



## **Strahlenschutzkommission**

Geschäftsstelle der  
Strahlenschutzkommission  
Postfach 12 06 29  
D-53048 Bonn

<http://www.ssk.de>

---

### **Weiterentwicklung der Forschung zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung**

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

---

<b>Inhaltsverzeichnis</b>		<b>Seite</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>UV-Strahlung</b> .....	<b>5</b>
2.1	Allgemeine Gesichtspunkte.....	5
2.2	Biologische Reaktion auf UV-Strahlung / Molekulare und zelluläre Mechanismen der Hautkrebsentstehung .....	5
2.3	Spektrale Wirkungsfunktionen .....	7
2.4	Standardisierung der UV-Personendosimetrie .....	7
2.5	Epidemiologische Untersuchungen zu Ursachen der Entstehung von Hautkrebs.....	7
2.6	Bestimmung der Schädigungsschwellen zur Induktion von Linsentrübungen (Katarakte) bei langfristiger Einwirkung von UV-Strahlung.....	8
2.7	Physikalische Schutzfaktoren für den UV-Schutz.....	9
<b>3</b>	<b>Sichtbare und Infrarot (IR)-Strahlung einschließlich Laserstrahlung</b> .....	<b>9</b>
3.1	Allgemeine Gesichtspunkte.....	9
3.2	Schutzreaktionen und Schädigungsschwellen bei sichtbarer optischer Strahlung .....	10
3.3	Bestimmung der Schädigungsschwellen für Linsentrübungen (Katarakte) bei langfristiger Einwirkung von IR-Strahlung.....	11
<b>4</b>	<b>Elektromagnetische Felder</b> .....	<b>11</b>
4.1	Allgemeine Gesichtspunkte.....	11
4.2	Themenbereiche, die den gesamten Frequenzbereich der elektromagnetischen Felder umfassen .....	13
4.2.1	Einfluss unterschiedlicher Expositionsdauern auf biologische Reaktionen.....	13
4.2.2	Zusammenhänge zwischen unspezifischen Krankheitssymptomen und Expositionen durch schwache Felder .....	13
4.2.3	Unterschiede in der biologischen Reaktion zwischen kontinuierlicher und gepulster Strahlung .....	14
4.2.4	Störung elektronischer Implantate durch elektromagnetische Felder.....	14
4.2.5	Risikowahrnehmung und Risikokommunikation.....	15

4.3	Themen im Bereich niederfrequenter Magnetfelder.....	15
4.3.1	Assoziation zwischen 50 Hz-Magnetfeldern und Leukämie bei Kindern .....	15
4.3.2	Untersuchungen von neurodegenerativen Erkrankungen im Zusammenhang mit Magnetfeldexposition.....	15
4.3.3	Beeinflussbarkeit des Melatoninstoffwechsels durch Magnetfelder.....	16
4.3.4	Einflüsse auf das kardiovaskuläre System .....	16
4.3.5	Untersuchungen zu teratogenen Wirkungen elektromagnetischer Felder .....	17
4.4	Themen im Bereich hochfrequenter elektromagnetischer Felder.....	17
4.4.1	Einflüsse auf das zentrale Nervensystem und Beeinflussung kognitiver Funktionen .....	17
4.4.2	Aufklärung von Mechanismen der Wirkung von niederfrequent-modulierten HF-Feldern auf zelluläre Systeme.....	18
4.4.3	Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke unter HF-Exposition .....	18
4.4.4	Bestimmung der Verteilung der absorbierten Energie von HF-Feldern im menschlichen Körper, insbesondere im Kopfbereich, sowie Untersuchungen zur Mikroexposimetrie in Geweben und Zellen.....	18
4.4.5	Untersuchungen neurophysiologischer Prozesse bei Nutzung von Mobiltelefonen .....	19
4.4.6	Blutparameter und Immunsystem.....	19
4.4.7	Untersuchungen zu krebsrelevanten Proteinen, Krebsentstehung und -promotion .....	20
4.4.8	Spontane und initiierte Tumorbildung.....	20
<b>5</b>	<b>Ultraschall.....</b>	<b>20</b>
5.1	Allgemeine Gesichtspunkte .....	20
5.2	Thermische Aspekte .....	21
5.3	Mechanische Aspekte .....	22
<b>6</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>22</b>

# 1 Einleitung

Der Schutz vor nichtionisierender Strahlung, insbesondere die Erstellung zweckmäßiger Schutzempfehlungen und -vorschriften, ist nur auf einem breiten Fundament wissenschaftlich-technischen Wissens möglich. In dem weit gespannten Themenspektrum von der Erfassung der Exposition des Menschen über die Analyse der biologischen Reaktionen bis hin zu dem Schutz vor Gesundheitsbeeinträchtigungen und Schäden hat die bisherige Forschung Erkenntnisse erbracht, aus denen Handlungsanweisungen für den Strahlenschutz ableitbar sind<sup>1</sup>. Bei vielen Fragen ist aber noch eine Vertiefung und Erweiterung der wissenschaftlich-technischen Grundlagen durch weitere Forschung notwendig.

Die Strahlenschutzkommission (SSK) hat zuletzt im Jahre 1998 [SSK 98a] Vorschläge zur weiteren Entwicklung des Strahlenschutz-Forschungsprogramms des BMU auch auf dem Gebiet der nichtionisierenden Strahlung erarbeitet. Die vorliegende Empfehlung ist eine Fortschreibung und Aktualisierung dieser Vorschläge. In den zurückliegenden Jahren sind neue Themenbereiche der Strahlenschutzforschung im Bereich der nichtionisierenden Strahlung erkennbar geworden, die hier nun berücksichtigt wurden.

Die empfohlenen Forschungsschwerpunkte betreffen die Themenbereiche UV-Strahlung, sichtbare Strahlung, IR-Strahlung, Laserstrahlung, elektromagnetische Felder und Ultraschall. Die nach Auffassung der SSK förderungswürdigen Forschungsthemen mit den zugehörigen Begründungen sind aufgeführt und in den jeweiligen Themenbereichen nach Prioritäten geordnet.

Die SSK versteht diese Liste der vorgeschlagenen Forschungsthemen als Anregung für eine Themenauswahl 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. Die Liste der vorgeschlagenen Forschungsthemen wurde unabhängig von ausgeschriebenen und durchgeführten Vorhaben verschiedener Ressorts (u.a. BfS/BMU) sowie laufenden internationalen Vorhaben (z.B. 5. Rahmenprogramm der EU) oder Programmen anderer Länder erstellt.

---

<sup>1</sup> Als Beispiele seien hier folgende Empfehlungen der Strahlenschutzkommission genannt:

- Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern [SSK 01a],
- Schutz des Menschen vor den Gefahren der UV-Strahlung in Solarien [SSK 01b],
- Schutz des Menschen vor solarer UV-Strahlung [SSK 97a],
- Gefahren bei Laseranwendungen an der menschlichen Haut [SSK 00],
- Empfehlungen zur Patientensicherheit bei Anwendungen der Ultraschalldiagnostik in der Medizin [SSK 97b],
- Gefahren durch Laserpointer [SSK 98b].

## 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.

Im Zusammenhang mit einer steigenden Hautkrebsinzidenz und vor dem Hintergrund verhaltensbedingter, erhöhter solarer und künstlicher UV-Exposition der Bevölkerung wird die Notwendigkeit deutlich, den Strahlenschutz durch Forschung auf dem Gebiet des Schutzes vor UV-Strahlung zu unterstützen.

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.

Um die durch UV-Strahlung hervorgerufene Gefahr strahlenhygienisch bewerten zu können, bedarf es zum einen 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 Reaktion auf UV-Strahlung / Molekulare und zelluläre Mechanismen der Hautkrebsentstehung,
- spektrale Wirkungsfunktionen,
- Standardisierung der UV-Personendosimetrie,
- epidemiologische Untersuchungen zu Ursachen der Entstehung von Hautkrebs,
- Bestimmung von Schädigungsschwellen zur Induktion von Linsentrübungen (Katarakte) bei langfristiger Einwirkung von UV-Strahlung,
- physikalische Schutzfaktoren für den UV-Schutz.

