Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

http://www.ssk.de

Vorschlag zur Weiterentwicklung der Forschung zum Schutz vor nichtionisierenden Strahlen

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 151. Sitzung am 11./12. Februar 1998
Veröffentlicht in: – Bundesanzeiger Nr. 145 vom 07. August 1998
– Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 44

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 4

2 UV-Strahlung 4

2.1 Allgemeine Gesichtspunkte 4

2.2 Biologische Wirkung von UV-Strahlung / Molekulare Mechanismen der Hautkrebsentstehung 5

2.3 Chemische und physikalische Schutzfaktoren 6

2.4 Künstliche UV-Quellen: Spektrale Vermessung und Bewertung 6

2.5 Standardisierung der UV-Personendosimetrie 7

2.6 Epidemiologische Untersuchungen zu Ursachen der Entstehung von Hautkrebs 8

3 Elektromagnetische Felder 8

3.1 Allgemeine Gesichtspunkte 8

3.2 Aufklärung von Mechanismen der Wirkung von NF- und niederfrequent-modulierten HF-Feldern auf zelluläre Systeme 9

3.3 Tierexperimentelle Untersuchungen zur möglichen Wirkung schwacher Felder als Copromotoren der Krebsentstehung und als mögliche Verursacher neurodegenerativer Erkrankungen 10

3.4 Physiologische und psychologische Tests zur Klärung von Einflüssen schwacher EMF auf die höhere Nerventätigkeit 10

3.5 Kritische Wertung epidemiologischer Erhebungen 10

3.6 Bestimmung der Dosisverteilung von HF-Feldern im menschlichen Körper, insbesondere im Kopfbereich 11

3.7 Untersuchungen zur Dosimetrie im Bereich von Geweben und Zellen 11

3.8 Untersuchungen zur Wirkung starker statischer Magnetfelder 11

3.9 Störbeeinflussung von Implantaten und Körperhilfen 11

4 Ultraschall 12

4.1 Allgemeine Gesichtspunkte 12

4.2 Einfluß der viskoelastischen Gewebeeigenschaften auf die Kavitationsschwelle 12

4.3 Nichtthermische und nichtkavitative biologische Ultraschallwirkungen 13

4.4 Änderung der Kavitationsschwelle durch Ultraschall-Kontrastmittel 13

4.5 Entwicklung von Meßmethoden zur Kontrolle der Einhaltung von Ultraschall-Schwellenwerten 13

5 Laserstrahlung 14

5.1 Allgemeine Gesichtspunkte 14

5.2 Erfassung der optischen Parameter unsensibilisierter und sensibilisierter lebender Haut und Modellierung der Wechselwirkungsprozesse 15

5.3 Bestimmung der Kohärenz von Laserstrahlung im Gewebe 15

5.4 Experimentelle und epidemiologische Untersuchungen zum Studium bzw. Ausschluß berufsbedingter Schäden durch Hochleistungslaser 16

1 Einleitung

Der Schutz vor nichtionisierenden Strahlen, insbesondere die Erstellung zweckmäßiger Strahlenschutzempfehlungen und -vorschriften, ist nur auf einem breiten wissenschaftlich-technischen Fundament möglich. In dem weit gespannten Themenspektrum von der Erfassung der Strahlenexposition des Menschen über die Analyse der biologischen Strahlenwirkungen bis hin zu dem Schutz vor Schäden hat die bisherige Forschung Erkenntnisse erbracht, aus denen Handlungsanweisungen für den Strahlenschutz ableitbar sind[1]. Bei vielen Fragen erweist sich aber noch eine Vertiefung und Erweiterung der wissenschaftlich - technischen Grundlagen durch Forschung als notwendig.

Die Strahlenschutzkommission (SSK) hat zuletzt im Jahre 1991 Vorschläge zur weiteren Entwicklung des Strahlenschutz-Forschungprogramms des BMU auch auf dem Gebiet der nichtionisierenden Strahlungen erarbeitet. Die vorliegende Empfehlung ist eine Fortschreibung dieser Vorschläge. In den zurückliegenden Jahren sind neue Themenbereiche der Strahlenschutzforschung im Bereich der nichtionisierenden Strahlen erkennbar geworden, die hier berücksichtigt wurden.

Die empfohlenen Forschungsschwerpunkte betreffen die Themenbereiche UV-Strahlung, elektromagnetische Felder, Ultraschall und Laserstrahlung. Die nach Auffassung der SSK zu fördernden Forschungsthemen sowie die zugehörigen Begründungen sind ausführlich dargestellt.

Die SSK versteht die Liste der vorgeschlagenen Forschungsthemen als Anregung für die Themenwahl bei Anträgen auf Forschungsförderung, gleichzeitig aber auch als fachliche Unterstützung für die Begutachtung solcher Anträge. Selbstverständlich erkennt sie an, daß für eine Auftragsvergabe die Finanzierbarkeit berücksichtigt werden muß. Sie geht deshalb davon aus, daß für die Umsetzung einer möglichst großen Zahl der vorgeschlagenen Forschungsthemen eine Verbindung der nationalen mit der internationalen Forschungsförderung die beste Voraussetzung ist.

