

Biomed. Technik  
45 (2000), 98-104

B. Meffert<sup>1</sup>  
H. Meffert<sup>2</sup>

## Optische Strahlung und ihre Wirkungen auf die Haut

### Optical Radiation and its Effects on the Skin

<sup>1</sup>Institut für Informatik der Humboldt-Universität zu Berlin

<sup>2</sup>Klinik für Dermatologie, Medizinische Fakultät Charité der Humboldt-Universität zu Berlin

*Schlüsselwörter:* optische Strahlung, UV-Strahlung, Licht, IR-Strahlung, Phototherapie

Optische Strahlung reicht von kurzwelliger ultravioletter Strahlung über sichtbares Licht bis hin zu fernem Infrarot. Natürliche und künstliche Quellen optischer Strahlung verursachen erwünschte und unerwünschte Wirkungen an der Haut und am gesamten Menschen. Deren Art und Ausmaß sind in erster Linie von der Energie des Photons, dem Absorptionsvermögen der Chromophore, der mittleren Eindringtiefe und der Strahlungsdichte und -dosis abhängig. Gesondert für Ultraviolettstrahlung, Licht und Infrarotstrahlung wird über die Wirkmechanismen im Organismus, unerwünschte und erwünschte Effekte einschließlich therapeutischer Anwendungen berichtet.

*Key words:* Optical radiation – UV radiation – light – IR radiation – phototherapy

Optical radiation ranges from short wave ultraviolet via visible light to the far infra-red. Both natural and artificial light sources may cause desired and undesired effects, both on the skin and on the organism as a whole. The nature and extent of such effects depend primarily on the energy of the photons, the absorption capacity of the chromophores, the mean depth of penetration, and on the density and dose of the radiation.

The present paper discusses the mechanisms of action and desired and undesired effects in the organism, including therapeutic applications, separately for ultraviolet radiation, visible light and infrared radiation.

## 1 Einführung

Als optische Strahlung werden elektromagnetische Wellen und Felder bezeichnet, deren Photonenenergie weniger als 12,4 eV beträgt und deren Wellenlängen zwischen 100 nm und 1 mm liegen. Bild 1 zeigt die Einordnung der optischen Strahlung in das elektromagnetische Spektrum, Tabelle 1 die in DIN 5031-7 für die Strahlungsphysik und Lichttechnik definierten Wellenlängenbereiche.

Die Infrarot- oder Wärmestrahlung wurde erstmals im Jahre 1800 von dem Astronomen Sir William Herschel (geb. 1738 als Friedrich Wilhelm Herschel, gest. 1822) nachgewiesen. Ziel seines klassischen Experiments war die Bestimmung der Temperaturen der Spektralfarben. Dazu projizierte er in einem ansonsten abgedunkelten Raum die durch ein Prisma zerlegte Sonnenstrahlung auf einen Tisch. Die Erwärmung der Tischplatte wurde mit Thermometern gemessen. Unmittelbar hinter (*infra*) dem Rot fand er die höchsten Temperaturen. In seinem Bericht an die Royal Society London beschreibt Herschel die Wärmestrahlung

als „dark heat“. Herschel konnte auch noch Reflexion und Brechung dieser neuen Strahlung nachweisen.

Der Nachweis der ultravioletten Strahlung gelang im Jahre 1801 Johann Wilhelm Ritter, dem „verrückten Physikprofessor aus Jena“, mit einem ähnlichen experimentellen Aufbau. Als Indikator benutzte er Silberchlorid. Unmittelbar hinter (*ultra*) dem Violett schwärzte sich das Silberchlorid am stärksten.

Die wichtigste natürliche Quelle optischer Strahlung ist die Sonne. Sie ist ein Temperaturstrahler. Die Zusammensetzung der auf die Erdoberfläche auftreffenden Sonnenstrahlung (Globalstrahlung) hängt stark vom Sonnenstand und vom Zustand der Atmosphäre ab.