Diese Forschungsschwerpunkte werden im Folgenden erläutert.

### 2.2 Biologische Reaktion auf UV-Strahlung / Molekulare und zelluläre 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:

**a) Mechanismen der UV-induzierten Hautkrebsentstehung**

Notwendig sind Untersuchungen auf molekularer und zellulärer Ebene in Tumorzellen, gesunden Hautzellen und in vivo sowohl im Tiermodell als auch beim Menschen, welche die Entstehung von nicht melanozytärem Hautkrebs und malignem Melanom in Abhängigkeit des UV-Spektrums, der Dosis und Dosisleistung zum Inhalt haben. Daraus sollten sich Modelle entwickeln lassen, die die UV-induzierte Hautkrebsentstehung beschreiben und mögliche Risikofaktoren aufzeigen. Die Untersuchungen erfordern neue biologische Ansätze auf der Ebene der UV-modifizierten Genexpression und der Suche nach zellulären und genetischen Markern, welche für die Risikoabschätzung genutzt werden können.

**b) Mechanismen der UV-induzierten Immunsuppression**

Die UV-induzierte Immunsuppression kann z.B. dazu führen, dass entartete Zellen vom Immunsystem nicht erkannt und daher nicht zerstört werden. Bei UV-Schädigung von Zellen ist hiermit ein erhöhtes Hautkrebsrisiko verbunden. Darüber hinaus wird vermutet, dass individuelle Unterschiede in der Empfindlichkeit bezüglich der immunsuppressiven Reaktion auf UV-Strahlung und damit im Risikofaktor zur Entstehung von Krebs bestehen. Ferner wird vermutet, dass andere genotoxische Einflüsse durch die UV-induzierte Immunsuppression verstärkt werden. Der Erfolg von Impfungen kann durch ein UV-supprimiertes Immunsystem beeinträchtigt werden. Die Mechanismen der UV-induzierten Immunsuppression und ihrer interindividuellen Variabilität sind noch nicht vollständig aufgeklärt. Hier besteht daher Forschungsbedarf, welcher durch gezielte in vitro- und in vivo-Untersuchungen abgedeckt werden muss.

**c) Ausdehnung der Erforschung grundlegender Mechanismen auf den Bereich von UV-A**

Eine Vielzahl von Untersuchungen zeigt, dass die Reaktion auf UV-A-Strahlung (Wellenlänge 320 nm bis 400 nm) bisher unterschätzt wurde. UV-A-Strahlung kann über indirekte Reaktionen (z.B. über freie Radikale) zu Mutationen im Genom führen. UV-A kann DNA-Einzelstrangbrüche induzieren, die, im Falle ausbleibender oder fehlerhafter Reparatur, als Ursache genetischer Instabilität angesehen werden. Die Bedeutung von UV-A-Strahlung für die Hautalterung ist bekannt und wird zurzeit intensiv untersucht. Es gibt allerdings erst wenig Informationen über exakte Dosis-Wirkungs-Beziehungen UV-A-induzierter Effekte in Bezug auf unterschiedliche biologische Endpunkte. Die dazu notwendige Forschung erhält besondere Bedeutung für Risikoabschätzungen, wenn man den hohen Anteil von UV-A im solaren UV-Spektrum und den stark überhöhten Anteil von UV-A in künstlichen UV-Quellen, die in Solarien und therapeutischen Geräten eingesetzt werden, berücksichtigt. Eine weitere Klärung der Reaktion auf UV-A, auch im Hinblick auf unterschiedliche Expositionsmuster (Dosisleistungen) ist daher dringend erforderlich. Die mögliche besondere Bedeutung von UV-A für die Induktion des malignen Melanoms muss ausführlich untersucht werden.

## 2.3 Spektrale Wirkungsfunktionen

Zur Bewertung der wellenlängenabhängigen biologischen Wirksamkeit von UV-Strahlung wird oft der Einfachheit halber das von der CIE<sup>2</sup> 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-Reaktionen, 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.

## 2.4 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 richtigen Interpretation von Ergebnissen müssen zurzeit schon eingesetzte Personendosimeter verglichen werden und auf nationaler wie internationaler Ebene eine Standardisierung der Anforderungen an Messempfindlichkeit, Reproduzierbarkeit, spektrale Wichtungsfunktionen, spektralen Messbereich, Kalibrierverfahren und Regeln für die praktische Anwendung geschaffen werden.

Die Messergebnisse sollen mit den berechneten Ergebnissen verglichen werden.

## 2.5 Epidemiologische Untersuchungen zu Ursachen der Entstehung von Hautkrebs<sup>3</sup>

### a) Entwicklung von Methoden einer molekularen Epidemiologie und Umsetzung in Screeningverfahren und Fall-Kontroll-Studien auf der Grundlage molekulargenetischer und zellulärer Erkenntnisse

Hier muss der Nutzen des Nachweises z.B. UV-induzierter „Signature“-Mutationen in bestimmten Genen, der UV-induzierten Genexpression und UV-induzierter zellulärer

---

<sup>2</sup> CIE: Commission Internationale de l'Eclairage/International Commission on Illumination

<sup>3</sup> vgl. auch die Empfehlung der Strahlenschutzkommission „Ultraviolette Strahlung und malignes Melanom“

Veränderungen (z.B. in epidermalen Stammzellen) als Basis epidemiologischer Untersuchungen überprüft werden. Andere, neue molekulare oder zelluläre Marker, die auf eine erhöhte UV-Exposition hinweisen, sind nachzuweisen und auf ihren Nutzen in epidemiologischen Studien zu testen.

Durch den Einsatz solcher Verfahren wäre eine Objektivierung der Erfassung von Expositionsgrößen in epidemiologischen Studien, unabhängig von oft stark fehlerbehafteten Angaben in Befragungsprotokollen, möglich.

#### **b) Erfassung der Inzidenz und Mortalität für alle drei Hautkrebsarten**

Die Registrierung der Inzidenz des Hautkrebses (Basalzellkarzinom, Plattenepithelkarzinom, malignes Melanom) in Deutschland ist immer noch mangelhaft. Vereinzelt vorliegende Daten müssen daher gesammelt, gebündelt und die Erfassung in den im Aufbau befindlichen Krebsregistern vorangetrieben werden.

#### **c) Evaluierung bevölkerungsbezogener Screeningmaßnahmen**

Die Früherkennung von Hautkrebs durch Screeningmaßnahmen kann den Krankheitsverlauf günstig beeinflussen und die Mortalität senken. Hierzu müssen geeignete Screening-Verfahren (z. B. Risikogruppen-Screening, Massenscreening etc.) entwickelt sowie in Machbarkeitsstudien auf ihre Durchführbarkeit und ihren Nutzen evaluiert werden. Ein bevölkerungsbezogenes Follow Up der untersuchten Personengruppen muss hierbei gewährleistet sein. Auf der Grundlage der ermittelten Daten können Risikogruppen in Bezug auf ihre Disposition (z.B. multiple Pigmentmale) und die Exposition (z.B. berufliche Exposition und Freizeitverhalten) definiert und Verhaltensempfehlungen für solche Gruppen ausgesprochen werden.

