung und Auswertung der Signale mittels geeigneter Software.

Alle Geräte sind untereinander synchronisiert und über ein Bussystem mit dem PC verbunden. Damit ist eine weitgehende Automatisierung möglich, was eine zügige Messung der Eigenschaften erlaubt.

Das Blockschaltbild des Messaufbaus ist in Bild 13b gezeigt. Zur Erzeugung der GSM-Störsignale wird ein amplitudengetasteter CW-Generator eingesetzt. Für UMTS-Störsignale kommt ein Vektorsignalgenerator zum Einsatz, der mit geeigneten UMTS-Testsignalfolgen moduliert wird. Für Kombinationsmessungen wird ein fest eingestelltes UMTS-Signal mit einem GSM-Störsignal mit variabler Amplitude überlagert.

Messablauf

Vor und nach den eigentlichen Störfestigkeitsmessungen erfolgt ein Funktionstest des zu untersuchenden Herzschrittmachers zur Feststellung von eventuellen Geräteausfällen. Die Störfestigkeitsmessungen erfolgen für die zwei Fälle EKG-Signal vorhanden/EKG-Signal nicht vorhanden, wobei jeweils der Störleistungspegel in 1 dB Schritten geändert wird. Die Messung ist beendet, wenn eine Störung des Herzschrittmachers detektiert wird oder der maximale Störleistungspegel erreicht ist.

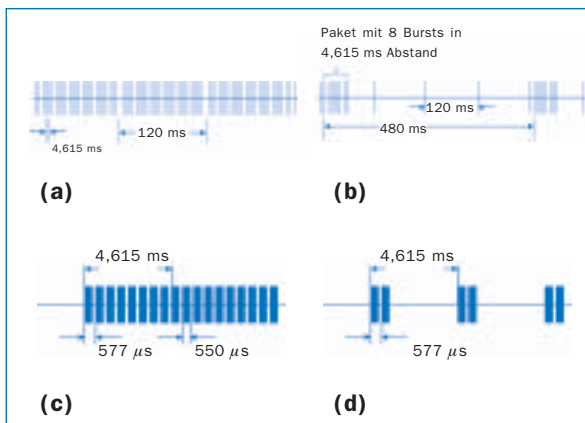


Bild 11: Schematische Darstellung der GSM-Störsignale 1-4 als gepulste Träger.

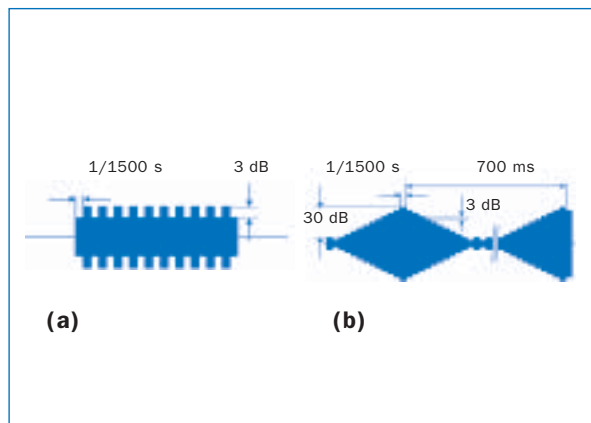


Bild 13: Schematische Darstellung des UMTS-Störsignals 1 (a) und UMTS-Störsignals 2 (b) mit schneller Leistungsregelung.