Teilbereiche des sichtbaren Lichtes und der angrenzenden lang- und kurzwelligen Strahlung lassen sich aber auch mit künstlichen Quellen erzeugen. Diese arbeiten entweder auch als Temperaturstrahler (z. B. Glühlampen) oder nach dem Prinzip der elektrischen Entladung in Metalldämpfen oder Gasen (z. B. Quecksilberdampflampen, Laserstrahlungsquellen).

Bei natürlicher und künstlicher Strahlung nimmt

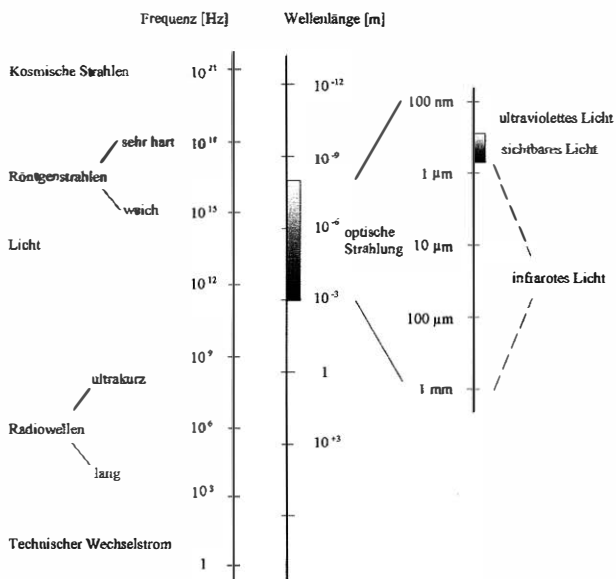


Bild 1. Einordnung der optischen Strahlung in das elektromagnetische Spektrum.

die Photonenenergie mit steigender Wellenlänge ab. Beispielsweise tragen dunkelrote Photonen (700 nm) nur halb so viel Energie wie violette (400 nm). Die Eindringtiefe in den menschlichen Organismus dagegen nimmt mit der Wellenlänge zu.

Zur quantitativen Beschreibung der Strahlung werden strahlungsenergetische oder von der Basiseinheit Candela abgeleitete photometrische Größen verwendet, die die Absorptionseigenschaften des menschlichen Auges berücksichtigen.

Für biologische Systeme hat die optische Strahlung wegen nützlicher und schädigender Wirkungen besondere Bedeutung. Diese Wirkungen hängen dabei nach dem Gesetz von Grotthus und Draper (1872) nicht von der eingestrahlten Energie, sondern von der Zahl der absorbierten Quanten ab. Mit Strahlungsempfängern kann die Anzahl absorbierten Quanten wellenlängenabhängig ermittelt werden. Die Darstellung der Quantenausbeute – dem photochemisch wirksamen Anteil der Quanten – in Abhängigkeit von der Wellenlänge wird als Aktionsspektrum oder Wirkungsspektrum einer Reaktion bezeichnet.

In Bild 2 sind einige Aktionsspektren dargestellt, die nach Anwendung dosisabgestufter, möglichst

Tabelle 1. Wellenlängenbereiche der optischen Strahlung nach DIN 5031-7.

Strahlung	Abkürzung	Wellenlängen [nm]
Ultraviolett		
Vakuum-UV	UV-C (VUV)	100 bis 200
Fernes UV	UV-C (FUV)	200 bis 280
Mittleres UV	UV-B	280 bis 315
Nahes UV	UV-A	315 bis 380
Sichtbares Licht	VIS	380 bis 780
Infrarot		
Nahes IR	NIR (IR-A)	780 bis 1400
	NIR (IR-B)	1400 bis 3000
Mittleres IR	IR-C (MIR)	3000 bis 50000
Fernes IR	IR-C (FIR)	50000 bis 10 <sup>6</sup>