## **2.6 Bestimmung der Schädigungsschwellen zur Induktion von Linsentrübungen (Katarakte) bei langfristiger Einwirkung von UV-Strahlung**

Durch langfristige UV-Strahlenexposition kann es zu Trübungen der Augenlinsen kommen. Trübungen der Augenlinsen sind in der Bevölkerung, als sog. „Altersstar“ insbesondere bei Personen in höherem Alter, weit verbreitet. Neben anderen Ursachen, wie z.B. Stoffwechselerkrankungen, wird die jahrzehntelange Einwirkung der solaren UV-Strahlung als eine der wesentlichen Ursachen für das relativ häufige Auftreten von Linsentrübungen angesehen. Zahlenmäßig gehören Linsentrübungen neben der Induktion von Hautkrebs zu den häufigsten Folgen übermäßiger UV-Einwirkung. Wegen der großen Zahl damit verbundener Staroperationen stellen sie einen nicht zu unterschätzenden Kostenfaktor dar. Sie verdienen daher eine größere Beachtung als ihnen bisher zuteil wurde. Insbesondere ist es nötig, den Zusammenhang zwischen der UV-Bestrahlungsdosis und dem Auftreten von Linsentrübungen zu untersuchen. Erst mit der Kenntnis solcher Dosis-Wirkungs-Beziehungen kann eine verlässliche Risikoabschätzung erfolgen. Die Kenntnis der Dosis-Wirkungs-Beziehungen ist auch nötig, um geeignete und realistische Schutzmaßnahmen zur Verhinderung von Linsentrübungen empfehlen zu können.



## 2.7 Physikalische Schutzfaktoren für den UV-Schutz

Bei den Empfehlungen an die Bevölkerung zum Verhalten in der Sonne spielt der textile Sonnenschutz eine wichtige Rolle, da, wie internationale Studien zeigen, der alleinige Gebrauch anderer Schutzsubstanzen, wie z.B. Sonnencremes, eher zu verlängerten Expositionen und der Gefahr der Überdosierung beitragen kann. 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<sup>4</sup> oder photochemische Veränderungen der verwendeten Schutzmaterialien erfassen. Aufgrund derart standardisierter Messungen können als UV-Schutz geeignete Textilien empfohlen werden. Der europäische Normentwurf E DIN EN 13758 (Februar 2000) enthält keine ausreichenden Festlegungen hierzu.

## 3 Sichtbare und Infrarot (IR)-Strahlung einschließlich Laserstrahlung

### 3.1 Allgemeine Gesichtspunkte

Optische Strahlung, insbesondere sichtbare und IR-Strahlung gehören zur vorhandenen Umgebung (Umwelt) des Menschen und werden durch die Sonne und künstliche Strahlenquellen emittiert. Höhe, Dauer und Art der Exposition entscheiden darüber, ob durch die Einwirkung positive (zum Teil lebensnotwendige) Effekte hervorgerufen oder Schädigungen verursacht werden. Aufgrund der wellenlängenabhängigen, relativ geringen Eindringtiefen in den menschlichen Körper kann es nur an der Haut und im Auge zu relevanten Expositionen kommen.

Die Expositionsbestimmung ist bei Einwirkung optischer Strahlung nicht einfach. Dies gilt auch für Laserstrahlung und für Strahlung von Lumineszenzdioden (LED und IRED).

Üblicherweise werden bei der Exposition lediglich die Bestrahlungsstärke (Leistungsdichte) und die Bestrahlung (Energiedichte) als Expositionsparameter auf der Oberfläche betrachtet. Das aus den komplexen Verhältnissen von Vorwärts- und Rückwärtsstreuung sowie aus der Absorption resultierende Eindringverhalten wird oft nur als globales Dämpfungsmaß betrachtet. Für eine hinreichend genaue Beschreibung fehlen häufig noch die erforderlichen orts- und zeitaufgelösten Daten.

Insbesondere ist die Aufklärung und Quantifizierung der Schädigungsmechanismen bei Exposition der Augen durch „intensive“ optische Strahlung erforderlich. Gerade hier liegen relativ große Kenntnislücken vor.

Zur Beurteilung der Problematik und Gefahren des Auges sind Untersuchungen zur Bestimmung der Schädigungsschwellen, insbesondere für die Netzhaut und die Linse, durchzuführen. Dazu sind bei der Netzhaut Untersuchungen mit relativ kurzzeitigen Expositionen im ms-Bereich und bei der Linse mit langfristiger bis hin zu chronischer Exposition notwendig.

---

<sup>4</sup> vgl. Australian/ New Zealand Standard 4399:1996, Sun protective clothing - evaluation and classification

Aus diesen Gründen lassen sich die folgenden Forschungsschwerpunkte ableiten:

- Untersuchung der Abhängigkeit der Schutzreaktionen des Menschen gegenüber gefährdender, sichtbarer optischer Strahlung und Abgrenzung zwischen der Lidschlussreflexschwelle und der Schädigungsgrenze bei Laserstrahlung im sichtbaren Spektralbereich,
- Bestimmung der Schädigungsschwellen für die Linsentrübungen (Katarakte) bei langfristiger Einwirkung von IR-Strahlung.

Im Folgenden werden die vorstehend genannten Forschungsschwerpunkte näher erläutert.

### **3.2 Schutzreaktionen und Schädigungsschwellen bei sichtbarer optischer Strahlung**

Obwohl bereits in internationalen Normen und "Guidelines" sowie in nationalen Vorschriften maximal zulässige Bestrahlungswerte festgelegt sind und z.B. bei Lasern gemäß ihrem Gefährdungsgrad Grenzwerte zugänglicher Strahlung zur Klassifizierung benutzt werden, sind gerade im Bereich des sichtbaren Spektralbereiches und bei relativ geringen optischen Leistungen noch eine Reihe von Fragen offen.

#### **a) Untersuchung der Abhängigkeit der Schutzreaktionen des Menschen gegenüber gefährdender, sichtbarer optischer Strahlung**

In den derzeit existierenden Regelwerken werden meist Abwendungsreaktionen als natürliche Schutzmechanismen gegenüber sichtbarer optischer Strahlung, und zwar insbesondere Laserstrahlung, aufgeführt. Eine quantitative Bestimmung der Abhängigkeit der physiologischen Schutzmechanismen bei den verschiedensten optischen Strahlern ist bislang nicht durchgeführt worden.

Neuere Untersuchungen zum Lidschlussreflex bei Laserstrahlexposition haben gezeigt, dass dieser nur bei wenigen Menschen auftritt. Allein schon deshalb ist es notwendig, das gesamte Schutzkonzept einer eingehenden Untersuchung zu unterziehen und dabei die Aussagekraft von Abwendungsreaktionen klar heraus zu arbeiten und eventuell neu zu bewerten.

#### **b) Abgrenzung zwischen der Lidschlussreflexschwelle und der Schädigungsgrenze bei Laserstrahlung im sichtbaren Spektralbereich**

Die Klassifizierung von Lasern orientiert sich an dem damit verbundenen Gefährdungsgrad. Dabei wird davon ausgegangen, dass bei Lasern der Klassen 2 und 2M sowie mit Einschränkung auch bei der neuen Klasse 3R bei Expositionsdauern bis 250 ms kein Netzhautschaden auftreten kann. Insbesondere wird der Lidschlussreflex als inhärenter Schutzmechanismus betrachtet.

Es ist aber weder bekannt, welche Abhängigkeit dieser von der Leistung und Expositionsdauer bei Impulslasern der entsprechenden Laserklassen hat, noch welchen Einfluss z.B. die Quellengröße und andere physikalische Parameter haben.

Besonders wichtig ist die Ermittlung des Abstandes zwischen der Lidschlussreflexschwelle und dem Auftreten einer Netzhautschädigung, und zwar im gesamten sicht-

baren Spektralbereich und unter Berücksichtigung der verschiedensten Expositionsbedingungen.

Gerade die wachsende Zahl der Anwendungen von Lasern relativ geringer Leistung, d.h. der bisherigen Laserklassen 2 und 3A und der neuen Klassen 2M und insbesondere 3R, beinhaltet eine zunehmende Sorge und Gefahr einer Unterbewertung möglicher Risiken in Bezug auf Augenschädigungen. Insbesondere ist zu befürchten, dass ein Schaden noch vor dem Lidschluss auftreten könnte.

