

Bericht vom Workshop

„Biologische und biophysikalische Forschung zu extremen Nieder- und Funkfrequenzen“

1) Anwendung von Forschungsergebnissen auf Frequenz- und Modulationsmuster gegenwärtiger und künftiger drahtloser Technologien und 2) Demodulation in biologischen Systemen

4.-5. Dezember 2000

Bad Münstereifel

Vorgelegt von den Bericht-
erstatlern **Dr. Roland Glaser,**
Dr. Christopher Portier und
Dr. Asher Sheppard. Wir
danken **Dr. Kenneth Foster,**
Dr. William Pickard und
Dr. Bernard Veyret für ihre
hilfreichen redaktionellen
Anmerkungen.

Kurze Zusammenfassung

Der Workshop stand unter der Frage-
stellung: „Kommen ähnliche biologische
Effekte im gesamten Spektrum der – in
der modernen drahtlosen Kommunikation
– genutzten Frequenz- und Modulations-
typen vor oder erzeugen spezielle Signale
spezifische biologische Effekte?“ Der ra-
sante technische Wandel in der drahtlosen

Kommunikation und die zunehmende Ex-
position der Menschen gegenüber tech-
nisch erzeugten Radiofrequenzfeldern (RF)
geben der alten Frage nach der Natur bio-
logischer Effekte von RF-Exposition zu-
sätzlichen Nachdruck. Die Möglichkeit,
Kenntnisse aus biologischer Forschung auf
breiter Basis anzuwenden, anstatt spezifi-
sche Tests für jeden Signaltyp durchzu-
führen, wird als „Übertragbarkeit“ bezeich-
net. Der Workshop beschäftigte sich im
Einzelnen mit den Fragen, ob

- 1) biologische Systeme auf die Modula-
tion eines RF-Feldes reagieren
- 2) die Forschungsergebnisse zu nieder-
frequenten (ELF) Feldern relevant sind für
ELF-modulierte RF-Felder und
- 3) die Resultate, die während eines be-
stimmten Modulationsmusters erzielt wur-
den, auch für andere Muster relevant sind.

Die internationale Wissenschaftlergrup-
pe, die am Workshop teilnahm, stimmt



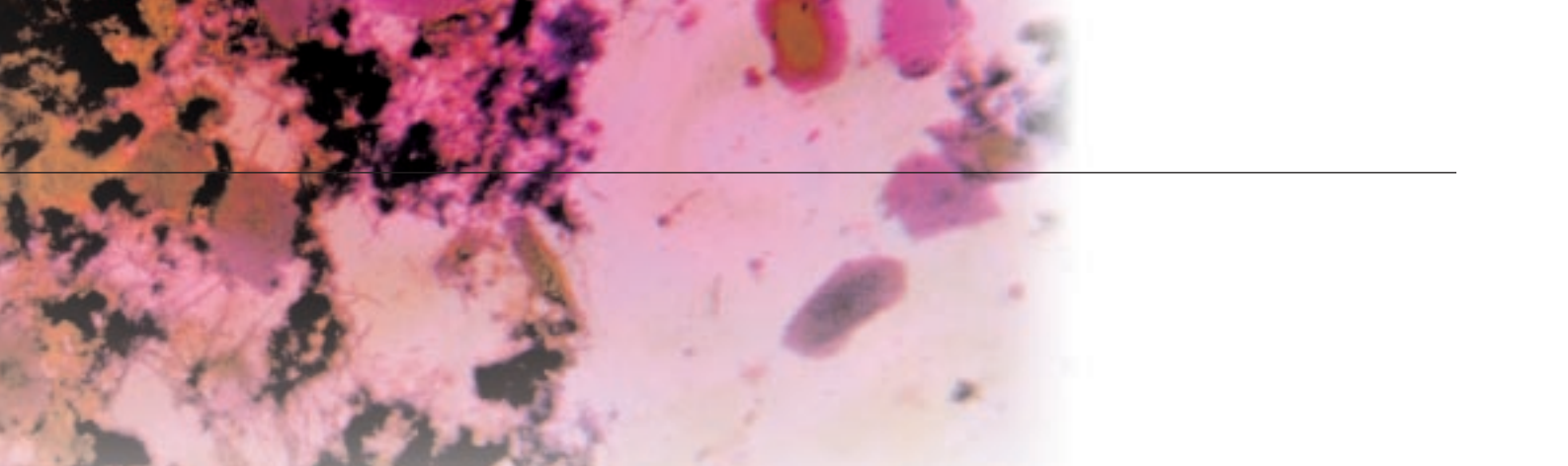
darin überein, dass der Schlüssel zur Übertragbarkeit in den Mechanismen der Interaktion zwischen RF-Feldern und biologischen Systemen zu finden sein müsste.