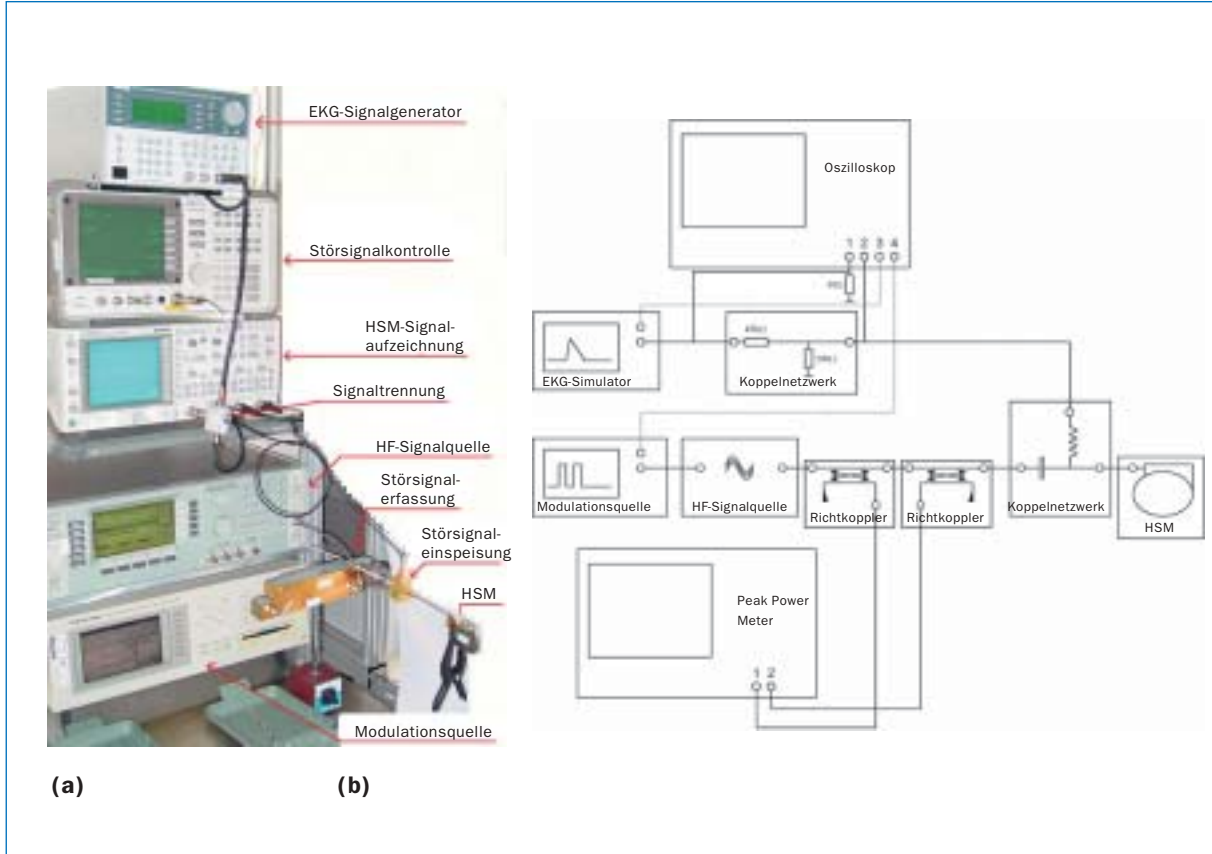


Bild 13: Messaufbau (a) und Prinzipschaltbild (b) zur Ermittlung des Einflusses von Störsignalen auf den HSM.

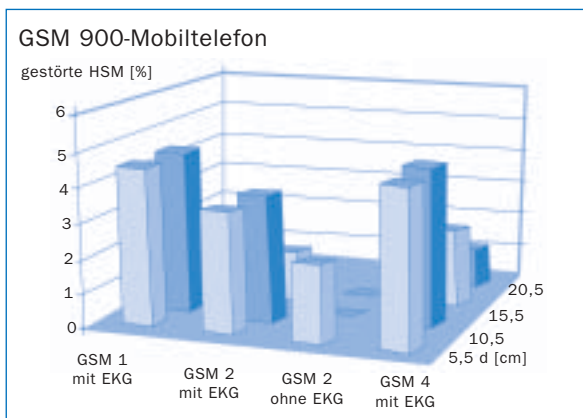


Bild 14: Gestörte Herzschrittmacher bei Exposition mit einem GSM900-Mobiltelefon, das vor der Brust des Benutzers platziert ist, als Funktion des Abstands zwischen Herzschrittmachergehäuse und Mobiltelefon mit dem verwendeten Störsignal als Parameter.

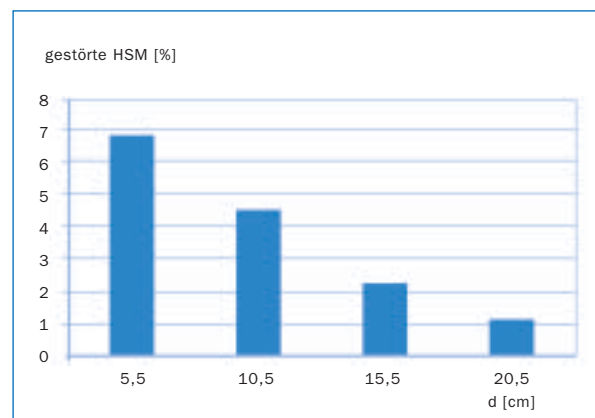



Bild 15: Gestörte Herzschrittmacher bei Exposition durch ein GSM900-Mobiltelefon, das vor der Brust des Benutzers platziert ist, als Funktion des Abstands zwischen Herzschrittmachergehäuse und Mobiltelefon.



pegel erreicht ist, ohne dass eine Beeinflussung aufgetreten ist.