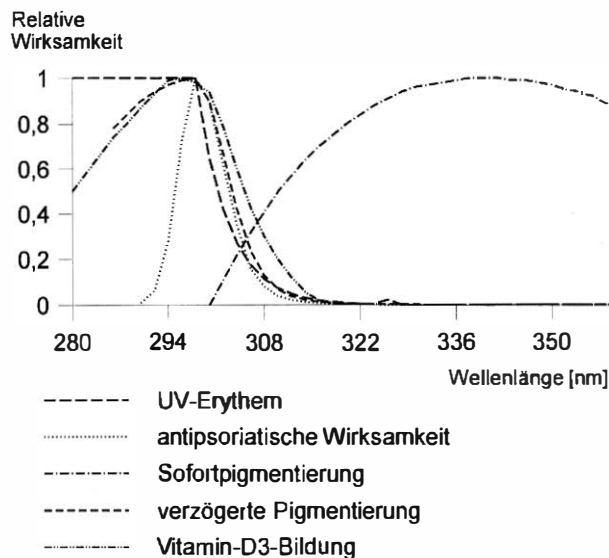


Bild 2. Aktionsspektren photobiologischer Effekte nach DIN 5031-10, 1996.

schmalbandiger Strahlung aufgestellt wurden. Das von der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) bestätigte Aktionsspektrum der UV-Erythembildung gilt als Bezugsgröße für die anderen dargestellten Spektren.

Auffällig ist die ausgeprägte Abhängigkeit aller dargestellten Wirkungen von der Wellenlänge und damit der Quantenenergie der Strahlung. Aus dem Bild ist auch ersichtlich, daß Sofortpigmentierung beispielsweise auch vom sichtbaren Licht ausgelöst werden kann. Einige Wirkungen im Ultraviolett fallen zwischen 300 und 330 nm um etwa den Faktor 1000 ab. Bei 300 nm häufen sich die Maxima erwünschter wie unerwünschter Effekte.

Die Kenntnis von Aktionsspektren ist eine wesentliche Voraussetzung für den gezielten Einsatz und die Prävention bei der Anwendung optischer Strahlung.

Ausgangspunkt aller photobiologischen Wirkungen optischer Strahlung ist deren Wechselwirkung mit Molekülen. Zielstrukturen sind im entsprechenden Teilbereich absorbierende Verbindungen, die sog. Chromophore (Tabelle 2).

Tabelle 2. Natürliche Chromophore in menschlichen Zellen und Geweben [8].

Chromophor	Absorption
Wasser	Infrarot (1000–1700 nm, Maxima bei 940, 1180, 1380 nm)
Nukleinsäuren	UV-B (Maximum bei 260 nm)
Proteine	UV-B (Maximum bei 270–280 nm)
Urocaninsäure	UV-B (240–280 nm)
Porphyrine, Hämoproteine	Blau (etwa 400 nm), weniger starke Banden im Grünen (500–560 nm) und Roten (620–650 nm)
Flavine	Blau (420–440 nm)
Karotinoide, Bilirubin	Blaugrün (460–500 nm)
Melanin	UV und VIS, mit ansteigender Wellenlänge abnehmend

Die Absorption von Lichtquanten und der intramolekulare Energietransport werden als physikalisches Primäreignis bezeichnet. Sie verlaufen sehr schnell, meist in Nano- bis Mikrosekunden. Es folgt als chemisches Sekundäreignis die Bildung freier Radikale und angeregter Sauerstoffspezies. Das sind ebenfalls ziemlich schnelle Vorgänge. Biologische Reaktionen, wie Entzündung, Pigmentierung oder auch therapeutische Effekte, benötigen Stunden bis Tage. Pathologische Frühwirkungen, wie durch Licht verursachte, durch Licht ausgelöste oder durch Licht verschlimmerte Erkrankungen, stellen sich innerhalb von Tagen bis Wochen ein. Pathologische Spätwirkungen, wie lichtprovozierter Hautkrebs oder lichtverursachte Hautalterung, sind erst nach Jahren bis Jahrzehnten erkennbar.