Ein Forschungsmodell zur Etablierung von Übertragbarkeit ist das Bilden von Hypothesen für künftige biologische Forschung zur Modulation, orientiert an Mechanismen der physikalischen Interaktion elektromagnetischer Felder (EMF) mit biochemischen und biologischen Systemen. Mit „Mikrodosimetrie“ bezeichnet man ein wichtiges Thema in der Erforschung physikalischer Mechanismen, die in Form biophysikalischer Analysen, gestützt auf dielektrische Theorien, Effekte auf biologische Zellen, Zellmembranen und subzelluläre Einheiten quantifiziert. Für in der drahtlosen Kommunikation gebräuchliche Frequenzen oberhalb von näherungsweise 10 MHz gibt es keine Anhaltspunkte dafür, dass ELF elektrische und magnetische Felder (ELF-EMF) in biologischen Systemen als Ergebnis einer direkten Demodulation modulierter RF elektromagnetischer Felder (RF-EMF) in biologisch signifikanter Größenordnung produziert werden. Darüber hinaus weisen die Mechanismen, die bei Exposition in einem ELF-Feld biologische Effekte produzieren, Tiefpass-eigenschaften auf und sind bei RF-Frequenzen nicht signifikant. Insofern zeigen physikalische Grundbegriffe auf, dass die umfangreiche Literatur zu Studien, die bei Versorgungsfrequenzen durchgeführt wurden (50 und 60 Hz) nicht unmittelbar auf RF-EMF übertragbar sind. Dennoch weisen die Teilnehmer darauf hin, dass Forschungsstrategien, die in der Durchführung von ELF-EMF-Forschungsprogrammen entwickelt wurden, einen wertvollen Orientierungsrahmen für die RF-EMF-Forschung bieten könnten.

Ein alternatives RF-EMF-Forschungsmodell legt den Schwerpunkt auf die unmittelbare Untersuchung von Einzelphänomenen. Diese Perspektive betont die Bedeutung epidemiologischer Forschungsarbeiten und Studien an Labortieren in Exposition zu spezifischen Geräteeigenschaften in spezifischen Expositionsszenarien. Der Orientierung an physikalischen Mechanismen wird ein geringerer Stellenwert zugemessen als der Klärung offener Fragen im unmittelbaren Rückgriff auf gesundheitliche Erfahrungen von Menschen und Laborforschung an Tieren. Verallgemeinerungen im Sinne einer Übertragbarkeit werden hier aus phänomenologischen Datensammlungen abgeleitet und greifen erst an zweiter Stelle auf mechanische Modelle zurück. Ebenso stützen sich Risikoabschätzungen zu bestimmten RF-Expositionsmodi sowohl auf Literaturstellen als auch auf Schlussfolgerungen aus der Forschung zu Interaktionsmechanismen. Solch eine Forschung kann nützlich sein, um zu bestimmen, welche Expositionsparameter (aus einer unendlichen Anzahl potentieller Parameter) signifikant sind. Dieses Forschungsmodell erlaubt es zwar nicht, auf eine Vielzahl von Tests für jeden der verschiedenen Modi der RF-Exposition zu verzichten, das Vertrauen in Forschungs- und Interaktionsmodelle kann sich jedoch mit der Zeit festigen und dazu führen, dass Regeln der Übertragbarkeit festgelegt werden könnten.

I. Hintergrund und Ziele des Workshops

Anzahl und Variationsbreite von Funktechnologien haben in den letzten Jahren dramatisch zugenommen. Neben den existierenden Mobiltelefonsystemen, die FM, TDMA (GSM), CDMA und andere Modulationstechniken nutzen, sind unter den



neuen Technologien besonders UMTS-Zellularetelefone und Bluetooth-Geräte für das lokale drahtlose Netzwerk und Datenübertragung hervorzuheben. Gleichzeitig besteht ein Interesse an biologischer Forschung zur Abschätzung potentieller Gesundheitsgefährdungen durch radiofrequente elektromagnetische Felder (RF-EMF). Allerdings wäre eine unbeschränkte Anzahl von Studien erforderlich, wenn jedes Modulationsmuster umfassend in einer Testreihe untersucht würde. Eine breite experimentelle Datensammlung zeigt Risiken aus akuter und chronischer Exposition nur dann auf, wenn der Körper oder lokales Gewebe erwärmt werden, typischerweise erst bei einer Temperaturerhöhung um mehrere Grad. Es liegt auch eine Fülle von Material mit ungesicherten Indizien für biologische Effekte unter Expositionsbedingungen vor, die – mehr oder minder gesichert – keine signifikante Erwärmung verursachen. Zu guter Letzt liegen Daten vor, die zwar modulationsspezifische Effekte belegen, jedoch keinen direkten Beweis für modulationsspezifische schädliche Effekte liefern. Allerdings vollzieht sich die rasante Expansion der drahtlosen Kommunikation zu einem Zeitpunkt, da die Bestimmung aller Kategorien potentieller Gefährdungen unvollständig ist und es den Anschein hat, dass es nicht machbar ist, durch Einzeluntersuchungen zu allen Wellenformen und Gerätemodellen einen erschöpfenden Beweis für ihre Sicherheit vorzulegen.