### **3.3 Bestimmung der Schädigungsschwellen für Linsentrübungen (Katarakte) bei langfristiger Einwirkung von IR-Strahlung**

Durch langfristige Einwirkung von IR-Strahlung kann es zu Trübungen der Augenlinse (Katarakte) kommen. An Arbeitsplätzen sind solche Linsentrübungen als Berufskrankheit (BK Nr. 2401) bekannt. Sie können dort auftreten, wo die Beschäftigten keinen Augenschutz tragen und einer starken IR-Strahlung jahrzehntelang ausgesetzt sind (z. B. Glasmacher am Schmelzofen). Für die Trübung der Augenlinse durch langfristige Einwirkung von IR-Strahlung ist die genaue Lage des Wellenlängenbereiches maximaler Wirkung sowie eine Dosis-Wirkungs-Beziehung nicht bekannt. Des Weiteren ist zu klären, welchen Anteil die chronische IR-Exposition der Bevölkerung am Auftreten des grauen Stars im Alter hat.

Zur Risikoabschätzung und zur Empfehlung besser angepasster Schutzmaßnahmen ist die Kenntnis der spektralen Wirkungsfunktion und der Dosis-Wirkungs-Beziehung notwendig.

## **4 Elektromagnetische Felder**

### **4.1 Allgemeine Gesichtspunkte**

Bereits die allernächste Zukunft wird die Exposition weiter Bevölkerungskreise gegenüber elektromagnetischen Feldern durch eine Reihe neuer Quellen und Technologien mit sich bringen, z. B. Mobilfunkeinrichtungen der 3. Generation (UMTS<sup>5</sup>), Bluetooth-Sender, Autoabstandsradar, Road-Pricing-, EAS<sup>6</sup>- und PID<sup>7</sup>- Einrichtungen. Darüber hinaus hat die Bewertung der epidemiologischen Studien in Hinblick auf die diskutierte Kanzerogenität und Teratogenität elektromagnetischer Felder den Bedarf an zusätzlicher Forschung vor allem im Grundlagenbereich deutlich gemacht. Ziel der künftigen Forschungsvorhaben ist daher die weitere wissenschaftliche Absicherung von Grenzwerten für die Exposition der Bevölkerung in der häuslichen Umgebung, der Umwelt und am Arbeitsplatz unter Einbeziehung nichtsinusförmiger Signalformen, gepulster Signale einschließlich der (Ultra-) Breitband-Technologie und transients Vorgänge z.B. durch phasenanschnittgesteuerte elektronische Leistungsregler. Besondere Berücksichtigung sollte dabei die Frage der Übertragbarkeit bisheriger Erkenntnisse auf andere Frequenzen und Signalformen finden. Auch Expositionen durch medizinische Anwendungen magnetischer und elektromagnetischer Felder, insbesondere magnetischer Stimulations- und bildgebender Resonanzverfahren, sind zu berücksichtigen.

---

<sup>5</sup> UMTS: Universal Mobile Telecommunication System

<sup>6</sup> EAS: Electronic Article Surveillance

<sup>7</sup> PID: Person Identification Device

Darüber hinaus sind die Probleme der Expositionserfassung und Dosimetrie im Bereich der zukünftig intensiver genutzten Mikrowellen zu lösen.

Obgleich der Schwerpunkt der Untersuchungen den Anforderungen des Schutzes von Menschen vor Gesundheitsbeeinträchtigungen und Schäden entsprechen soll, sind neben der Untersuchung möglicher pathogener und kanzerogener Wirkungen auch Grundlagenuntersuchungen zur Abklärung biologischer Primärreaktionen und zu Wechselwirkungsmodellen auf verschiedenen Untersuchungsebenen erforderlich, die vom molekularen und zellulären Niveau über Modellversuche an Tieren bis hin zu Untersuchungen an Probanden reichen sollten.

Damit Forschungsarbeiten einen Beitrag zur Klärung der anstehenden Fragen leisten können, müssen sie den Kriterien einer wissenschaftlichen Arbeit genügen, wie sie z.B. für diesen Bereich von der WHO in „WHO's Agenda for EMF Research“ [WHO 97] veröffentlicht sind. Bei der Vergabe von Forschungsaufträgen sollte daher auf die Einhaltung dieser Anforderungen geachtet werden, um so möglichst valide Ergebnisse zu erhalten.

Einige der nachstehend aufgeführten Themen dienen der weiteren Untersuchung von bisher unbestätigten Hinweisen auf gesundheitliche Beeinträchtigungen. Eine Reihe solcher Hinweise sind z.B. in der SSK-Empfehlung „Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern“ [SSK 01a] aufgeführt.

Für den gesamten Frequenzbereich der elektromagnetischen Felder sind u.a. in den folgenden Themenbereichen noch relevante Fragestellungen zu klären:

- Einfluss unterschiedlicher Expositionsdauern auf biologische Reaktionen,
- Zusammenhänge zwischen unspezifischen Krankheitssymptomen und Expositionen durch schwache Felder,
- Unterschiede in der biologischen Reaktion zwischen kontinuierlicher und gepulster Strahlung,
- Störung elektronischer Implantate durch elektromagnetische Felder,
- Risikowahrnehmung und Risikokommunikation.

Im Bereich niederfrequenter Magnetfelder mit Feldstärken unterhalb der empfohlenen Grenzwerte der EU-Ratsempfehlung [EU 99] sind folgende Fragestellungen besonders zu berücksichtigen:

- Assoziation zwischen 50 Hz-Magnetfeldern und Leukämie bei Kindern,
- Untersuchungen von neurodegenerativen Erkrankungen im Zusammenhang mit Magnetfeldexposition,
- Beeinflussbarkeit des Melatoninstoffwechsels durch Magnetfelder,
- Einflüsse auf das kardiovaskuläre System,
- Untersuchungen zu teratogenen Wirkungen elektromagnetischer Felder.

Im Bereich hochfrequenter elektromagnetischer Felder mit Feldstärken unterhalb der empfohlenen Grenzwerte der EU-Ratsempfehlung [EU 99] sind folgende Themenbereiche besonders zu berücksichtigen:

- Einflüsse auf das zentrale Nervensystem und Beeinflussung kognitiver Funktionen,
- Aufklärung von Mechanismen der Wirkung von niederfrequent-modulierten HF-Feldern auf zelluläre Systeme,
- Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke unter HF-Exposition,
- Bestimmung der Verteilung der absorbierten Energie von HF-Feldern im menschlichen Körper, insbesondere im Kopfbereich sowie Untersuchungen zur Mikroexposimetrie in Geweben und Zellen,
- Untersuchungen neurophysiologischer Prozesse bei Nutzung von Mobiltelefonen,
- Blutparameter und Immunsystem,
- Untersuchungen zu krebsrelevanten Proteinen, Krebsentstehung und -promotion,
- spontane und initiierte Tumorbildung.

## **4.2 Themenbereiche, die den gesamten Frequenzbereich der elektromagnetischen Felder umfassen**

### **4.2.1 Einfluss unterschiedlicher Expositionsdauern auf biologische Reaktionen**

In Experimenten unter Laborbedingungen weichen die Expositionsbedingungen oft erheblich von einer möglichen Exposition von Menschen in ihrer natürlichen alltäglichen Umgebung ab. Die Vereinfachung der Expositionsbedingungen im Labor ist unumgänglich, um zu reproduzierbaren Ergebnissen zu gelangen. Die Laborergebnisse sind dann ggf. auf die Exposition der Bevölkerung zu übertragen. Dazu sollte die Exposition der Bevölkerung in der heutigen technischen Umgebung hinreichend genau beschrieben werden.

Für die Übertragung von Laborergebnissen auf tatsächlich vorhandene Expositionsverhältnisse ist die Kenntnis von Wirkungsmodellen erforderlich. Bis jetzt gibt es keinen gesicherten Hinweis auf eine mögliche biologische Reaktion bei den schwachen elektromagnetischen Feldern des Alltags, die eine Relevanz für eine Gesundheitsbeeinträchtigung hat. Für die langfristige Exposition, wie sie durch die moderne Technik gegeben ist, sollten überprüfbare Wirkungsmodelle entwickelt und dann ggf. in geeigneten Experimenten überprüft werden.