## 2 Ultraviolette Strahlung

### 2.1 Wirkmechanismen

Die Einteilung der UV-Strahlung in drei Teilbereiche (Tabelle 1) erfolgte anhand der biologischen Wirksamkeit des Sonnenspektrums. Nur mit dem UV-B-Anteil des Sonnenscheins konnte ein Sonnenbrand ausgelöst werden. Als UV-A wurde der Bereich zwischen UV-B-Strahlung und sichtbarem Licht definiert. Die UV-C-Strahlung der Sonne wird (noch) vollständig von der Atmosphäre absorbiert.

Wegen der relativ großen Quantenenergien sind die Auswirkungen der UV-Bestrahlung auf den Menschen schwerwiegender und deshalb auch besser untersucht als die des Lichtes und der Infrarotstrahlung. Die energiereiche UV-Strahlung vermag Biomoleküle, die in diesem Bereich stark absorbieren, unmittelbar oder mit Hilfe von Photosensibilisatoren zu modifizieren. UV-Bestrahlung startet oft Kettenreaktionen über radikalische Zwischenprodukte. Es sind aber auch „reine“ photochemische Reaktionen bekannt, wie die Bildung von Prävitamin-D<sub>3</sub> aus 7-Dehydrocholesterol. Photochemische Reaktionen können zu genetisch fixierten Veränderungen führen.

### 2.2 Schadwirkungen

Im Gegensatz zur Wärmestrahlung und zum sichtbaren Licht besitzt der Mensch kein Warnsystem, das ihn bei zu starker UV-Bestrahlung rechtzeitig alarmieren könnte. Akute oder chronische Schäden treten als Folge auf. Die Schadwirkungen betreffen vor allem die oberflächlichen Organe des Menschen, d. h. Haut und Augen. Durch Zellwanderung, die Entstehung und den Transport von Wirk- und Botenstoffen können auch tieferliegende Strukturen, letztlich der gesamte Organismus, einbezogen werden.

Die häufigste Akutwirkung ist der Sonnenbrand, der sein Auslösungsmaximum bei 297 nm, also im UV-

B, hat. Zu den häufigsten chronischen Schäden gehört die vorzeitige Hautalterung. Eigentlich ist die Haut ein spät alterndes Organ. Die Gesichtshaut eines Zwanzigjährigen ist so alt wie die Gesichtshaut eines Sechzigjährigen. Aber bei zu starker UV-Einwirkung verdrängt der tiefer eindringende UV-A-Anteil das kollagene Bindegewebe bei gleichzeitiger Vermehrung von minderwertigem elastischem Bindegewebe. Zusätzlich wird die Epidermis dünner. Stigmen der lichtgealterten Haut sind Falten, das Durchschimmern kleiner Blutgefäße durch die verdünnte, verletzte Epidermis und fleckige Hyperpigmentierung neben Pigmentverlust. Das Ausmaß der Lichtalterung ist der kumulativen UV-Dosis proportional: Die Haut vergißt keinen Sonnenstrahl.

UV-Strahlung ist ein komplettes Karzinogen. Sie vermag sowohl stabile, in Nukleinsäuren (DNS) verschlüsselte genetische Information zu erzeugen (Initiation) als auch Hyperproliferation bis zum Vollbild der Malignität (Promotion) hervorzurufen. Durch direkte UV-B-Absorption der DNS entstehen prämutagene Thymindimere. Mit steigender Wellenlänge (UV-A) geht die Bildung von Thymindimeren drastisch zurück. DNS-Strangbrüche und DNS-Protein-Vernetzungen dominieren. Körpereigene (Riboflavin, Bilirubin, Porphyrine, auch das photoprotektive Melanin) und aus der Umwelt stammende Photosensibilisatoren (Farbstoffe, einige Medikamente, aromatische Kohlenwasserstoffe, Kosmetika, Pflanzenextrakte) absorbieren UV-Energie und übertragen sie auch auf Nukleinsäuren. Die inakkurate Reparatur des DNS-Photoschadens wirkt karzinogen, wenn sie zu stabilen Veränderungen in kritischen Genen führt (*ras*-Gen beim malignen Melanom).