Der Workshop befasste sich mit der „Übertragbarkeit“, dem Transfer biologischer Forschungserkenntnisse auf die verschiedenen Frequenz- und Modulationstypen, die für die moderne Funkkommunikation charakteristisch sind. Thema war die biologische Signifikanz codierter niederfrequenter Signalkomponenten in Funk-

signalen im Lichte normaler Nerven- und Muskelaktivitäten, die niederfrequente elektrische Aktivität im Spektrum von wenigen Hertz bis zu mehreren tausend Hertz im Körper erzeugen. Der Workshop untersuchte vorliegende biophysikalische und biologische Informationen auf die Hypothese hin, dass biologische Systeme durch direkte Demodulation oder andere Mechanismen auf modulierte Radiofrequenzsignale reagieren.

Drei Hauptfragen standen im Zentrum des Workshops:

- Können biologische Systeme auf modulierte Funkwellen reagieren?
- Sind Resultate aus Forschungen zu extrem niederfrequenten Feldern (ELF) relevant für das RF-Spektrum („Übertragbarkeit von ELF auf RF“)?
- Sind Resultate aus biologischen Forschungen mit nur einem Modulationsmuster relevant für andere Modulationen und andere Trägerfrequenzen („Übertragbarkeit von Modulationsmustern“)?

Der Erhalt definitiver Antworten auf diese Fragen würde ein systematischeres Verständnis der Mechanismen von Feldeinwirkungen auf biologische Systeme und damit vergangener und künftiger RF-Forschung führen. Dadurch würden wiederum Abschätzungen von Gesundheitsgefährdungen für aktuelle und in Entwicklung befindliche Funktechnologien verlässlicher und diese sowohl von der Wissenschaft als auch von der Öffentlichkeit besser angenommen werden.

42 geladene Fachleute aus Europa und den Vereinigten Staaten besuchten die Konferenz, die aus Vorträgen 12 Fachberichte und mehreren ausführlichen Diskussionsveranstaltungen bestand. Veranstaltet wurde der Workshop von der Forschungsgemeinschaft Funk in Zusammenarbeit mit der Berufsgenossenschaft für

Elektrotechnik und Feinmechanik sowie von COST 244bis (einem wissenschaftlichen Komitee der Europäischen Union, aktiv im Bereich wissenschaftlich-technischer Forschung mit dem Schwerpunkt biomedizinische Effekte elektromagnetischer Felder).

2. Programm und Ablauf des Workshops

Zu Beginn gab H. Hirsch (Dortmund) einen Überblick über aktuelle und entstehende Techniken drahtloser Kommunikation, einschließlich ihrer Signalcharakteristika und der Stärke und Dauer der Exposition.

Das Thema „Sind Forschungsergebnisse aus dem ELF-Bereich auf den Radiofrequenzbereich übertragbar?“ wurde durch sieben Präsentationen und Diskussionen unter der Leitung des Moderators C. Portier, Research Triangle Park (USA) abgedeckt. Die Redner und Titel der Vorträge waren:

- „Etablierte und vermutete Mechanismen der Interaktion bei Radiofrequenzen“, K. Foster, Philadelphia (USA)
- „Studien zu Effekten von ELF und nicht-thermischer, modulierter Radiofrequenz auf Biomoleküle und subzelluläre Brüche“, S. Johnston, London
- „Studien zu Effekten auf der zellularen und Gewebesebene“, B. Veyret, Bordeaux (Frankreich)
- „Studien zu Effekten von ELF und nicht-thermischer, modulierter Radiofrequenz auf der zellularen und Gewebesebene“, R. Meyer, Bonn
- „Studien zu Effekten von ELF und nicht-thermischer, modulierter Radiofrequenz auf Tiere“, A. Lerchl, Münster
- „Studien zu Effekten von ELF und nicht-thermischer, modulierter Radiofrequenz auf den Menschen“, U. Bergqvist, Linköping (Schweden)

- „Grenzen und grundlegende Probleme der Forschung zu nicht-thermischen biologischen Effekten von LF und RF-EMF und die Erkennung demodulierter Signale bei Auftreten von Hintergrundgeräuschen physiologischen Ursprungs“, M. Swicord, Ft. Lauderdale (USA).

Die Veranstaltungen im Rahmen des zweiten zentralen Themas: „Können biologische Systeme Radiofrequenzsignale demodulieren?“, wurden von C. Davis, College Park (USA), moderiert. Folgende Vorträge wurden gehalten:

- „Biophysikalische Mechanismen der Demodulation“, J. Silny, Aachen
- „Nicht-Linearität in biochemischen und biologischen Funktionen; Implikationen für die Demodulation“, J. Weaver, Cambridge (USA)
- „Membranmodelle für Interaktionen mit modulierten Feldern“, G. d’Inzeo, Rom
- „Laborstudien zur Demodulation durch biologische Zellen und Gewebe“, W.F. Pickard, St. Louis (USA).