Eine Herzschrittmarkerstörung wird definiert für die beiden Fälle EKG-Signal vorhanden/nicht vorhanden:

1 EKG-Signal vorhanden

In diesem Fall ist der Herzschrittmarker gestört, wenn es trotz der Inhibierungsimpulse zu einer oder mehreren Impulsabgaben während des Beobachtungszeitraums kommt.

2 EKG-Signal nicht vorhanden

In diesem Fall ist der Herzschrittmarker gestört, wenn die regelmäßige detektierte Impulsfrequenz um mehr als 10 % von der Grundfrequenz des Herzschrittmarkers während des Beobachtungszeitraums abweicht.

Zusammenführung von Kopplungsmodell und Störfestigkeitsmessungen

Auf eine separate Darstellung der Ergebnisse der Störfestigkeitsmessungen wird verzichtet. Statt dessen erfolgt direkt eine Gesamtbewertung unter Berücksichtigung der Ergebnisse des Kopplungsmodells.

Es zeigt sich, dass die achtundachtzig untersuchten Herzschrittmarker mit Ausnahme einer Exposition durch GSM-Mobiltelefone im 900 MHz-Bereich nicht gestört werden können. Störungen sind insbesondere bei GSM1800- und UMTS-Mobiltelefonen nicht zu erwarten. Für GSM- und UMTS-Basisstationen können Störungen bei Einhaltung der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung nach EG/519/1999 [11] generell ausgeschlossen werden.

Eine Überlagerung von GSM- und UMTS-Störsignalen führt nicht zu einer Änderung des Störverhaltens der Herzschrittmarker. Dies bedeutet, dass eventuelle Störungen ausschließlich durch GSM-Mobiltelefone bei 900 MHz verursacht werden.

Bei der Exposition durch GSM900-Mobiltelefone sind in einer realen Telefoniersituation, bei der das Endgerät am Kopf des Benutzers positioniert ist, keine Störungen zu erwarten. Hierbei spielt es keine Rolle, auf welcher Kopfseite sich das Endgerät befindet.

Bei der Exposition durch GSM900-Mobiltelefone können vereinzelt Störungen auftreten, wenn das Endgerät vor der Brust des Benutzers auf der Herzschritt-

macherseite positioniert wird. Bild 14 zeigt die in diesem Fall gestörten Geräte als Funktion des Abstands zwischen Herzschrittmarkergehäuse und Mobiltelefon mit dem untersuchten Störsignal als Parameter. Sämtliche gestörten Herzschrittmarker sind älteren Datums und vor mindestens zehn Jahren erstmalig in Verkehr gebracht worden. In Bild 15 sind die bei Exposition durch ein GSM900-Mobiltelefon gestörten Herzschrittmarker – bei Berücksichtigung aller GSM-Störsignale – als Funktion des Abstands zwischen Herzschrittmarker und Mobiltelefon aufgeführt. Wie zu erwarten, nimmt die Anzahl der gestörten Herzschrittmarker mit wachsendem Abstand ab.

Probandenuntersuchungen

Zur Validierung der durchgeführten Simulationen und leitungsgebundenen Messungen werden abschließend insgesamt 8 Probanden mit dem Herzschrittmarkertyp Sorin Elect XS Plus untersucht. Die Festlegung auf den Schrittmachertyp erfolgt anhand der leitungsgebundenen Störfestigkeitsmessungen, bei denen sich dieser Herzschrittmarker als empfindlich herausgestellt hat. Außerdem handelt es sich bei diesem Herzschrittmarker um ein Gerät aus dem aktuellen Vertriebsprogramm des Herstellers.

Die Untersuchung fand in der Inneren Abteilung I, Unstrut-Hainich-Kreiskrankenhaus, Mühlhausen statt. Die Empfindlichkeit der Herzschrittmarker beträgt in allen Fällen 2 mV und wird je nach Bedarf vor Beginn der Untersuchung umprogrammiert. Zwei Herzschrittmarker sind unipolar und sechs Herzschrittmarker bipolar programmiert. Die Testergebnisse werden anhand einer fortlaufenden 3-Kanal-EKG-Aufzeichnung ermittelt. Als Mobilfunkgeräte kommen die Modelle G60 von Panasonic und U15 von Siemens zum Einsatz. Die Geräte werden mit dem Basisstationssimulator CMU200 von Rohde & Schwarz bei maximaler Ausgangsleistung betrieben und werden bei den Messungen direkt vor dem Herzschrittmarker des Probanden positioniert. Hierzu wird das GSM-Gerät G60 bei 900 MHz im Kanal 38 betrieben, wobei die GSM-Störsignale 1 und 2 verwendet werden. Das Gerät U15 sendet im UMTS-Betrieb auf dem Kanal 9750. Der Betrieb erfolgt mit dem UMTS-Störsignal 1 – wobei die



Pegelschwankung aufgrund der schnellen Leistungsregelung bei 2 dB liegt – und einem UMTS-Störsignal ohne Leistungsregelung.