Durch veränderte Lebensweisen (Freizeitaktivitäten unter der Sonne, Urlaub in südlichen Gefilden, Aufenthalt im eigenen Garten, Solarienbesuche) werden die körpereigenen Reparatur- und Abwehrsysteme überfordert. Photokarzinogenese und vorzeitige Hautalterung sind die Folgen. Bislang ist dafür das persönliche Besonnungsverhalten ausschlaggebend, nicht das sogenannte Ozonloch. Hautkrebs ist der häufigste Krebs des Menschen. Die Inzidenz nimmt seit Jahrzehnten ständig zu, beim malignen Melanom jährlich um 2,5 %. Das Risiko, im Laufe des Lebens an einem Hautkrebs zu erkranken, liegt beim Basaliom bei 31 %, beim Spinaliom bei 18 % und beim malignen Melanom bei knapp 1 %. Zu den genetischen Voraussetzungen gehören Sonnenempfindlichkeit (Hauttypen I und II) und Mutationen (beim Goltz-Gorlin-Syndrom auf Chromosom 9), zu weiteren Risikofaktoren u. a. ionisierende Strahlung, chronische Hautschädigung durch Hitze oder immunsuppressive Therapie. Größtes Risiko besteht nach schweren Sonnenbränden in der Kindheit, vermindertes Risiko bei sich ständig im Freien aufhaltenden Forst- und Landarbeitern.

Bei frühzeitiger Behandlung können Basaliom und Spinaliom in über 90 % der Fälle geheilt werden, die

Tabelle 3. Therapeutische Anwendung von UV-Strahlung in der Dermatologie.

Therapie	Wirkfaktor	Beispiele für Strahler
Kombinierte UV-A/UV-B-Bestrahlung	Strahlung im Bereich 280-380 nm	Sonne Fluoreszenzstrahler
UV-A1-Therapie	Strahlung im Bereich 340-400 nm	Metallhalogenidstrahler mit Filter
UV-B	Strahlung im Bereich 280-315 nm	Fluoreszenzstrahler
Schmalband-UV-B	Strahlung im Bereich 312-313 nm	Fluoreszenzstrahler TL 01
Balneophototherapie	Sole + UV-Strahlung	Metallhalogenidstrahler Fluoreszenzstrahler
Photochemotherapie + UV-A (PUVA)	8-Methoxypsoralen	
Photophorese	UV-A-Bestrahlung des 8-Methoxypsoralenhaltigen Plasmas außerhalb des Körpers	
photodynamische Therapie	kombinierte Anwendung von Photosensibilisator + Licht	Licht, auch langwelliges UV

Fünfjahresüberlebensrate beim malignen Melanom liegt zwischen 17 % und 80 %.

Eine Prävention von Karzinogenese oder DNS-Schädigung ist auch mit Sonnen- oder Lichtschutzmitteln kaum möglich. Diese enthalten Substanzen, die UV-Strahlung absorbieren (Benzochinone, p-Aminobenzoessäure-, Zimtsäureabkömmlinge) oder reflektieren (mikronisiertes, ummanteltes Titandioxid bzw. Zinkoxid). Der Sonnenschutzfaktor (SPF) definiert den Erythemschutz durch 2 mg Sonnenschutzzubereitung pro cm<sup>2</sup> Haut. Zum vorschriftsmäßigen Einkremen der gesamten Körperoberfläche (1,7 m<sup>2</sup>) werden 34 ml Sonnenschutzmittel benötigt. Die Anwendung von Sonnenschutzmitteln berechtigt nicht zur Verlängerung des Aufenthaltes im Freien. Sie muß als zusätzliche Schutzmaßnahme aufgefaßt werden. Das beste Sonnenschutzmittel ist der gesunde Menschenverstand. Deshalb beginnt Sonnenschutz mit dem Meiden der UV-reichen Tageszeit (10 bis 14 Uhr), geeigneter Kleidung und Start der Urlaubsbesonnung mit 15 bis 20 Minuten und einer täglichen Steigerung – je nach Verträglichkeit – um 20 bis 40 %.