Im Rahmen dieses Themenkomplexes leitete A. Sheppard, Redlands (USA), eine Diskussion über ein jüngstes Ergebnis der Mikrodosimetrie (Berechnung der RF-Feldstärken in der Zellmembran) sowie über Belege und Theorie, die sich auf die Hauptformen der Modulation anwenden lassen.

B. Veyret, Bordeaux, leitete die abschließende Sitzung und gab eine Reflexion über die Leitgedanken und Diskussionen des Workshops und versuchte, die verschiedenen theoretischen Modelle sowie die Erfordernisse künftiger Forschung zu bewerten.

3. Leitgedanken der Vorträge und Diskussionen

Technische Eigenschaften aktueller und entstehender Technologien

Eine ganze Bandbreite von Modulationsarten- und -techniken sind im alltäglichen Gebrauch oder aber in Planung. Die Anzahl der RF-Energiequellen und Modulationstechniken wird sich in Zukunft erwartungsgemäß noch erhöhen. Beispiele dafür sind „Bluetooth“-Geräte (basierend auf der Time Division Duplex Division und Frequenz-Hopping-Technik), das Digitalradio und digitale Fernsehübertragung (basierend auf dem Coded Frequency Division Multiplexing und verschiedenen Phasenmodulationen in Bändern), die Zellulartelefonie (basierend auf Puls-, Phasen- und Amplitudenmodulationen für Digitalsysteme und Frequenzmodulation für Analogsysteme), schnurlose Geräte für Computer und Unterhaltungselektronik und Radar zur Unfallverhütung in Autos.

Sind Forschungsergebnisse zu niederfrequenten Feldern relevant für das RF-Spektrum?

Die meisten Teilnehmer kannten keine derzeit vorliegende Theorie, die eine Übertragung von Befunden zu ELF-EMF auf RF-EMF stützen würde. Niemand äußerte Zweifel an der Schlussfolgerung, dass eine Exposition in amplitudenmodulierten RF-Feldern im Frequenzbereich von Mobiltelefonen aller Wahrscheinlichkeit nach keine biologisch signifikanten niederfrequenten elektrischen Felder in den Zellmembranen oder anderswo in bio-

logischen Systemen erzeugt. Diese Ansicht basiert auf der biophysikalischen Theorie und in begrenztem Umfang auf ergänzenden experimentellen Daten. Insofern haben Resultate aus Forschungen zu biologischen Effekten von ELF-EMF aller Wahrscheinlichkeit nach auch keine unmittelbare Relevanz für Expositionen in RF-EMF.

Liegen experimentelle Beobachtungen vor, die deutlich belegen, dass modulierte RF-Felder im Gegensatz zu unmodulierten Feldern spezifische biologische Effekte haben?

Eine Fülle von Daten zeigt, dass modulierte RF-Felder großer Intensität biologische Effekte haben und dass Modulation ein wichtiger Faktor ist (man nehme zum Beispiel die Studien zu Mikrowellenhören). Dies hat jedoch keine unmittelbaren Konsequenzen für niederenergetische RF-Signale, die typischerweise in Kommunikationssystemen genutzt werden.

Ogleich eine Reihe von experimentierenden Forschern von Effekten berichtet haben, die von Amplitudenmodulation bei RF-Exposition niedriger Intensität abhängig sind („nicht-thermische“ SARs unterhalb der Expositionsgrenzwerte von ICNIRP, ANSI/IEEE und anderen), bleiben diese Effekte auf spezielle In-vitro-Systeme beschränkt und liefern keine Modelle, die sich auf die verschiedenen Typen der Amplitudenmodulation übertragen lassen. Ein Teil der Experimente konnte zwar mit Erfolg in unabhängigen Labors wiederholt werden, andere jedoch nicht, und die Frage, ob Modulation wichtig für biologische

Effekte ist, bleibt offen. Viele Teilnehmer betonten, dass etablierte gesundheitsgefährdende Effekte von RF-Feldern des Typs, der von Kommunikationssystemen genutzt wird (gepulst und ungepulst), lediglich in Zusammenhang mit exzessiver Erwärmung beobachtet werden. Diese und andere Teilnehmer sprachen von der Notwendigkeit weiterer Forschungsdaten, die sich speziell auf modulierte RF-Felder im allgemeinen und neuen Technologien im besonderen beziehen.

Welches sind die belegten und welches die potentiellen Mechanismen der Demodulation in biologischen Systemen?

Mehrere Mechanismen wurden hinsichtlich der Möglichkeit vereinzelter biologischer Reaktionen auf Amplitudenmodulation und Pulsmodulation, die als ein Typus der Amplitudenmodulation gelten kann, erörtert.