2 UV-Strahlung

2.1 Allgemeine Gesichtspunkte

Solare UV-Strahlung, die nicht durch die Atmosphäre absorbiert wird, kann in terrestrischen und aquatischen biologischen Systemen dauerhafte, irreversible Schäden erzeugen. Eine Vielzahl von Untersuchungen beweist die mutagene, kanzerogene und immunmodulierende Eigenschaft von UV-Strahlung und unterstützt so die Erkenntnis, daß die UV-Exposition ein ätiologischer Faktor bezüglich der Hautkrebsentstehung ist. Im Zusammenhang mit einer steigenden Hautkrebsinzidenz, die besonders für das maligne Melanom beobachtet wird, und einer Abnah-

---

[1] Als Beispiele seien hier folgende Empfehlungen der SSK genannt:

- Schutz vor elektromagnetischer Strahlung beim Mobilfunk
- Schutz vor niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern der Energieversorgung und -anwendung
- Schutz des Menschen vor solarer UV-Strahlung
- Empfehlungen zur Patientensicherheit bei Anwendungen der Ultraschalldiagnostik in der Medizin

me der UV-Absorption in der Ozonschicht wird die Notwendigkeit deutlich, den Strahlenschutz durch Forschung auf dem Gebiet des Schutzes vor UV-Strahlen zu unterstützen.

Um die durch UV-Strahlung hervorgerufene Gefahr strahlenhygienisch bewerten zu können, bedarf es einer detaillierten Messung und Beschreibung der auf die Erdoberfläche gelangenden UV-Strahlung, welcher der Mensch ausgesetzt ist. Zum anderen ist das Verständnis grundlegender Mechanismen eine notwendige Voraussetzung zur richtigen Bewertung der Zusammenhänge zwischen der UV-Strahlung und dem Entstehen von Hautkrebs und zur geeigneten Weitergabe der gewonnenen Informationen in Form von Schutzhinweisen an die Bevölkerung.

Aufgrund der oben genannten Problematik sind folgende Forschungsschwerpunkte zu empfehlen:

- Biologische Wirkung von UV-Strahlung / Molekulare Mechanismen der Hautkrebsentstehung.
- Chemische und physikalische Schutzfaktoren.
- Künstliche UV-Quellen: Spektrale Vermessung und Bewertung.
- Standardisierung der UV-Personendosimetrie.
- Epidemiologische Untersuchungen zu Ursachen der Entstehung von Hautkrebs.

Diese Forschungsschwerpunkte werden im folgenden erläutert.

2.2 Biologische Wirkung von UV-Strahlung / Molekulare Mechanismen der Hautkrebsentstehung

Obgleich bereits umfangreiche Untersuchungen über Wirkungsmechanismen von UV-Strahlung vorliegen, fehlen noch wichtige Voraussetzungen für eine gezielte Risikobewertung im Sinne des Strahlenschutzes. Dies betrifft insbesondere folgende Teilgebiete:

- Mechanismen der UV-induzierten Hautkrebsentstehung:

  Notwendig sind Untersuchungen auf molekularer und zellulärer Ebene in Tumorzellen und in gesunden Hautzellen im Zusammenhang mit der Entstehung von nicht melanozytärem Hautkrebs in Abhängigkeit von der kumulativen UV-Dosis und der nicht eindeutig geklärten Korrelation der UV-Exposition mit der Entstehung maligner Melanome. Diese Untersuchungen erfordern neue biologische Ansätze auf der Ebene der UV-modifizierten Genexpression. Das Gebiet befindet sich infolge der zunehmenden Einsichten in die UV-bedingte Hemmung von Tumorsuppressorgenen und die Aktivierung von Onkogenen in sehr schneller Entwicklung.

- Mechanismen der UV-induzierten Immunsuppression:

  Die UV-induzierte Immunsuppression kann dazu führen, daß entartete Zellen vom Immunsystem nicht erkannt und daher nicht zerstört werden, womit ein erhöhtes Hautkrebsrisiko verbunden ist. Darüber hinaus wird vermutet, daß individuelle Unterschiede in der Empfindlichkeit bezüglich der immunsuppressiven Wirkung von UV-Strahlen und damit im Risikofaktor zur Entstehung von Krebs bestehen. Ferner wird vermutet, daß andere genotoxische Einflüsse durch die UV-induzierte Immunsuppression verstärkt werden.

– Ausdehnung der Erforschung grundlegender Mechanismen, vor allem auf den Bereich von UV-A:

  Eine Vielzahl von Untersuchungen zeigt, daß die Wirkung von UV-A-Strahlung bisher unterschätzt wurde und daß durch indirekte Wirkung (z.B. über reaktive Sauerstoffspezies) sowohl Mutationen als auch DNA-Einzelstrangbrüche induziert werden können. Eine weitere Klärung der Wirkung von UV-A ist sowohl bezüglich des Sonnenschutzes als auch bezüglich der therapeutischen und kosmetischen Anwendung künstlicher UV-Strahlung dringend erforderlich.

2.3 Chemische und physikalische Schutzfaktoren

– Untersuchungen chemischer Schutzfaktoren; Bewertung evtl. negativer Nebeneffekte (z.B. photochemische Veränderungen von Sonnencremes):

  Bei der Verwendung von Sonnencremes kann es zu schädlichen Nebeneffekten durch photochemische Veränderungen kommen. Insbesondere sollen vergleichende Untersuchungen zwischen chemischen und auf Mikropigmenten basierenden Sonnenschutzmitteln eine Empfehlung zur Anwendung dieser Präventivmaßnahmen ermöglichen.

– Untersuchung physikalischer Schutzfaktoren:

  Bei den Empfehlungen an die Bevölkerung zum Verhalten in der Sonne spielt der textile Sonnenschutz eine wichtige Rolle. Um den Schutzfaktor von Textilien richtig einschätzen zu können, sind standardisierte Messungen notwendig, die z.B. auch die Dehnung des untersuchten Gewebes und dessen UV-Absorption im nassen Zustand (vgl. Australian/ New Zealand Standard 4399:1996, Sun protective clothing - evaluation and classification) oder photochemische Veränderungen der verwendeten Schutzmaterialen erfassen. Aufgrund derart standardisierter Messungen können als UV-Schutz geeignete Textilien empfohlen werden.