### **4.2.2 Zusammenhänge zwischen unspezifischen Krankheitssymptomen und Expositionen durch schwache Felder**

In der Bevölkerung wird immer wieder der Verdacht geäußert, dass die Exposition durch elektromagnetische Felder, wie sie im Alltag auftreten können, zu einer Reihe von unspezifischen Krankheitssymptomen führen könnte. Dieses wird durch Einzelfallbeschreibungen gestützt. Alle Versuche, diese unter reproduzierbaren Expositionsbedingungen zu verifizieren, sind bisher gescheitert. Gruppen von Personen, die sich als elektrosensibel bezeichnen und die

über Gesundheitsbeeinträchtigungen klagen, die sie auf die Einwirkung elektromagnetischer Felder zurückführen, sind sehr inhomogen, sowohl in Bezug auf ihre soziologischen Eigenschaften und das Beschwerdebild als auch bezüglich objektiv erfassbarer Empfindlichkeitsparameter. Das bedeutet, dass Elektrosensibilität medizinisch nach wie vor ein Arbeitsbegriff ist und sich auch indirekt nicht über eine Symptom- oder Risikogruppencharakterisierung erfassen lässt.

Der Leidensdruck der betroffenen Personen kann jedoch erheblich sein und die Überzeugung von einer kausalen Rolle elektromagnetischer Felder so groß werden, dass sich elektrosensible Personen zu gravierenden Änderungen der Lebensumstände entschließen.

Die bisherigen Ergebnisse weisen jedoch darauf hin, dass außer der hypothetischen Rolle der elektromagnetischen Felder auch andere Faktoren eine wesentliche Bedeutung haben müssen.

Um verlässliche Daten zu erhalten, muss eine ausreichende Anzahl von Probanden, die vorher zu ermitteln ist, untersucht werden.

#### **4.2.3 Unterschiede in der biologischen Reaktion zwischen kontinuierlicher und gepulster Strahlung**

In Veröffentlichungen wird immer wieder angeführt, dass niederfrequent amplitudenmodulierte oder gepulste elektromagnetische Strahlung eine spezifische nichtthermische biologische Reaktion zur Folge hätte. Dies habe z.B. bei GSM- und DECT-Anwendungen oder bei der Phasenanschnittstechnologie in der Niederfrequenz einen maßgeblichen Anteil an Gesundheitsbeeinträchtigungen. Für diese Aussage gibt es bis jetzt keinen wissenschaftlich begründeten Verdacht.

Es sind daher *in vitro*- wie auch *in vivo*-Untersuchungen notwendig, die diese Fragestellung klären können. Dazu müssten für unterschiedliche, relevante biologische Endpunkte in einem Untersuchungssystem sowohl kontinuierliche wie auch entsprechende gepulste Expositionen unter vergleichbaren Bedingungen durchgeführt werden.

#### **4.2.4 Störung elektronischer Implantate durch elektromagnetische Felder**

Elektronische Implantate, wie z.B. Herzschrittmacher, können durch verschiedene Felder des Alltags derart gestört werden, dass ihr temporärer Ausfall die vitalen Funktionen des Körpers gefährden kann. Mit zunehmender Anzahl der feldemittierenden Systeme und der elektronischen Implantate steigt die Möglichkeit, dass es zu einer relevanten Gefährdung von Implantatträgern kommen kann.

In geeigneten Untersuchungen sollten die Störschwellen der infrage kommenden Implantate in Feldern des Alltags ermittelt werden. Für die Einschätzung des Gefährdungspotentials ist es auch erforderlich, dass der tatsächliche Sicherheitsabstand in den einzelnen Feldern der unterschiedlichen Technologien (Mobilfunk, Warensicherungssysteme etc.) bestimmt wird.

Die zur Messung und zur Beschreibung der Wirkung auf elektronische Implantate verwendeten Körpermodelle sind nicht immer hinreichend validiert. Probandenuntersuchungen könnten belastbare Daten für die Aussagefähigkeit und -sicherheit solcher Körpermodelle geben.

#### 4.2.5 Risikowahrnehmung und Risikokommunikation

Bei der Wahrnehmung eines möglichen Risikos für Gesundheitsbeeinträchtigungen durch die Exposition mit elektromagnetischen Feldern gehen die Meinungen der Mehrzahl der in diesem Bereich tätigen Fachleute und Teilen der Allgemeinbevölkerung oft erheblich auseinander.

Es ist zu klären, wie sich die Wahrnehmung der Bevölkerung zu den Fragestellungen der unterschiedlichen Anwendungen (Eisenbahn, elektrische Energieversorgungsanlagen, Rundfunk und Fernsehen, Mobilfunk und Radar) qualitativ und quantitativ zusammensetzt und auf welchen Faktoren die Risikowahrnehmung von unterschiedlichen Gruppen in der Bevölkerung beruht.

Mit diesem Wissen kann erheblich besser den Zielgruppen angepasstes Informationsmaterial erstellt werden. Die Wirksamkeit von verschiedenen Maßnahmen, wie schriftliches Informationsmaterial, Internet-Darstellungen, Vorträge, Diskussionen etc. müsste untersucht werden, um optimale Strategien für die Risikokommunikation entwickeln zu können.

### 4.3 Themen im Bereich niederfrequenter Magnetfelder

#### 4.3.1 Assoziation zwischen 50 Hz-Magnetfeldern und Leukämie bei Kindern

Nachdem in einer Reihe von epidemiologischen Studien eine statistische Assoziation zwischen dem Auftreten von Leukämie bei Kindern und einer weit über dem Bundesdurchschnitt liegenden hohen, zeitlich gemittelten Magnetfeldexposition in der Wohnung (über 0,3  $\mu\text{T}$  oder 0,4  $\mu\text{T}$  je nach Studie) gefunden wurde, hat auch die IARC<sup>8</sup> diese Felder als möglicherweise krebserregend eingestuft. Die Kausalität dieser Beziehung ist jedoch weder durch die bisher durchgeführten *in vitro*- und *in vivo*-Untersuchungen nachvollziehbar noch durch plausible Wirkungsmechanismen für die Einwirkung derart schwacher magnetischer Felder im Organismus.

Es ist daher weitere Forschung zur Klärung dieser Fragestellung notwendig. Dabei geht es nicht um die weitere Wiederholung der Ergebnisse der epidemiologischen Studien, sondern um weitere Möglichkeiten, die Wirkungshypothese zu untersuchen. Mögliche Wege wären dazu: die Suche nach geeigneten Tiermodellen für die kindliche Leukämie und Expositionsversuche mit diesem Modell. Sinnvoll könnten auch Versuche mit geeigneten Zellkulturen zur Klärung einer möglichen Promotion durch Magnetfelder sein, wobei hierfür überprüfbare Wirkungsmodelle noch weiterer Grundlagenforschung bedürfen. Des Weiteren sollte untersucht werden, welche anderen Faktoren die epidemiologischen Befunde wesentlich beeinflusst haben könnten.

#### 4.3.2 Untersuchungen von neurodegenerativen Erkrankungen im Zusammenhang mit Magnetfeldexposition

In epidemiologischen Studien wurden Assoziationen zwischen der Exposition durch niederfrequente Magnetfelder und einer Reihe von neurodegenerativen Erkrankungen beschrieben. In den Studien wurden amyotrophische Lateralsklerose (ALS), Parkinson- und Alzhei-

---

<sup>8</sup> IARC: International Agency for Research on Cancer

mer-Erkrankungen untersucht. Auch wenn diese Befunde noch nicht widerspruchsfrei sind und es nur wenige experimentelle Arbeiten gibt, die auf eine mögliche Beeinflussung von neuronalem Gewebe durch niederfrequente Magnetfelder schließen lassen, ist diesen Hinweisen nachzugehen.

Bei der amyotrophischen Lateralsklerose (ALS) sind die Hinweise so konsistent, dass weitere Forschung angezeigt ist. Dabei ist besonderer Wert auf eine Expositionserfassung und auf einen möglichen Zusammenhang mit elektrischen Schocks sowie mit medizinischer Therapie, in der elektrischer Strom zur Behandlung eingesetzt worden ist, zu legen.