Können biologische Systeme modulierten RF-Feldern ein niederfrequentes Signal entziehen? Auf der Suche nach einer Antwort auf diese wesentliche Frage konnten die Teilnehmer keine biologische Struktur identifizieren, die in vorhandenen und entstehenden drahtlosen Technologien genutzte RF-Signale demodulieren und auf diese Weise ELF-Felder auf einer biologisch signifikanten Ebene erzeugen könnten. Identifizierte nicht-lineare Interaktionsmechanismen müssen Reaktionen in der Trägerfrequenz des Feldes nach sich ziehen, und diese nehmen dramatisch ab bei Frequenzen, die höher sind als ein paar Kilohertz, und werden extrem ineffektiv bei Funkfrequenzen. RF-Felder induzieren Veränderungen des Membranpotentials bis zum Gigahertzbereich, doch die Potentialänderungen sind sehr klein oberhalb der Zellausschaltfrequenz (cell cut off), was im niederen Megahertzbereich sehr typisch ist. Biologische Studien zeigen, dass sich die

maximale Frequenz, bei der Demodulation in Zellpräparaten gemessen werden kann, um 10 MHz bewegt. Bei dieser Frequenz ist der Prozess extrem unwirksam. Eine Überprüfung der biophysikalischen Theorie und Experimente zeigte, wie wenig wahrscheinlich es ist, dass die identifizierten nicht-linearen Wechselwirkungen in biologischen Systemen Felder in biologisch signifikanter Größenordnung hervorrufen (durch physikalische Demodulation von durch Kommunikationstechniken geringer Leistung im Körper induzierter RF-Felder).

Eine Überlegung ist, dass biologische Strukturen bei Frequenzen oberhalb von 10 MHz eine Form der Demodulation fördern können. Dies als Folge der Beobachtung, dass biologische Systeme thermodynamisch offen sind, weit entfernt von thermodynamischem Gleichgewicht operieren und durch nicht-lineare dynamische Reaktionen gekennzeichnet sind. Das führte zu der Annahme, dass es nicht-lineare dynamische Reaktionen auf RF-Felder geben könnte. Diese Annahme wurde bisher nicht kritisch evaluiert oder experimentell überprüft und bleibt deshalb Spekulation. Darüber hinaus haben Kritiker darauf hingewiesen, dass natürliche Dämpfungsmechanismen nicht-lineare dynamische Effekte verhindern.

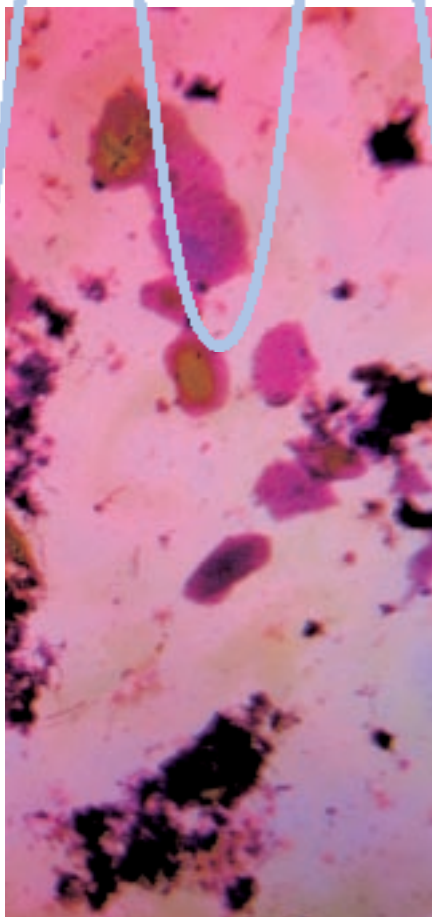
Eine andere Annahme lautet, dass Demodulation durch einen direkten, zeitlich variierenden Einfluss auf laufende biochemische Reaktionen eintreten könnte. In diesem Falle wären die Modulationsmuster von Bedeutung, da rasche Variationen in der RF-Energie die Raten molekularer und supramolekularer chemischer Reaktionen beeinflussen könnten. Reaktionen, die Kalzium-Ione einbeziehen, könnten beispielsweise von sinusförmiger oder gepulster Modulation in ELF-Frequenzen beeinflusst werden. Solche Spekulationen

konnten noch nicht zu einer Theorie ausgebaut werden, die kritischer Überprüfung unterzogen werden kann.

Die Teilnehmer kamen zu der Ansicht, dass eine Frequenzmodulation (FM) mit einem Frequenzwechsel, der einen geringen Prozentsatz der Trägerfrequenz umfasst, aller Wahrscheinlichkeit nach keine Veränderungen der biologischen Reaktionen auf RF-Felder bewirkt.

Wie könnte die Übertragbarkeit jeweils von thermischen und nicht-thermischen Effekten beeinflusst werden?