2.4 Künstliche UV-Quellen: Spektrale Vermessung und Bewertung

Neben den Risiken, die für die Bevölkerung aus einem nicht adäquaten Verhalten in der Sonne resultieren, gewinnt der Einfluß der Exposition durch künstliche UV-Strahler in Solarien bzw. durch den Einsatz künstlicher UV-Quellen in medizinischen Therapieverfahren eine wachsende Bedeutung im Rahmen der Gesamtexposition. Um die daraus resultierenden Risiken genau einschätzen zu können, ist eine spektrale Vermessung künstlicher UV-Quellen, welche zu kosmetischen und therapeutischen Zwecken eingesetzt werden, unumgänglich. Diese Messungen müssen nach einem standardisierten dosimetrischen Protokoll - nicht zuletzt unter Verwendung einheitlicher dosimetrischer Begriffe - durchgeführt werden. Mittels Kombination der dokumentierten Spektren mit spektralen biologischen Wirksamkeitsfunktionen ist es möglich, die biologische Wirkung künstlicher UV-Quellen zu bewerten. Dieses Vorgehen soll es erleichtern, durch entsprechende gesetzliche Vorgaben einen risikoarmen Umgang mit künstlichen UV-Quellen in Solarien zu erzielen. Die kontrollierte Anwendung und Weiterentwicklung therapeutischer UV-Quellen kann auf der Basis der ermittelten UV-Spektren unter Berücksichtigung der Wellenlängenabhängkeit des gewünschten Heilungseffektes im Vergleich zu derjenigen der schädigenden Wirkung wirksam unterstützt werden.

2.5 Standardisierung der UV-Personendosimetrie

Die Messung der UV-Strahlung auf der Erdoberfläche mit Hilfe der bestehenden Meßnetze bildet eine wertvolle Basis zur Bewertung der UV-Exposition des Menschen. Sie vermag aber nicht, die bestehenden hohen Expositionsschwankungen aufgrund des individuellen Verhaltens wiederzugeben. Daher ist es notwendig, an repräsentativen Personengruppen eine UV-Personendosimetrie durchzuführen. Mit ihrer Hilfe läßt sich die individuelle UV-Exposition bestimmter Bevölkerungsgruppen ermitteln, die z.B. durch das unterschiedliche Freizeitverhalten verschiedener Altersgruppen stark variieren kann. Die Messung der UV-Personendosis ist aber auch für die objektive Erfassung der beruflichen UV-Exposition (outdoor-workers) wertvoll, da diese im Zusammenhang mit UV-bedingten Berufskrankheiten Bedeutung erlangen kann. Darüber hinaus erleichtert die Kenntnis der UV-Exposition bestimmter Bevölkerungsgruppen eine gezielte Aufklärung.

Die Wirkprinzipien der bisher entwickelten UV-Personendosimeter sind unterschiedlich (photochemische bzw. biologische Dosimeter). Im Interesse der Vergleichbarkeit der Ergebnisse muß jedoch auf nationaler wie internationaler Ebene eine Standardisierung der Anforderungen an Meßempfindlichkeit, Reproduzierbarkeit, spektrale Wichtungsfunktion, spektralen Meßbereich, Kalibrierverfahren und Regeln für die praktische Anwendung geschaffen werden.

Zur Bewertung der wellenlängenabhängigen biologischen Wirksamkeit von UV-Strahlung wird oft der Einfachheit halber das von der CIE[2] vereinheitlichte Erythemwirkungsspektrum herangezogen. Da jedoch für verschiedene biologische Effekte (z.B. DNA-Schäden, Mutationen, Immunsuppression, Kanzerogenese) unterschiedliche Wirkungsspektren gelten, kann die Bewertung mit dem Erythemwirkungsspektrum unter Umständen eine unzulässige Vereinfachung darstellen. Voraussetzung für eine effektive und aussagekräftige Personendosimetrie ist daher die Erarbeitung gesicherter spektraler Wirkungsfunktionen, insbesondere für neu erkannte biologische UV-Wirkungen, wie die Aktivierung oder Hemmung von Genexpressionen. Notwendig ist aber auch die Überprüfung des Erythemwirkungsspektrums mit neueren Methoden. Diese Schritte erscheinen notwendig, um sowohl aus den Meßnetzen gewonnene Daten solarer UV-Strahlung als auch künstliche UV-Quellen zuverlässig bewerten zu können.

Zur Standardisierung der experimentellen Bedingungen ist die Entwicklung eines spektralen Sonnensimulators, z. B. „Standardsonne Deutschland“, unter Verwendung der aus den UV-Meßnetzen gewonnenen Daten erforderlich. Durch die Bereitstellung eines Standardsonnenspektrums wird es möglich, die Untersuchung biologischer Effekte oder die Messung von Sonnenschutzfaktoren bei definierter, künstlicher Sonnenbestrahlung durchzuführen. Im Vergleich zu spektral aufgelösten Untersuchungen biologischer UV-Wirkung können auf diese Weise Interaktionen zwischen den in verschiedenen Wellenlängenbereichen hervorgerufenen biologischen Wirkungen richtig erfaßt werden. Die Verwendung eines Sonnensimulators als Strahlenquelle bietet zudem den Vorteil, daß die biologischen Wirkungen in einem größeren Wellenlängenbereich in einfacher Weise erfaßt werden können.

---

[2] CIE: Commission Internationale de l’Eclairage/International Commission on Illumination

2.6 Epidemiologische Untersuchungen zu Ursachen der Entstehung von Hautkrebs[3]

– Erfassung der Inzidenz und Mortalität für alle drei Hautkrebsarten (Basalzellkarzinom, Plattenepithelkarzinom, malignes Melanom) über die Krebsregister der Bundesländer.