### 2.3 Erwünschte Effekte und therapeutische Anwendungen

Die Menschwerdung fand in einer sonnenscheinreichen Umgebung statt. Kurzfristige Sonnenexposition (etwa 15 bis 20 Minuten täglich) kann biopositive Effekte hervorrufen, insbesondere den Start der Vitamin-D<sub>3</sub>-Synthese in der exponierten Haut. Dieses Vitamin schützt den menschlichen Organismus vor Erkrankungen wie Rachitis und Osteoporose. Ein ausgeprägtes Vitamin-D-Defizit ist oft bei alten und bettlägerigen Menschen zu beobachten [3].

Zu Positivwirkungen der Sonnenstrahlung gehören ferner die Stimulierung der unspezifischen Resistenz, die Ökonomisierung des Blutkreislaufes, die Verbesserung der physischen Leistungsfähigkeit, der Reaktionsfähigkeit und des subjektiven Wohlbefindens, die Stimulierung des UV-Eigenschutzes der Haut, die therapeutischen Wirkungen und, *cum grano salis*, die Immun- und Hormonregulation [12].

Ein Zusammenhang zwischen Besonnungsdefiziten und dem vermehrten Auftreten von Brust-, Darm- und Eierstockkrebs geht aus epidemiologischen Untersuchungen in den USA hervor [5].

In der Dermatologie wird UV-Strahlung verschiedener Wellenlängenbereiche allein oder in Verbindung mit anderen wirksamen Substanzen therapeutisch eingesetzt (Tabelle 3). Gerade in den letzten Jahren sind viele neue Geräte und Behandlungskonzepte bis zur Praxisreife entwickelt worden. Dennoch sind bessere Anpassungen der Emissionen von UV-Therapiegeräten an die bei den unterschiedlichen Krankheiten wirksamen Wellenlängen bei Minimierung von Spätwirkungen möglich und notwendig.

Derzeit gibt es hauptsächlich zwei Indikationen für die UV-Phototherapie, die Psoriasis vulgaris und die Neurodermitis. Mehr als 2 % der Bevölkerung sind von Psoriasis (Schuppenflechte) befallen. Das Aktionspektrum der antipsoriatischen Wirkung (Bild 2) besagt, daß die wirksamen Wellenlängen im UV-B liegen. Berücksichtigt man außerdem unerwünschte Wirkungen, wie Erythembildung und Pigmentierung, so befindet sich das Optimum der antipsoriatischen Wirksamkeit zwischen 304 und 314 nm [1, 14]. Besonders schwere Psoriasis kann durch die kombinierte Anwendung eines Photosensibilisators und langwelliger UV-Strahlung behandelt werden.

Auch die Neurodermitis (atopische Dermatitis) gehört zu den häufigsten Erkrankungen schlechthin. Zur Phototherapie sind in der Regel diejenigen Kranken geeignet, die deutliche Besserung während des Strandurlaubs angeben. Ein regelrechtes Aktionsspektrum ist nicht bekannt. Im akut-entzündlichen Stadium wird mit langwelliger UV-Strahlung, nach Rückbildung der Entzündung mit Strahlung kürzerer Wellenlängen behandelt [13].

Phototherapie gehört in die Hand des speziell ausgebildeten Arztes, von dem sie auch einschlägige physikalisch-technische Kenntnisse und Fertigkeiten verlangt. Nähere Angaben hierzu finden sich in den „Richtlinien zur Qualitätssicherung in der Photo(chemo)therapie und -diagnostik“ [9].

## 3 Sichtbare Strahlung (Licht)

### 3.1 Wirkmechanismen

Licht allein vermag chemische Bindungen nicht aufzuspalten. Dazu bedarf es der Mitwirkung eines Photo-

sensibilisators und molekularen Sauerstoffs. Dieses Zusammenwirken wird als „photodynamischer Effekt“ bezeichnet. Der photodynamische Effekt wurde im Jahre 1900 durch den Medizinstudenten Oskar Raab im Labor des Chemikers H. von Tappeiner entdeckt [15]. Raab untersuchte die biozide (tötende) Wirkung des gelben – d. h. im Blauen absorbierenden – Fluoreszenzfarbstoffes Fluorescein an Einzellern. Dabei beobachtete er, daß der gewünschte Effekt in den auf dem Fensterbrett abgestellten Versuchsgefäßen wesentlich schneller eintrat als in den im Laborschrank aufbewahrten Gefäßen.