Obgleich es verschiedene Definitionen des Begriffs „thermisch“, „athermisch“ und „nicht-thermisch“ gibt, beinhaltet ein thermischer Effekt gewöhnlich eine biochemische oder physiologisch signifikante Temperaturerhöhung beispielsweise durch eine Beeinflussung biochemischer temperatursensibler Reaktionsraten. Thermoregulative Reaktionen und (bei hohem Expositionsgrad) physiologischer Stress treten ein, wenn die Körpertemperatur hinreichend erhöht wird. Das Mikrowellenhören jedoch ist ein Beispiel für einen thermischen Effekt, der bei einem nicht messbar geringen Temperaturanstieg eintritt und von der Rate der Temperaturänderung abhängt. Auf niedrigerem Niveau führen „athermische“ Expositionen zu signifikantem Wärmefluss sowie möglichen thermoregulativen Effekten, obgleich die Veränderungen der Körpertemperatur gering oder nicht festzustellen sind. Dennoch sind schwächere Expositionen „nicht-thermisch“, da Wärmefluss und Temperaturänderungen so gering sind, dass weder biochemische noch physiologische Effekte feststellbar sind. Ein Diskussionsteilnehmer brachte zum Ausdruck, dass dieser Aspekt bislang weder experimentell noch theoretisch angemessen berücksichtigt worden sei und dass es keine klare Definition gebe, was thermische bzw.



nicht-thermische Expositionen konstituieren, wenn man es mit Einbringen von reiner Nettoenergie in ein biologisches System zu tun habe und der Vielfalt und Komplexität biochemischer Reaktionen in biologischen Systemen gerecht werden wolle.

Die Diskussion zeigte das bestehende Interesse an zusätzlichen quantitativen Studien zu lokaler Erwärmung und Energietransport, der ohne signifikante Temperaturgradienten vor sich geht. Untersuchungen im Millimeter- und mikroskopischen Maßstab (manchmal als „Mikrodosimetrie“ bezeichnet) sind immer noch selten im Vergleich zu makrodosimetrischen Studien zu externen Feldern, die auf der anatomischen Ebene auf den Körper einwirken. Die zeitliche und räumliche Natur von Temperaturgradienten auf mikroskopischer Ebene regten zu Diskussionen darüber an, ob mikroskopische „hot spots“ aufgrund unterschiedlicher RF-Absorption durch Zellmembranen, Wasserschichten und Proteine entstehen könnten. Die Teilnehmer unterstrichen, dass entsprechende Untersuchungen in der Durchführung die strengen Beschränkungen beachten sollten, die ihnen durch die zuerst in den vierziger Jahren realisierten quantitativen Studien zum Wärmetransfer auferlegt würden. Diese demonstrierten, dass die zelltypische rasche Diffusion von Wärme in Räume im Mikrometermaßstab jeden signifikanten Temperaturgradienten über mikroskopische Dimensionen für Expositionen im - unter anderem von Handkommunikationsgeräten (zB. Handys) - erzeugten RF-Feld-Typus ausschließt. Niemand widersprach der Auffassung, dass qualitative Diskussionen nicht ausreichen, um die Annahme zu evaluieren, dass ein rascher Energietransfer im subzellularen und molekularen Bereich als ein möglicher Mechanismus von RF-Feldinteraktio-

nen interpretiert werden könnte. Einige Teilnehmer unterstrichen die potentielle Bedeutung dieser Annahme und befürworteten Berechnungen zu diesem Thema, andere äußerten Zweifel daran, dass angesichts rascher Temperaturequilibration im Mikrosekundenbereich biochemische oder biologische Interaktionen stattfinden könnten.

Sind erforschte Modulationsmuster relevant für andere Modulationen und andere Trägerfrequenzen („Übertragbarkeit von Modulationsmustern“)?

Einigkeit herrschte darüber, dass man von dieser Form der Übertragbarkeit, die Verallgemeinerungen und Extrapolationen der Modulationsmuster zulässt, nur dann sprechen könnte, wenn Übereinstimmung hinsichtlich der akzeptierten Mechanismen der Interaktion des Feldes mit biologischen Systemen bestünde. Gegenwärtig erfüllt nur der thermische Mechanismus die Voraussetzungen für Übertragbarkeit. Dieser Mechanismus legt nicht nahe, dass Modulation in Expositionen mit vergleichsweise durchschnittlichen SARs eine Rolle spielt. Thermische Überlegungen zeigen, dass - mit zwei Ausnahmen - Resultate aus verschiedenen Modulationsmustern äquivalent sind, wenn der gemittelte Erwärmungseffekt übereinstimmt. Die Ausnahmen gelten für Pulsungen von hoher Intensität, die eine pulsabhängige Reaktion des Gehörs („Mikrowellenhören“) hervorrufen können als Ergebnis einer kleinen Druckwelle, die auftritt, wenn das Gehirn exponierter Objekte eine plötzliche thermische Expansion erlebt, oder aber als Ergebnis einer hohen Rate von Temperaturänderungen, die zur Membrandepolarisation führen können. Diese thermische Expansion, die Feldstärken weit über den durch Nutzung drahtloser Technik produzierten Werten benötigt, erzeugt

einen zu schwachen Druck, um als Ursache schädlicher Effekte angenommen zu werden.