### **4.3.3 Beeinflussbarkeit des Melatoninstoffwechsels durch Magnetfelder**

Das Hormon Melatonin wird in der Zirbeldrüse gebildet. Die Freisetzung folgt einem Tag-Nacht-Rhythmus. Am Tage ist die Melatoninkonzentration im Blut gering und in der Nacht hoch. Die Bildung und Freisetzung in den Blutkreislauf wird bei Licht unterdrückt. Die inter- und intraindividuellen Variationen der Melatoninkonzentration sind sehr groß und werden von Faktoren wie Alter, Geschlecht, Lebensgewohnheiten (z.B. Rauchen) bestimmt. Im Zusammenhang mit Krebserkrankungen werden vor allem die hemmende Reaktion auf die Zellteilung sowie die Eigenschaft des Melatonins als Radikalfänger betrachtet.

Bereits vor der Diskussion über eine Beeinflussung durch elektromagnetische Felder wurden Hypothesen aufgestellt, wonach eine Verringerung der Melatoninbildung mit einer Förderung der Krebsentwicklung einhergehen könnte. Allerdings haben die älteren Studien weder überzeugend einen Einfluss von Magnetfeldexpositionen auf den Melatoninhaushalt des Menschen zeigen können, noch sprachen die Studienergebnisse insgesamt für einen Zusammenhang zwischen niederfrequenten Feldern und Endpunkten wie Krebs oder Beeinträchtigung des psychischen Wohlbefindens. Die Ergebnisse von Tierversuchen, die im Wesentlichen an Nagetieren durchgeführt wurden, haben kein einheitliches Bild ergeben. In den neueren Arbeiten konnte überwiegend kein Zusammenhang bei Tieren wie auch bei Probanden gefunden werden.

In Zellexperimenten gibt es Hinweise auf eine Veränderung der Melatonin-Wirkung, wenn diese Zellen einem niederfrequenten Magnetfeld ausgesetzt waren. Es ist zu klären, ob die bis jetzt durchgeführten Untersuchungen an Probanden ausreichend sind. Mit Priorität ist jedoch die biologische Bedeutung einer Beeinflussung des Melatoninstoffwechsels generell zu untersuchen. Neben Untersuchungen des Zusammenhangs zwischen EMF und Melatonin steht hier die Erforschung des Zusammenhangs zwischen optischer Strahlung und Melatonin im Vordergrund.

### **4.3.4 Einflüsse auf das kardiovaskuläre System**

Auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse von Probandenstudien zur Variabilität des Herzschlags in Abhängigkeit von einer nächtlichen Magnetfeldexposition mit einigen  $10 \mu\text{T}$  wurde die Hypothese aufgestellt, dass langfristige Expositionen mit niederfrequenten Magnetfeldern das Risiko von bestimmten Herzerkrankungen, wie z.B. akuter Herzinfarkt, erhöhen. Eine epidemiologische Studie fand einen Zusammenhang zwischen der Dauer der Beschäftigung an einem Arbeitsplatz mit wahrscheinlich höherer Exposition und dem Auftreten von Todesfällen, die auf akute Herzrhythmusstörungen bzw. akuten Herzinfarkt zurückzuführen sind. Vor allem die indirekte retrospektive Expositionserfassung über lange Zeiträume und die Zuordnung und Interpretation der Todesursachen beschränken aber die Aussagekraft der Studie.



Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Frage, ob Einflüsse auf das kardiovaskuläre System auftreten, sind jedoch insgesamt als wissenschaftlicher Hinweis zu werten. Ob eine gesundheitlich relevante Reaktion vorliegt, kann nur mittels weiterer Forschung geklärt werden.

#### **4.3.5 Untersuchungen zu teratogenen Wirkungen elektromagnetischer Felder**

In neuen epidemiologischen Studien wird der schon früher diskutierte Zusammenhang zwischen Magnetfeldern und einem erhöhten Risiko einer Fehlgeburt erneut aufgegriffen. Während sich früher inkonsistente Ergebnisse aus Studien insbesondere zu an Bildschirmen arbeitenden Frauen zeigten, weisen die neuen Studien auf ein erhöhtes Fehlgeburtenrisiko bei bereits sehr kurzzeitigen Expositionen mit niederfrequenten Magnetfeldern oberhalb 1,6  $\mu\text{T}$  im Alltag hin. Diese Ergebnisse bergen eine enorme Brisanz, da derartige Expositionen praktisch in allen Lebensbereichen auftreten können. Deswegen und unter der Berücksichtigung der Unzulänglichkeiten dieser epidemiologischen Studien sind überprüfende tierexperimentelle Untersuchungen dringend erforderlich.

### **4.4 Themen im Bereich hochfrequenter elektromagnetischer Felder**

#### **4.4.1 Einflüsse auf das zentrale Nervensystem und Beeinflussung kognitiver Funktionen**

Ein Einfluss niederfrequenter elektrischer und magnetischer sowie hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf die Signalverarbeitung neuronaler Strukturen ist seit vielen Jahren ein Thema der Forschung.

Es gibt derzeit einige Publikationen, die einen akuten Einfluss der Mobilfunkfelder mit bis zu oder unterhalb der empfohlenen Teilkörper-SAR von 2 W/kg auf verschiedene neuro- und psycho-physiologische Parameter sowie Schlafparameter beim Menschen gezeigt haben. Diese Modulationen liegen jedoch im normalen Schwankungsbereich und zeigen keine pathologischen Charakteristiken auf. Die bisherigen Studien sind sehr heterogen.

Ziel der Forschung sollte es sein, zu klären, ob hochfrequente elektromagnetische Felder, die von Mobilfunktelefonen emittiert werden, die Hirnaktivität beeinflussen können. Es gibt keine Hinweise, dass gepulste oder kontinuierliche hochfrequente Felder im nicht-thermischen Bereich ein erhöhtes gesundheitliches Risiko für das Gehirn darstellen. Trotzdem sollte aber geklärt werden, welche physiologischen Änderungen bei zulässigen Expositionen auftreten, welcher Wirkungsmechanismus verantwortlich ist und welche individuellen Ausgangssituationen eine Empfindlichkeit fördern.

Für Mobiltelefone gibt es keine gesetzliche Regelung zur Expositionslimitierung. Teilkörper-SAR-Werte der international akzeptierten Grenzwertempfehlungen verhindern eine gesundheitliche Beeinträchtigung, schließen aber das Auftreten von biologischen Effekten und Reaktionen nicht aus. Im Rahmen der Vorsorgemaßnahmen, bei denen eine Kennzeichnung der Endgeräte beabsichtigt wird, ist es absolut wichtig, SAR-Werte zu kennen, bei denen eine Beeinflussung der Hirnaktivität nicht mehr auszuschließen ist. Daher sind weitere Untersuchungen notwendig.

#### 4.4.2 Aufklärung von Mechanismen der Wirkung von niederfrequent-modulierten HF-Feldern auf zelluläre Systeme

Die Kenntnis biophysikalischer Primärmechanismen ist eine wichtige Grundlage für die Festlegung von Schwellenwerten von Effekten und Reaktionen. Zu diesem Zwecke sollte der Ermittlung der Wirkungsschwellen 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.

Bei unterschiedlichen Technologien (GSM<sup>9</sup>, UMTS, TETRA<sup>10</sup>, Bluetooth etc.) werden verschiedene Signalformen und Frequenzen verwendet. Es ist zu klären, inwieweit Ergebnisse aus einem Bereich auf andere Bereiche übertragen werden können.

Ein wichtiges Thema zur Aufklärung der Fortleitung und Verstärkung elektromagnetischer Feldeffekte sind Signaltransduktionswege, die bis zu Vorgängen der Proteinexpression und -synthese führen und damit Proliferations- und Differenzierungsmechanismen beeinflussen können. Besondere Beachtung sollte die Bestimmung möglicher Schwellendosen und systembedingter Frequenzfenster finden.