– Evaluierung bevölkerungsbezogener Screeningmaßnahmen:

  Auf der Grundlage der ermittelten Daten können epidemiologische Untersuchungen zur Definition von Risikogruppen in Bezug auf die Disposition (z.B. multiple Pigmentmale) und die Exposition (z.B. berufliche Exposition und Freizeitexposition) durchgeführt werden.

– Beobachtung des Sonnenverhaltens von Schulkindern bis ins Erwachsenenalter (Kohortenstudien):

  Eine solche Studie ermöglicht die prospektive Erfassung von Daten, die weiteren Aufschluß über die Zusammenhänge zwischen der UV-Exposition und der Entstehung von Hautkrebs, insbesondere des malignen Melanoms, liefern können.

– Statistische Erhebung über das Sonnenverhalten von Hautkrebspatienten und Kontrollpersonen (Fall-Kontroll-Studien).

– Entwicklung von Methoden einer molekularen Epidemiologie und Umsetzung in Screeningverfahren und Fall-Kontroll-Studien auf der Grundlage molekulargenetischer Erkenntnisse (z.B. über UV-induzierte „Signature“-Mutationen in bestimmten Genen):

  Durch ein solches Verfahren wäre eine Objektivierung der Exposition bei epidemiologischen Studien, unabhängig von oft stark fehlerbehafteten Angaben in Befragungsprotokollen, möglich.

3 Elektromagnetische Felder

3.1 Allgemeine Gesichtspunkte

Ziel der Vorhaben ist die Erforschung biophysikalischer Primärmechanismen, die eine weitere wissenschaftliche Absicherung von Grenzwerten für die Exposition der Bevölkerung in häuslicher Umgebung, in der Umwelt und am Arbeitsplatz ermöglichen sowie die Erarbeitung der wissenschaftlichen Grundlagen empfehlenswerter Schutzmaßnahmen zulassen. Dabei soll das gesamte Spektrum der elektromagnetischen Felder mit Schwerpunkt im Bereich der zivilisatorischen Anwendung Berücksichtigung finden. Auch Expositionen, verbunden mit dem Einsatz magnetischer und elektromagnetischer Felder in der medizinischen Diagnostik und Therapie, insbesondere den magnetischen Resonanzverfahren, sind zu berücksichtigen.

Obgleich der Schwerpunkt der Untersuchungen den Anforderungen des praktischen Strahlenschutzes entsprechen soll, sind Grundlagenuntersuchungen zu biologischen Primärreaktionen der Wirkung elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder erforderlich.

Die Forschung über die Wirkung elektromagnetischer Felder ist prinzipiell auf unterschiedlichen Niveaus biologischer Organisation möglich:

---

[3] vgl. auch die Stellungnahme der Strahlenschutzkommission „Ultraviolette Strahlung und malignes Melanom”, verabschiedet in der 156. Sitzung am 24. September 1998.

- Modellversuche auf molekularem und zellulärem Niveau sind geeignet für die Aufklärung von Primär-Mechanismen der Feldwirkung, weniger jedoch für die Klärung pathogener Relevanz der Effekte.
- Modellversuche an Tieren eignen sich besser für die Evaluierung eventuell pathogener Wirkung der Felder, weniger jedoch für das Auffinden von Primärmechanismen.
- Untersuchungen an Probanden eignen sich in begrenztem, durch die Ethik-Kommission festzulegendem Rahmen für die Erfassung von Kurzzeitreaktionen (EEG, EKG, Hauttemperatur, psychologische Tests etc.), erlauben jedoch ebenfalls nur schwer die Einschätzung pathogener Relevanz der gemessenen Effekte.
- Epidemiologische Studien können Hinweise über bisher nicht erkannte Gesundheitsrisiken in der Lebens- und Arbeitsumwelt von Personen geben. Ihre Vorteile liegen in der Berücksichtigung der realen, langfristigen Exposition unter Einschluß allfälliger Co-Faktoren. Für sich alleine können sie allerdings nur statistische Zusammenhänge, nicht jedoch kausale Beziehungen zwischen einer Umwelteinwirkung und einer Krankheit aufzeigen. Hierzu bedarf es der Bestätigung durch den Zell- oder Tierversuch. Die statistische Aussagekraft vieler epidemiologischer Untersuchungen zu elektromagnetischen Feldern ist infolge kleiner Fallzahlen begrenzt.

Bei der Festlegung von Forschungsaufgaben und -zielen ist von der internationalen Entwicklung dieses Gebietes ausgegangen worden. Insbesondere sind die Ausarbeitungen berücksichtigt, welche die WHO gemeinsam mit der ICNIRP zu der Situation auf dem Gebiet der Radiofrequenzen (März 1997) und der Niederfrequenzen (Entwurf August 1997) erarbeitet hat.

3.2 Aufklärung von Mechanismen der Wirkung von NF- und niederfrequent-modulierten HF-Feldern auf zelluläre Systeme

Die Kenntnis biophysikalischer Primärmechanismen ist eine wichtige Grundlage für die Festlegung von Schwellenwerten. Zu diesem Zwecke soll der Ermittlung von Dosis-Effekt-Kurven besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Sichere Wertungen von Tierexperimenten, Untersuchungen an Probanden und epidemiologischen Studien, einschließlich Extrapolation von Dosiswerten, sind nur auf der Grundlage gesicherter Kenntnisse über die Primärmechanismen möglich.

- Im NF-Bereich sollte sich die Forschung vorwiegend auf die Frage konzentrieren, ob der elektrische oder ob der magnetische Feldvektor für die Primärreaktion verantwortlich ist. Dabei sind Schlüsselexperimente ebenso wichtig wie theoretische Überlegungen und Berechnungen. Dieser Problemkreis ist u.a. von entscheidender Bedeutung für die Berechnung davon abgeleiteter Grenzwerte und für die Wertung von *in-vitro*- und Tier-Experimenten in ihrer Bedeutung für den praktischen Strahlenschutz.
- Im HF-Bereich sind Aspekte mikrothermischer Wirkungen (z.B. Energiedispersion in gebundenem Wasser) experimentell und theoretisch zu beachten. Besondere Beachtung verdient die Fragestellung nach der Wirkung amplitudenmodulierter und gepulster Felder. Es ist eine enge Verknüpfung mit modernen Theorien und Daten der Quanten-Biochemie erforderlich.