Es zeigt sich, dass bei 50 % der untersuchten Probanden Herzschrittmacherstörungen bei Verwendung des GSM900-Mobiltelefons auftreten, bei UMTS werden keinerlei Störungen beobachtet. Für GSM900 treten die Störungen sowohl bei bipolarer als auch bei unipolarer Programmierung auf. Außerdem kann festgehalten werden, dass sich die GSM900-Störungen auf Stimulationen bei Vorliegen eines natürlichen EKGs konzentrieren. In einem Fall wird aber auch eine ausbleibende Stimulation bei Vorliegen eines Herzschrittmacher-EKGs als Störung beobachtet. In sämtlichen Fällen verschwindet die Störung, wenn das Mobiltelefon wenige Zentimeter vom Herzschrittmacher entfernt wird.

Die beobachteten Störungen bei 50 % der untersuchten Probanden zeigen, dass sich der Herzschrittmacher für das untersuchte Störszenario im Grenzbereich zwischen gestörtem und ungestörtem Betrieb befindet. Das Störverhalten hängt dann im wesentlichen von den physiologischen Gegebenheiten ab, insbesondere der Implantationstiefe des Herzschrittmachers.

Dass sich dabei die beobachteten Störungen auf GSM900 konzentrieren und für UMTS keinerlei Störungen auftreten, entspricht exakt den Ergebnissen aus Kopplungsmodell und leitungsgebundenen Störfestigkeitsmessungen.

Dr. Achim Bahr, IMST GmbH, Kamp-Lintfort

Literatur

- [1] ANSI/AAMI PC69:2000. Active implantable medical devices—Electromagnetic compatibility—EMC test protocols for implantable cardiac pacemakers and implantable cardioverter defibrillators.
- [2] DIN EN 50061/A1 (VDE 0750 Teil 9/A1):1996-07. Sicherheit implantierbarer Herzschrittmacher – Schutz gegen elektromagnetische Störungen; Deutsche Fassung EN 50061:1998/A1:1995.
- [3] E DIN VDE 0848-3-1 (VDE 0848 Teil 3-1):2002-05. Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern – Teil 3-1: Schutz von Personen mit aktiven Körperhilfsmitteln im Frequenzbereich 0 Hz bis 300 GHz.
- [4] EN 45502-2-1:2003. Active Implantable Medical Devices – Part 2-1: Particular requirements for active implantable medical devices intended to treat bradyarrhythmia (cardiac pacemakers).
- [5] S. Gabriel, R. W. Lau, C. Gabriel. The dielectric properties of biological tissue: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. *Phys. Med. Biol.*, 2271-2293, 1996.
- [6] V. Hansen, T. Vaupel. Numerische Berechnung der Eingangsimpedanz von Herzschrittmachern durch einen externen Dipol am Herzschrittmachereingang erzeugten Störspannung. Newsletter Edition Wissenschaft der Forschungsgemeinschaft Funk e.V., 9-22, 1996.
- [7] H.-J. Meckelburg, K. Jahre; K. Matkey. Störfestigkeit von Herzschrittmachern im Frequenzbereich 30 kHz bis 2,5 GHz. Newsletter Edition Wissenschaft der Forschungsgemeinschaft Funk e.V., 1-43, 1996.
- [8] J. Streckert, H. Ndoumbè Mbonjo Mbonjo, A. Bitz, V. Hansen. Ein UMTS-Testsignal für bio-elektromagnetische Experimente. Newsletter 3 01 der Forschungsgemeinschaft Funk e.V., 11-17, 2001.
- [9] URL: <http://www.brooks.af.mil/AFRL/HED/hedr/hedr.html>, 1999.
- [10] URL: <http://www.bmwabund.de/Navigation/Wirtschaft/Telekommunikation-und-Post/mobilfunk.did=65474.html>, 2005.
- [11] Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz – 300 GHz) – (1999/519/EG). Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften vom 30.07.1999, L 199/59- L 199/70.