#### 4.4.3 Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke unter HF-Exposition

Die Blut-Hirn-Schranke schützt u.a. das Gehirn vor unkontrollierter Aufnahme von Substanzen.

In noch nicht wiederholten Versuchen an Ratten wurde eine erhöhte Durchlässigkeit für das Protein Albumin bei sehr geringen SAR-Werten gefunden.

Da die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke bei einigen Erkrankungen des Gehirns im Verdacht steht, einen nicht unwesentlichen Beitrag zu leisten, ist diesem Verdacht nachzugehen. Dabei ist von Expositionen auszugehen, wie sie bei der Nutzung von Mobiltelefonen zustande kommen.

Es sollten nicht nur in Experimenten an Labortieren die Ergebnisse der Erstuntersuchung überprüft werden, sondern auch in *in vitro*-Experimenten dieses Zellsystem eingehend untersucht werden.

#### 4.4.4 Bestimmung der Verteilung der absorbierten Energie von HF-Feldern im menschlichen Körper, insbesondere im Kopfbereich, sowie Untersuchungen zur Mikroexposimetrie in Geweben und Zellen

Die Werte der spezifischen Absorptionsrate (SAR-Werte) hängen bei gegebenem äußerem HF-Feld stark von den jeweiligen anatomisch-topologischen Verhältnissen ab. Daher müssen zusätzlich zu den bisher im Wesentlichen für vereinfachte Geometrien bereits durchgeführten Berechnungen und Messungen weitergehende Untersuchungen unter realitätsnäheren Bedingungen vorgenommen werden.

---

<sup>9</sup> GSM: Global System for Mobile Communications

<sup>10</sup> TETRA: Terrestrial Trunked Radio

Insbesondere interessiert hierbei die genauere Nachbildung der betreffenden Körperregion(en), und zwar unter Berücksichtigung der thermodynamischen Auswirkungen auf möglicherweise sensible lokale Strukturen und die Beachtung physiologischer Gegebenheiten, wie sie z.B. durch die Durchblutung zeit- und ortsabhängig verändert werden können. Unter anderem geht es dabei auch um die Ermittlung der zeitdynamischen Temperaturverteilung im Organ bzw. Gewebe selbst in Korrelation zur Felddynamik und nicht nur um die auf die Körperoberfläche transformierte bzw. abgebildete Temperaturverteilung, wie sie im Wesentlichen dem Prinzip der Wärmebilddarstellung bzw. der Thermografie entspricht.

In diesem Zusammenhang ist auch die Wahl der bisher empfohlenen bzw. festgelegten Mittelungsmasse organ- bzw. körperregionspezifisch im Hinblick auf die jeweils möglichen Effekte bzw. (biologischen) Reaktionen neu zu betrachten und gegebenenfalls den Erfordernissen im Hinblick auf eine schlüssigere Bestimmung der Verteilung der absorbierten Energie zu modifizieren.

Obwohl grundlegende Kenntnisse über die frequenzabhängige Verteilung von elektrischen Strömen und das Vorhandensein elektrischer Potenziale in der komplexen Permittivität (dielektrische Permittivität und spezifische elektrische Leitfähigkeit) des Körpergewebes seit langem vorliegen, ist dennoch das detaillierte Wissen bezüglich der tatsächlichen Feldverteilungen in mikroskopischen Strukturen und im zellulären Bereich noch unvollständig. Entsprechende Betrachtungen und Messungen bezüglich der Verhältnisse im Inter- und Intrazellularraum (z.B. im Spaltbereich, bei der Zell-Zell-Kommunikation, in der Zellmembran, im gebundenen Wasser usw.) sollten durch Bestimmung der komplexen Impedanz auf mikroskopischer Ebene durchgeführt werden. Dazu bieten sich u.a. die Methoden der Elektrorotation und der Dielektrophorese an. Außerdem kann die Entwicklung geeigneter Modelle zur Berechnung der entsprechenden Systeme und Systembausteine nützlich sein.

#### **4.4.5 Untersuchungen neurophysiologischer Prozesse bei Nutzung von Mobiltelefonen**

Tierexperimente und Untersuchungen mit Probanden zeigen vereinzelt Effekte auf das Zentralnervensystem bei Expositionen, wie sie beim Mobilfunk als Teilkörperexpositionen am Kopf auftreten. In der Literatur wird über den Einfluss auf die kognitiven Prozesse des Lernens und des Gedächtnisses wie auch über die Beeinträchtigung des Schlafes berichtet.

Wegen der damit möglicherweise verbundenen gesundheitlichen Konsequenzen für die breite Bevölkerung bedarf es einer weiteren streng kontrollierten Überprüfung dieser initialen Befunde. Dazu sollten sowohl weitere Versuche an Probanden wie auch Tierexperimente durchgeführt werden, wobei ein besonderes Augenmerk auf Wiederholungsversuche gelegt werden sollte.

#### **4.4.6 Blutparameter und Immunsystem**

Änderungen im blutbildenden System haben eine besondere gesundheitliche Relevanz, deshalb wurde das Blut von verschiedenen Labortieren auf die Blutbestandteile und immunologische und blutchemische Parameter untersucht. In verschiedenen Studien wurden keine Veränderungen gefunden, aber Einzelergebnisse in Tierstudien deuten Hinweise an, dass es durch den Einfluss hochfrequenter Felder zu Abweichungen im Immunsystem von Mäusen, z.B. der Aktivität von Makrophagen oder der Abnahme von Monozyten, gekommen ist, auch im Zusammenhang mit bestimmten Nahrungsmitteln.

Es ist zu klären, ob gepulste Felder der Mobilfunktechnologie einen Einfluss auf das Blutssystem und auf die Erkrankungen des Blutsystems ausüben.

Die Ergebnisse werden dringend benötigt, um den Hinweisen mit einem biologischen Modell nachzugehen. Der in Zukunft weiter steigende Bedarf an mobiler Kommunikationstechnik wird die Gesamtexposition der Bevölkerung erhöhen. In der Grenzwert- und Vorsorgediskussion ist die Frage einer möglichen Beeinflussung chronischer Mobilfunkexposition auf die Entstehung z.B. von Blutkrebs nur mit experimentellen Daten zu klären.

#### **4.4.7 Untersuchungen zu krebsrelevanten Proteinen, Krebsentstehung und -promotion**

Die immer wieder geäußerte Behauptung, elektromagnetische Felder würden den Zellstoffwechsel und die Zyklusprogression beeinflussen, muss mit gezielten Experimenten kritisch hinterfragt werden. Es bieten sich hier Untersuchungen mit untransformierten Zellen unter sehr genauer Charakterisierung der Expositionsbedingungen an. Eine eventuelle Veränderung der Genexpression lässt sich mit Hilfe von heute kommerziell erhältlichen „Genechips“ realisieren, mit Hilfe derer die Transkriptionsaktivität einer großen Zahl von Genen parallel gemessen werden kann. Besonderes Augenmerk ist dabei auf „Stressproteine“ sowie Oncogene zu legen. Zu beachten ist auch der „p53-Status“ der eingesetzten Zelllinien.

#### **4.4.8 Spontane und initiierte Tumorbildung**

Es gibt eine Reihe genetisch gut charakterisierter Mäusestämme mit unterschiedlicher spontaner Tumorzinzidenz. An ihnen kann der Einfluss elektromagnetischer Felder sowohl auf eine Veränderung der spontanen Krebsrate als auch durch den Vergleich verschiedener Stämme auf die Initiierung von Tumoren untersucht werden. Auf eine präzise Erfassung der Expositionsbedingungen als auch eine genügende statistische Aussagekraft durch eine hinreichende Zahl von Versuchstieren ist hierbei besonderer Wert zu legen.

## **5. Ultraschall**

### **5.1 Allgemeine Gesichtspunkte**

Bildgebende Ultraschallverfahren mit Frequenzen zwischen 1 MHz und 100 MHz sind heute ein unentbehrliches Hilfsmittel der medizinischen Diagnostik.