– Aufklärung der Fortleitung und Verstärkung elektromagnetischer Feldeffekte durch Signaltransduktionswege, die bis zu Vorgängen der Proteinexpression und -synthese führen und damit Proliferations- und Differenzierungsmechanismen beeinflussen können. Besondere Beachtung soll die Bestimmung möglicher Schwellendosen und systembedingter Frequenzfenster finden.
– Modellierung von Verstärkermechanismen nichtlinearer Systeme, angefangen bei quantenmechanischen Modellen einzelner Reaktionsschritte bis zu thermodynamischen und kinetischen Modellen von Stoffwechsel- und Signaltransduktionswegen.

3.3 Tierexperimentelle Untersuchungen zur möglichen Wirkung schwacher Felder als Copromotoren der Krebsentstehung und als mögliche Verursacher neurodegenerativer Erkrankungen

Dies betrifft insbesondere Langzeitexperimente an kleinen Labortieren (Ratten, Mäusen), die permanent schwachen Feldern im Frequenzbereich von 16 $^{2}/_{3}$ bzw. 50 Hz ausgesetzt sind. Durch diese Experimente soll vor allem der Frage nachgegangen werden, ob Felder mit Magnetflußdichten unterhalb von 100 µT als Copromotoren der Krebsentwicklung wirken könnten. Ferner sind Untersuchungen zur Überprüfung von Hinweisen erforderlich, wonach HF-Felder des Mobilfunks zur Krebspromotion und/oder zu neurodegenerativen Erkrankungen beitragen können. Diese aufwendigen Tierversuche sollen möglichst komplex, auch unter Berücksichtigung möglicher immunologischer Konsequenzen, ausgewertet werden. Bei Versuchen im HF-Bereich ist besondere Sorgfalt auf technisch perfekte Expositionseinrichtungen zu legen.

3.4 Physiologische und psychologische Tests zur Klärung von Einflüssen schwacher EMF auf die höhere Nerventätigkeit

Untersuchungen über den Einfluß applizierter schwacher Felder auf physiologische Parameter (EKG, EEG, Blutdruck, Hauttemperatur, Hormonspiegel etc.) sowie auf psychisch bedingte Reaktionen (u.a. Vigilanztests, Schlafstörungen) sind erforderlich. Hierbei kommt dem Einfluß von Amplitudenmodulationen im physiologisch interessierenden Frequenzbereich besondere Bedeutung zu.

Derzeit existieren keine gesicherten Erkenntnisse zur Psyche „elektrosensibler“ Menschen. Diskussionswert wären psychologische Studien über spezifische Faktoren, die zu dieser Art von Umweltangst führen können. Dies betrifft u.a. Untersuchungen von Charakterstrukturen und Lebensumständen, Objektivierung des Leidensdruckes und der Leidensfolgen sowie Erarbeitung von Konzepten zur Minderung des Leidensdruckes der Betroffenen.

3.5 Kritische Wertung epidemiologischer Erhebungen

Bisher durchgeführte epidemiologische Untersuchungen zeigen die Schwierigkeit der Aussage bei multifaktoriell bedingten Beeinflussungen. Zudem ist ihre Aussagekraft durch die zumeist kleine Zahl betroffener Personen, durch die unvollständige Erfassung der Confounder und durch die Schwierigkeit exakter Dosimetrie, vor allem im Hochfrequenzbereich, eingeschränkt.

Epidemiologische Einzeluntersuchungen liegen im NF-Bereich in ausreichender Anzahl vor. Angesichts der geringen Fallzahl der meisten publizierten Untersuchungen ist eine gemeinsame Auswertung aller vorhandenen Originaldaten als wertvolle Erhöhung der Aussagekraft dieser Studien hilfreich. Mängel im Hinblick auf die quantitative Erfassung der Expositionswerte (Feldstärken, Intensitäten) können durch Metaanalysen jedoch nicht ausgeglichen werden. Daher ist eine kritische Gesamtbewertung unter Einbeziehung aller Einflußparameter und bei Anlegung hoher methodischer Qualitätsstandards erforderlich.

3.6 Bestimmung der Dosisverteilung von HF-Feldern im menschlichen Körper, insbesondere im Kopfbereich

Da die Werte der spezifischen Absorptionsrate (SAR-Werte) an Aufpunkten im Gewebe, z.B. im Auge, bei gegebenem äußerem Feld stark von den anatomisch-topologischen Gegebenheiten abhängen, müssen zusätzlich zu den für vereinfachte Geometrien bereits durchgeführten Messungen und Berechnungen genauere Untersuchungen unter realistischen Bedingungen in Angriff genommen werden. Insbesondere interessiert hier die genaue Nachbildung der betreffenden Körperregion unter besonderer Beachtung der thermischen Auswirkungen auf möglicherweise sensible lokale Strukturen und Berücksichtigung physiologischer Gegebenheiten (z.B. Durchblutung).