Was wissen wir über die Mechanismen der Interaktion zwischen RF-EMF und biologischen Systemen?

Für die Klärung der Frage von Übertragbarkeit ist eine neuerliche Überprüfung aller denkbaren Mechanismen Voraussetzung. Thermische Effekte (und Effekte, die vermutlich thermischen Ursprungs sind) wurden umfassend auf anatomischer Ebene in Tieren und menschlichen Versuchspersonen sowie in einer großen Anzahl von biologischer In-vitro-Präparaten erforscht. Die üblichen dosimetrischen Maßeinheiten für Mikrowellen, die spezifische Absorption (SA) und die spezifische Absorptionsrate (SAR) sind per se thermischer Natur, die Diskussionsteilnehmer stellten jedoch fest, dass Temperatur eine noch wesentlichere Maßeinheit thermischer Effekte ist. SAR und SA sind alternative nützliche Maßeinheiten der Exposition bei einem Fehlen messbarer Temperaturänderungen. Darüber hinaus wurde festgehalten, dass trotz vieler Versuche, biophysikalische Modelle für nicht-thermische Effekte zu entwerfen, keines experimentell verifiziert werden konnte oder von widerlegender theoretischer Kritik verschont geblieben wäre. Es wurde beobachtet, dass viele Fragen bezüglich biologischer Effekte von RF-Energie auf mikroskopischer Ebene mit der Frage zusammenhängen, ob RF-Energie einen biochemischen Einfluss hat, basierend auf dem anerkannten Prinzip, dass biochemische Veränderungen zu biologischen Effekten führen können. Fraglos wirkt sich Temperatur auf die biochemischen Reaktionen aus, dennoch sahen einige Diskutanten einen Bedarf für weitere mechanische biophysikalische Forschung über

mögliche Veränderungen zellulärer Funktionen, selbst bei im Vergleich zu normalen Fluktuationen der Körpertemperatur geringen Temperaturschwankungen.

Strategien für künftige Forschungsaktivitäten zur Erschließung wissenschaftlicher Daten und Instrumente zur Risikoabschätzung entstehender RF-Technologien

Basierend auf der Überzeugung der Workshop-Teilnehmer, dass Bedarf an weiterer Forschung zu biologischen Effekten amplitudenmodulierter (einschließlich gepulster) RF-Felder besteht, fanden explorative Diskussionen über wünschenswerte Methoden solcher Forschung statt. Die Kernfrage war, ob Forschung von unmittelbar aus der biophysikalischen Theorie abgeleiteten Hypothesen motiviert sein, ob sie sich an vorliegenden Berichten über biologische Effekte orientieren sollte oder sich stützen sollte auf das klassische toxikologische Screening-Paradigma der Umweltsicherheitsabschätzung.

Es gab wenig Zuspruch für weiterführende Forschung zu berichteten biologischen Effekten, die schwer zu wiederholen sind und nicht von der biophysikalischen Theorie gestützt werden. Die Zustimmung zu routinemäßiger Sicherheitsabschätzung fußte auf der allgemeinen Ansicht, dass Sicherheitsüberprüfungen nicht immer auf hypothesengestützte Forschung angewiesen sind, sondern sich statt dessen auf die Entwicklung eines „akzeptablen Standards“ hinsichtlich der Daten stützen können, wie es für andere Umweltfaktoren in langjährigen Prozessen bereits geschehen ist. Große Zustimmung gab es auch zu hypothesengestützter Forschung, die zu einem verbesserten Verständnis von Interaktionsmechanismen beitragen könnte. Arbeiten über die Kopplung von Feldern an molekulare und biochemische Vorgänge wurden als vielversprechender Ansatz bewertet.

Gegenstand einer Kurzdiskussion war die Annahme, dass bei hochratig gepulsten Feldern und Amplitudenmodulation des in der Breitbandkommunikation genutzten Typs (z.B. drahtlose CDMA-Telefonie) offenbar eine geringere Wahrscheinlichkeit biologischer Wirkungen besteht als bei Pulsungen niedriger Rate und sinusförmig amplitudenmodulierten Signalen. Desweiteren wurden Studien zu niedrigratig gepulsten Wellenformen für nützlicher gehalten als solche zu sinusförmiger Amplitudenmodulation. Ein Sprecher regte die Durchführung biologischer Experimente mit verschiedenen Raten bei konstanter mittlerer Leistung an.