Ultraschallbedingte Einflüsse auf menschliches Gewebe werden üblicherweise eingeteilt in thermische und mechanische (hauptsächlich kavitative) Effekte (vgl. auch [SSK 97b]).

Gewebe- und daraus resultierende Gesundheitsschäden können nach derzeitigem Wissensstand für lokale Temperaturerhöhungen von 1,5 °C oder weniger ausgeschlossen werden. Dies gilt insbesondere auch für fetales und embryonales Gewebe. Ab einer deutlich größeren lokalen Temperaturerhöhung ( $\Delta T = 4$  °C, NCRP<sup>11</sup>:  $\Delta T = 3$  °C) sind in Abhängigkeit von der Expositionszeit gesundheitsschädigende Effekte zu erwarten. Derartige Expositionen sind vor allem von gepulsten Dopplerverfahren zu erwarten, so dass weitere Forschungsarbeiten zum thermischen Risiko von Ultraschalluntersuchungen im Wesentlichen die Ableitung und Aktu-

---

<sup>11</sup> NCRP: National Council of Radiation Protection

alisierung von geeigneten thermischen Parametern und deren gerätetechnische Implementierung und Dokumentation beinhalten sollten.

Im Falle der mechanischen Gewebeschädigung deuten neuere Ergebnisse darauf hin, dass (v.a. bei Verwendung von Kontrastmitteln) auch unterhalb der bisher angenommenen Schwellenwerte für die Druckamplitude (1 MPa für die Lunge, 2 MPa für den Darm und 5 MPa für sonstige Gewebe) mechanische Schäden auftreten können. Aus diesem Grund sollten sowohl Wirkungsschwellen als auch der Bezug zu Schallfeldparametern geklärt werden. Des Weiteren ist es notwendig, die aktuell verwendeten, abgeleiteten Parameter (in diesem Fall mechanischer Index, MI) auf die Brauchbarkeit im Hinblick auf die gefundenen Effekte zu überprüfen.

Hauptziel der Forschung zum medizinischen Ultraschall sollte es sein, die Schwellenwerte für das Einsetzen schädigender Effekte zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen sowie die abgeleiteten Parameter (z.B. TI (thermischer Index) und MI) unter Verwendung der gewonnenen Erkenntnisse weiter zu verbessern. Dazu gehört auch, technische Möglichkeiten zu finden, wie diese Parameter optimal auf die individuelle klinische Situation abgestimmt und als Anzeigeparameter gerätetechnisch implementiert werden können.

## 5.2 Thermische Aspekte

Grundlage für eine Beurteilung thermischer Effekte im Gewebe bildet der heute meist geräteseitig implementierte thermische Index TI bzw. die Varianten TIS (*soft-tissue thermal index*), TIB (*bone thermal index*) und TIC (*cranial bone thermal index*). Diese Werte werden aus den ermittelten Schallfeldparametern, der Gewebetiefe und festgelegten Schwächungskoeffizienten abgeleitet. Dabei geht man davon aus, dass keine negativen gesundheitlichen Auswirkungen für  $TI < 1$  zu erwarten sind. Im Betrieb erfolgt keine regelmäßige Qualitätskontrolle oder Kalibrierung der Geräte, so dass Änderungen in den Schallfeldparametern z.B. nach Wartung oder durch Verschleiß gegebenenfalls nicht berücksichtigt werden. Darüber hinaus kann das Maß der Temperaturerhöhung bei Benutzung von TI in der momentanen Form sowohl über- als auch unterschätzt werden.

Um Temperaturerhöhungen über den Schwellwert hinaus zuverlässig ausschließen zu können, ist eine genauere Kenntnis der jeweils tatsächlich vorliegenden Temperaturerhöhung sowie deren Dauer notwendig. Zukünftige Forschungsansätze bezüglich thermischer Aspekte von medizinischem Ultraschall sollten deshalb zum Ziel haben:

- Untersuchung von technischen Möglichkeiten zur regelmäßigen Kalibrierung von Ultraschallgeräten,
- Untersuchung von gerätetechnischen Möglichkeiten zur Berücksichtigung der individuellen Gegebenheiten, wie z.B. Schallweg und Schallschwächung,
- Untersuchung der Beziehung zwischen Dauer und Höhe der im Gewebe vorliegenden Temperaturerhöhung und biologischen Effekten,
- Schaffung von Möglichkeiten, die Dauer einer Temperaturerhöhung als Expositionsmaß in den entsprechenden Anzeigeparameter zu implementieren.

Für den 2. und 4. Punkt sollte geprüft werden, ob die notwendigen Daten an Hand von auf alle möglichen speziellen Fälle hin optimierten Phantommodellen gewonnen werden können. Ne-

ben dem Schallweg sind in diesem Modell vor allem auch die dielektrischen Eigenschaften des Gewebes und Randbedingungen der Perfusion zu berücksichtigen.

### 5.3 Mechanische Aspekte

Die Möglichkeit mechanischer, kavitativer Schäden in verschiedenen Geweben wurde bislang für Druckamplituden kleiner als 5 MPa ausgeschlossen (Lunge: 1 MPa, Darm: 2 MPa). Studien der letzten Jahre deuten jedoch auf Effekte (Blutungen) bereits unterhalb dieser Schwellen hin, was eine Überprüfung und Neubewertung notwendig erscheinen lässt. Als Forschungsschwerpunkte im Bereich mechanischer Wirkungen von medizinischem Ultraschall sind daher zu empfehlen:

- Überprüfung und gegebenenfalls Neubestimmung von mechanischen Wirkungsschwellen in unterschiedlichen Geweben im Hinblick auch auf den vermehrten Einsatz leistungsstarker Ultraschallverfahren sowie von Kontrastmitteln,
- Untersuchung von Ursache-Wirkungszusammenhängen und dem jeweiligen Einfluss von Druckamplitude und negativem Spitzendruck,
- Untersuchung der gerätetechnischen Möglichkeiten bezüglich einer möglichst exakten Bestimmung und Implementierung des Parameters MI (s.o.),
- Überprüfung und gegebenenfalls Anpassung des abgeleiteten Parameters MI.

## 6 Literatur

- [EU 99] Empfehlung (1999/519/EG) des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz)
- [SSK 97a] Strahlenschutzkommission:  
Schutz des Menschen vor solarer UV-Strahlung, Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 144. Sitzung am 27. Februar 1997
- [SSK 97b] Strahlenschutzkommission:  
Empfehlungen zur Patientensicherheit bei Anwendungen der Ultraschalldiagnostik in der Medizin, Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 150. Sitzung am 11./12. Dezember 1997. BAnz Nr. 145a (Beilage) vom 07. August 1998
- [SSK 98a] Strahlenschutzkommission:  
Vorschlag zur Weiterentwicklung der Forschung zum Schutz vor nichtionisierenden Strahlen, Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 151. Sitzung am 11./12. Februar 1998. BAnz Nr. 145 vom 07. August 1998
- [SSK 98b] Strahlenschutzkommission:  
Gefahren durch Laserpointer, Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 152. Sitzung am 23./24. April 1998. BAnz Nr. 144 vom 06. August 1998
- [SSK 00] Strahlenschutzkommission:  
Gefahren bei Laseranwendung an der menschlichen Haut, Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 169. Sitzung am 31. Oktober 2000

- [SSK 01a] Strahlenschutzkommission:  
Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern, Empfehlung der Strahlenschutzkommission mit wissenschaftlicher Begründung, verabschiedet in der 173. Sitzung am 04. Juli 2001
- [SSK 01b] Strahlenschutzkommission:  
Schutz des Menschen vor den Gefahren der UV-Strahlung in Solarien, Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 172. Sitzung am 08. Juni 2001
- [WHO 97] World Health Organisation:  
International EMF Project, Health Effects of Static and Time Varying Electric and Magnetic Fields, WHO's Agenda for EMF Research, 1997