3.7 Untersuchungen zur Dosimetrie im Bereich von Geweben und Zellen

Obgleich grundsätzlich bekannt ist, daß elektrische Ströme im NF-Frequenzbereich vorwiegend im extrazellulären Raum fließen und die entsprechenden Felder das Membranpotential beeinflussen, während HF-Felder die Membran kapazitiv überbrücken, wird das Erfordernis immer dringender, Genaueres über die tatsächliche Feldverteilung zu wissen. Dazu gehören im NF-Bereich Kenntnis über Leitfähigkeiten im Interzellular-Spalt und bei Zell-Zell-Kommunikationen, im HF-Bereich Impedanzwerte gebundenen Wassers. Aus diesem Grund sind Impedanz-Messungen auf mikroskopischem Niveau erforderlich. Dazu bieten sich u.a. die Methoden der Elektrorotation und Dielektrophorese von Zellen an. Ferner sind Modelle der Berechnung solcher Systeme zu entwickeln.

3.8 Untersuchungen zur Wirkung starker statischer Magnetfelder

In letzter Zeit häufen sich in der Literatur Hinweise darauf, daß Prozesse in Zellmembranen durch starke statische Magnetfelder mittels funktionsrelevanter Phasenübergänge der Lipidkomponenten von Zellmembranen induziert werden. Dies könnte auch Konsequenzen für die Sicherheit von Patienten bei der Anwendung magnetischer Resonanzverfahren in der medizinischen Diagnostik haben. Diesen Hinweisen sollte sowohl durch Untersuchungen an Zellen als auch in Tierexperimenten nachgegangen werden.

3.9 Störbeeinflussung von Implantaten und Körperhilfen

Implantate und Körperhilfen, die mit elektronischen Schaltkreisen ausgestattet sind, wie z.B. Herzschrittmacher, Cochlea-Implantate oder Hörgeräte, können unter bestimmten Vorausset-

zungen durch elektromagnetische Felder, die im Alltag auftreten, in ihrer Funktion gestört werden. Für Herzschrittmacher liegen hierzu Untersuchungen vor, die zeigen, daß vor allem niederfrequente Felder oder niederfrequent gepulste oder amplitudenmodulierte hochfrequente Felder zu Funktionsbeeinflussungen führen können. Die gesundheitlichen Risiken können bisher nur schwer abgeschätzt werden. Theoretisch können lebensbedrohliche Situationen infolge eines Funktionsausfalls oder einer Fehlfunktion von elektronischen Körperhilfen nicht ausgeschlossen werden. Zur besseren Risikoabschätzung und zur Erarbeitung von Schutzempfehlungen für die Betroffenen sind weitere Untersuchungen erforderlich. Mit der Einführung neuer Implantate, wie z.B. Stimulatoren im Bereich der Retina, des Gastrointestinaltraktes sowie Neurostimulatoren, gesteuerte Medikamenten-Aggregate etc., wird diese Notwendigkeit noch verstärkt.

4 Ultraschall

4.1 Allgemeine Gesichtspunkte

Nach dem internationalen Stand der Forschung kann die thermische Gewebeschädigung unterhalb eines Schwellenwertes der Temperaturerhöhung von ca. $\Delta T = 1{,}5$ °C und die kavitative Gewebeschädigung unterhalb eines Schwellenwertes der Druckamplitude von ca. $|p| = 5$ MPa (Ausnahmen: 1 MPa für die Lunge und 2 MPa für den Darm) ausgeschlossen werden.

Zur weiteren Absicherung dieser Schwellenwerte und zur Absicherung ihrer Einhaltung in der medizinischen Ultraschalldiagnostik sind die folgenden vier Forschungsschwerpunkte zu empfehlen:

- Weitere Vertiefung der Kenntnisse über den Einfluß der viskoelastischen Gewebeeigenschaften auf die Kavitationsschwelle, da dieser Einfluß - im Vergleich zu den nachgewiesenen Kavitationswirkungen auf Zellen in verdünnten Suspensionen - für den Schutz vor Kavitationswirkungen ausschlaggebend ist.
- Weitere Vertiefung der Kenntnisse über nichtthermische und nichtkavitative biologische Ultraschallwirkungen, insbesondere über Veränderungen des Stofftransportes durch Membranen und über Beeinflussung der Signaltransduktion durch Membranen, zur Absicherung des Sicherheitskonzeptes.
- Quantitative Erfassung des Verhaltens der Kavitationsschwelle bei Verwendung von Ultraschall-Kontrastmitteln.
- Überwachung der Nichtüberschreitung der Schwellenwerte mit geeigneten Meßanordnungen.

Diese Schwerpunkte sind in den folgenden Abschnitten genauer beschrieben.

4.2 Einfluß der viskoelastischen Gewebeeigenschaften auf die Kavitationsschwelle

Im Unterschied zu verdünnten wässrigen Suspensionen lebender Zellen, in denen selbst B-Bild-Schallköpfe einen kavitationsbedingten Zelluntergang bewirken können, tritt diese Schädigung in hochkonzentrierten Zellsuspensionen und in kompakten Weichgeweben nicht auf. Die Kavitationsschwelle ist erhöht, denn die Gewebe sind durch ihre viskoelastischen Eigenschaften geschützt („kavitationsfest“). Bei entsprechend weiter erhöhten Pulsamplituden besteht jedoch

die Möglichkeit der Zellschädigung durch Kavitation weiterhin und darf daher nicht außer acht gelassen werden.

Es sollen daher experimentelle Bedingungen erarbeitet werden, unter denen die Einsatzschwelle kavitationsbedingter Gewebeschäden für vorgegebene klinische Puls-Dopplergeräte in reproduzierbarer Weise festgestellt werden kann. Begleitend ist ein theoretisches Modell des Einflusses der viskoelastischen Gewebeeigenschaften auf die Lage der Kavitationsschwelle zu entwickeln.