Der Aspekt des relativen Werts von auf verschiedenen hierarchischen Ebenen durchgeführter Forschung gab den Anstoß zu Diskussionen über die verschiedenen Typen der aus epidemiologischer, toxikologischer und Laborforschung gewonnenen Informationen. Um dies zu illustrieren, wurde darauf hingewiesen, dass multizelluläre Systeme über größere Sensitivität verfügen können als einzelne Zellen, wenn auch auf Kosten der Reaktionsschnelligkeit. (Beispiele dafür sind in der sensorischen Physiologie zu finden, so wie die Elektrozepktion in bestimmten Fischen und die hochentwickelten Sinne in Tier und Mensch. Elektrozepktion ist begrenzt auf Felder mit extrem niedrigen Frequenzen und hat keine unmittelbare Relevanz für RF-Bioeffekte.)

Das hierarchische Konzept geht aus von der begrenzten Relevanz von Extrapolationen aus Daten, die auf sehr niedriger Organisationsebene gewonnen werden. Auf der anderen Seite sind Studien am Menschen sowohl durch praktische und ethische Bedenken in Experimenten als auch durch Unsicherheiten der Interpretation physiologischer Veränderungen behindert. So können vorübergehende Schwankun-

Folgerungen

gen im EEG z.B. eine gutartige biologische Reaktion sein, es ist logisch jedoch nicht möglich, einen potentielle gesundheitliche Beeinträchtigung auszuschließen. In letzter Zeit wurde von mehreren Studien zu Gehirntumoren und anderen Krankheiten bei Nutzern von mobilen Handtelefonen berichtet, andere Arbeiten sind noch nicht abgeschlossen. Allerdings geht man davon aus, dass epidemiologische Studien mit von RF-Feldern exponierten Personen in der nahen Zukunft keine abschließenden Bewertungen ergeben werden.

4. Schlussfolgerungen

- Zum gegenwärtigen Zeitpunkt läßt sich das Konzept eines Demodulationsprozesses, der in von amplitudenmodulierten RF-Feldern (wie in der Telekommunikation) exponierten biologischen Systemen ein biologisch signifikantes ELF-EMF-Feld erzeugt, weder durch eine vertretbare Theorie noch durch unmittelbare Experimente belegen.

- Das Problem der „Übertragbarkeit“ biologischer Effekte von einem Typus der Modulation auf einen anderen kann gelöst werden durch die Kenntnis der relevanten wesentlichen Interaktionsmechanismen. Dieses Wissen benötigt eine Theorie und unterstützende Daten.

- Alternativ könnte sich Übertragbarkeit aus der Entwicklung einer umfassenden Datenbank aus phänomenologischer Forschung zu jeder der zahlreichen RF-Signaltypen ableiten lassen.

- Die Auffassung, dass biologische Effekte von RF-Energie durch Erwärmung verursacht werden, ist weithin anerkannt. Diese Auffassung geht aus von einer gewissen Übertragbarkeit verschiedener RF-Bioeffekt-Studien und von der Annahme, dass die mittlere SAR (und nicht spezifische Charakteristika der Wellenform; die

wesentliche dosimetrische Quantität) von biologischer Relevanz ist. Hier treffen jedoch kontroverse Standpunkte aufeinander, insofern Erwärmung zwar bei hoher Leistung beobachtete Effekte erklären kann, offenbar aber nicht Effekte, die bei niedriger Leistung berichtet werden. Häufig besteht Uneinigkeit hinsichtlich der Verlässlichkeit solcher Effekte aufgrund widersprüchlicher Daten oder fehlender unabhängiger experimenteller Bestätigung.

- Weitere Forschung ist erforderlich zu der Frage, ob modulierte Felder, einschließlich gepulster Felder, im Vergleich zu nicht-modulierten Feldern verschiedene Effektivitätsgrade aufweisen.

- Es bedarf weiterer Forschung zur Mikrodosimetrie, die die dielektrische Theorie auf Zellen und subzelluläre Einheiten anwendet, um zu neuen Einsichten bezüglich der Annahme zu gelangen, dass RF-Energie bei einem Ausbleiben genereller Temperaturänderung in mikroskopischen Dimensionen und Zeiträumen im Bereich von Submikrosekunden biochemische Prozesse beeinflussen könnte. Dennoch fordert uns die vorliegende Forschung zum Wärmetransport in mikroskopischen Dimensionen mit der Frage heraus, wie RF-Energie, die auf der mikroskopischen Ebene keine signifikanten Temperaturgradienten einführen kann, biologisch relevant sein könnte.

Anmerkung:

- (1) FM, = Frequenzmodulation;
- (2) TDMA = Time Domain Multiple Access;
- (3) GSM = Global System for Mobile Communications;
- (4) CDMA = Code Domain Multiple Access;
- (5) UMTS = Universal Mobile Telecommunications System;
- (6) Bluetooth steht für einen drahtlosen Verbindungsstandard mit niedriger Leistung und Bandbreite, der einen Radius von etwa 10 m abdeckt.
- (7) RF = Radio Frequency (im deutschen Sprachgebrauch Hochfrequenz)
- (8) SAR = Spezifische Absorptionsrate