4.3 Nichtthermische und nichtkavitative biologische Ultraschallwirkungen

Es liegen wissenschaftliche Ergebnisse über nichtthermische und nichtkavitative biologische Ultraschallwirkungen vor, die es ratsam erscheinen lassen, die Dosis-Effekt-Beziehungen für diese Wirkungen genau zu ermitteln. Nur auf dieser Basis kann festgestellt werden, ob diese Effekte durch die Einhaltung der Schwellenwerte für die thermischen und kavitativen Effekte ebenfalls ausgeschlossen werden. Infrage kommt vor allem die Veränderung der Membranpermeabilität infolge von Mikroströmungen, die die Dicke der „unstirred layer“ in der Nähe von Membranen und damit die Diffusionswege für den Stofftransport beeinflussen. Noch nicht ausgeschlossen ist ferner die Veränderung von Rezeptoren auf Zelloberflächen, durch die eine Veränderung der Signaltransduktion hervorgerufen werden kann.

4.4 Änderung der Kavitationsschwelle durch Ultraschall-Kontrastmittel

In verschiedenen Bereichen der Ultraschalldiagnostik werden zur Erhöhung des Rückstreuvermögens des Blutes gasgefüllte Kügelchen als Kontrastmittel eingesetzt, die die Kavitationsschwelle herabsetzen können. Nach den bisher gewonnenen Erfahrungen ändert diese Verschiebung nicht den risikofreien Charakter von Untersuchungen im A-, B- und M-Mode sowie bei Farb-Doppler-Untersuchungen und bei der 3D-Sonographie. Für die Untersuchungen mit höherer Ultraschallexposition in Kombination mit Kontrastmitteln fehlen jedoch Daten, um die mögliche Herabsetzung der Kavitationsschwelle in eine Kosten-Risiko-Abwägung einzubeziehen. Im Interesse der Vermeidung schädlicher Wirkungen durch Kontrastmittel-Einsatz besteht daher Forschungsbedarf zur Aufklärung der physikalischen Primäreffekte und der Einsatzschwellen möglicher biologischer Wirkungen. Es soll gezeigt werden, mit welchen Erniedrigungen der Kavitationsschwellen durch Kontrastmittel quantitativ zu rechnen ist, damit unterhalb dieser Schwellen ein sicherer Umgang mit Ultraschall-Kontrastmitteln gewährleistet werden kann.

4.5 Entwicklung von Meßmethoden zur Kontrolle der Einhaltung von Ultraschall-Schwellenwerten

Zur unmittelbaren Nachprüfung der Einhaltung der Schwellenwerte für thermische und kavitative Gewebeschädigung durch klinische Ultraschallgeräte sollen Testphantome mit entsprechendem Reaktionsvermögen für thermische und kavitative Effekte entwickelt werden:

– Thermisches Gewebephantom, z. B. mit Flüssigkeitskristalleinlagerung, zur Farbumschlagsanzeige bei einer Temperaturerhöhung von 1,5 °C.

– Kavitations-Gewebephantom mit definiert eingebrachten Kavitationskeimen zum optischen Nachweis der durch transiente Kavitation bei Überschreitung definierter Druckamplituden (1, 2 oder 5 MPa im Gewebe) ausgelösten Fluoreszenz.

Für eine konservative Beurteilung von Geräten soll ferner experimentell demonstriert werden, daß die von den Herstellern angegebenen Werte des “thermischen Index” und des “mechanischen Index” bei den verschiedenen Ultraschall-Untersuchungsmethoden, insbesondere bei höherer Ultraschallexposition, geeignet sind, die Nichtüberschreitung der Schwellenwerte zu garantieren.

5 Laserstrahlung

5.1 Allgemeine Gesichtspunkte

Laserstrahlen sind elektromagnetische Strahlungen im Wellenlängenbereich von 180 nm bis 1 mm, die durch induzierte Emission erzeugt oder verstärkt werden. Laserstrahlungen sind durch eine hohe Kohärenz (Interferenzfähigkeit) ausgezeichnet. Die Wirkungen der Laserstrahlung unterscheiden sich nicht grundsätzlich von denen anderer optischer Strahlungen.

Bei dem überwiegenden Teil der Untersuchungen zur biologischen Wirkung von Laserstrahlung stellte sich die Dosimetrie als problematisch heraus. Zumeist wird als Bestrahlungsparameter die Exposition der Hautoberfläche angegeben. Über das quantitative Eindringvermögen der Strahlung in die Haut liegen nur wenige Angaben vor. Durch Reflexion an unteren Hautschichten kann sich jedoch die Intensität der Strahlung in einem Bereich dicht unter der Hautoberfläche zusätzlich erhöhen. Als Besonderheiten der Laserstrahlung sind die Bündelung, die Monochromasie und die Kohärenz zu nennen. Es sind unterschiedliche Schädigungsmechanismen, je nach Quantenenergie der Strahlung, zu erwarten.

Aus diesen Aspekten lassen sich die folgenden Forschungsschwerpunkte ableiten:

– Erfassung der optischen Parameter unsensibilisierter und sensibilisierter lebender Haut als Grundlage einer Modellierung.

– Bestimmung der Kohärenz von Laserstrahlung im Gewebe.

Bei der Bearbeitung von Materialien mit Laserstrahlung wird angestrebt, in der Umgebung des Aktionsbereichs des Lasers die Dosisleistung der diffus reflektierten Strahlung auf Werte zu begrenzen, die unterhalb der biologischen Schädigungsschwelle liegen. Der Reflexionsgrad bei Metallen kann vor allem im Infraroten Werte bis nahezu 100 % erreichen. Bei der Bestrahlung von biologischen Geweben beträgt der Reflexionsgrad zwischen etwa 4 % für Wellenlängen, bei denen die Laserstrahlung gut absorbiert wird, und etwa 50 % für Wellenlängen, bei denen die Absorption nur gering ist. Im Hinblick auf die Sicherheit der Anwender stellt sich somit die Forschungsaufgabe

– Experimentelle und epidemiologische Untersuchungen zum Studium bzw. Ausschluß berufsbedingter Schäden durch Hochleistungslaser.

In den letzten 10 Jahren werden Laser von Heilpraktikern, Kosmetikern, Friseuren und auch allgemeinpraktisch tätigen Ärzten häufig zur selektiven Photothermolyse und zur Photobiostimulation eingesetzt. Die Entwicklung geht dahin, immer leistungsstärkere Laser zu nutzen, um kosmetische Korrekturen vornehmen zu können (Falten- und Pigmentbeseitigung, Haarwuchs-

anregung u.ä.). Dabei besteht insbesondere das Risiko der unkontrollierten und möglicherweise unvollständigen Zerstörung bösartiger Pigmentmale (malignes Melanom), die nach der Anbehandlung mit dem Laser spontan oder auch angeregt metastasieren können. Es gibt erste Berichte über Rezidive nach unvollständiger Entfernung nicht erkannter bösartiger Hautveränderungen mit Lasern durch Laien.

Bei diesen Eingriffen werden Laser bis zur Klasse 4 der „Unfallverhütungsvorschrift Laserstrahlung“ eingesetzt, das sind Laser, deren Anwendung ein hohes Risiko darstellen kann, da mit möglichen Augen- und Hautschäden, auch durch diffus gestreute Strahlung, sowie mit Brand- und Explosionsgefahr zu rechnen ist. Derzeit ist es rechtlich nicht geklärt, ob die Behandlung von Patienten mit Klasse-4-Lasern durch medizinische Laien gesetzlich zulässig ist. Die Anwender sind durch keine gesetzliche Regelung gezwungen, ihre Qualifikation zum Betreiben eines Lasers und das Wissen um Schutz- und Sicherheitsmaßnahmen nachzuweisen. Im Interesse der Patientensicherheit sollte der rechtliche Aspekt dieses Problems wissenschaftlich-gutachterlich aufgeklärt, und es sollten Möglichkeiten zur Beseitigung dieser juristischen Grauzone geschaffen werden.

Im folgenden werden die genannten Forschungsschwerpunkte näher erläutert.

5.2 Erfassung der optischen Parameter unsensibilisierter und sensibilisierter lebender Haut und Modellierung der Wechselwirkungsprozesse

Biologisches Gewebe zeichnet sich durch ein extremes Streuverhalten aus, das nur mit aufwendigen Lichtausbreitungsmodellen, z.B. Monte-Carlo-Rechnungen, näherungsweise zu erfassen ist. Als Richtwert für die meisten Humangewebe gilt, daß erst nach etwa 150 Streuprozessen ein Absorptionsprozeß erfolgt. Trotz zahlreicher Ansätze hat die Modellierung der Wechselwirkungsprozesse optischer Strahlung mit humanem Gewebe noch keinen für die Praxis befriedigenden Stand erreicht. Dies ist zum Teil auf den Mangel an zuverlässigen optischen Parametern der lebenden durchbluteten Haut zurückzuführen. Die bisher in derartige Rechnungen eingehenden Parameter wurden vorwiegend an Biopsien gewonnen und sind daher für die Praxis nicht hinreichend relevant und zuverlässig. Eingehende Messungen an lebenden, durchbluteten Geweben bei entsprechendem Wassergehalt der Hornschicht sind deshalb erforderlich. Der Erfolg der quantitativen Modellierungen und Abschätzungen von Photodosiswerten für Grenzwertempfehlungen hängt entscheidend von der Zuverlässigkeit dieser Parameter ab.

5.3 Bestimmung der Kohärenz von Laserstrahlung im Gewebe

Die Streuprozesse in biologischen Geweben führen zu Phasenverschiebungen und daher zu einer Störung der Kohärenz von Laserstrahlung. Zahlreiche Betrachtungen zur Wechselwirkung von kohärentem Licht mit Gewebe beruhen auf dieser Modellvorstellung; quantitative, experimentell abgesicherte Angaben zu den involvierten Prozessen, insbesondere zu den Relaxationstiefen, fehlen jedoch. Ziel weiterer Forschung soll es daher sein, anhand von Messungen und Modellrechnungen abzuschätzen, ob eine kohärenzspezifische Wirkung optischer Strahlung, z.B. in tieferen Gewebeschichten der Haut, auszuschließen ist oder u.a. für lasermedizinische Effekte und Laserstrahlenschutzaspekte relevant sein kann. Entsprechende Feststellungen werden zwar in der Literatur kontrovers diskutiert, eine experimentelle Nachprüfung ist nach gegenwärtigem Kenntnisstand aber nicht zu finden. Sollte sich herausstellen, daß die Kohärenz

keine gewebespezifische Wirkung hat oder in tieferen Gewebeschichten nicht mehr nachweisbar ist, wäre ein Zusammenwachsen der Strahlenschutzempfehlungen für die Bereiche Laserstrahlung und Strahlung nichtkohärenter Strahlenquellen möglich.

5.4 Experimentelle und epidemiologische Untersuchungen zum Studium bzw. Ausschluß berufsbedingter Schäden durch Hochleistungslaser

Im Gegensatz zu der akuten Schädigung, die durch die Laserstrahlung insbesondere bei den Augen eintreten kann, ist die Frage einer Schädigung durch die Dauerexposition, z.B. bei Lasertherapeuten, nicht eindeutig geklärt. Besonders in der dermatologischen Lasertherapie ist es durchaus üblich, daß Lasertherapeuten, zwar geschützt durch eine entsprechende Schutzbrille, über viele Stunden hintereinander Lasertherapien mit Wellenlängen im Bereich des sichtbaren Lichtes durchführen. Es sollte untersucht werden, ob die jahrelange, intensive Durchführung solcher Tätigkeiten ein Schädigungspotential für die Therapeuten beinhaltet. Geeignete Ansatzpunkte wären experimentelle und epidemiologische Untersuchungen.