Die photodynamische Reaktion beginnt mit Lichtabsorption durch den Photosensibilisator. Dieser wird dadurch in einen kurzlebigen angeregten Singulettzustand versetzt. Nach Nano- bis Millisekunden fällt er unter Aussendung von Fluoreszenzstrahlung in den Grundzustand zurück. Er kann aber auch in den stabileren angeregten Triplettzustand übergehen, dessen Energie dann auf Biomoleküle (Typ-I-Reaktion) oder auf molekularen Sauerstoff übertragen werden kann (Typ-II-Reaktion). Der angeregte Singulett-Sauerstoff schädigt durch Energieabgabe Biomoleküle unmittelbar oder startet eine destruktive Radikalkettenreaktion [7].

### 3.2 Schadwirkungen

Sichtbares Licht wirkt auf das Auge und die Haut. Die häufigste Schadwirkung am Auge ist die mit dem Alter zunehmende Linsentrübung, der graue Star. In Abhängigkeit von der Hautfarbe kann die Haut das sichtbare Licht stärker als die ultraviolette und infrarote Strahlung zu einem Anteil von 45 % bis 65 % reflektieren. Trotzdem trägt Licht gewiß auch zur vorzeitigen Alterung der Haut bei. Sein Anteil an der Hautalterung konnte bisher nicht gut abgeschätzt werden, weil in entsprechenden Experimenten die wesentlich energiereichere UV-Strahlung die Lichteffekte überdeckt. Aus Beobachtungen an organisch-chemischen Strukturen weiß man aber, daß deren „reine“ Lichtalterung auch ohne UV-Strahlung abläuft. Gemeint ist das Vergilben von Papier oder Gemälden in Museen, in die schwerlich jemals ein UV-Strahl dringt. Hier besteht akuter Forschungsbedarf. Die genaue Kenntnis der Modalitäten der „reinen“ Lichtalterung würde deren Prophylaxe, z. B. mit Antioxydantien oder Filtersubstanzen, neue Möglichkeiten eröffnen.

### 3.3 Erwünschte Effekte und therapeutische Anwendungen

Über das Auge werden unsere Tagesrhythmen gesteuert. Unter paradiesischen Bedingungen erwacht man bei Sonnenaufgang und geht mit den Hühnern schlafen. Diese Prozesse werden über die Zirbeldrüse, Hormone und einen hypothetischen Zeitgeber gesteuert. Der Mensch verfügt über einen primären Tag-Nacht-

Rhythmus, der aber nicht exakt 24 Stunden währt. Deshalb muß er täglich durch Licht nachgestellt werden. Nach Untersuchungen an Blinden und entsprechenden Tierexperimenten vermutete man seit langem, daß die Steuerung auch über die Haut erfolgen kann. Das konnte unlängst am Menschen bewiesen werden [4].

Aus der organischen Chemie und aus Tierversuchen kennt man die einfache Lichtreparatur. Das ist ein rein photochemischer, nichtenzymatischer Vorgang, bei dem durch optische Strahlung geknüpfte Bindungen durch Nachbehandlung mit Strahlung größerer Wellenlänge teilweise rückgängig gemacht werden können. Leider liegen bisher keine Mitteilungen darüber vor, daß Lichtreparatur auch beim Menschen funktioniert.

Drei Jahre nach der Beschreibung dieses photodynamischen Effektes publizierten von Tappeiner und Jesionek erste Ergebnisse der photodynamischen Therapie von Hautkrebs. Sie benutzten Eosin als Photosensibilisator und die Sonne als Lichtquelle [16]. Erst in den letzten Jahren wurde das Verfahren soweit vervollkommen, daß es den Status einer experimentellen Therapie verlassen kann. Zur Behandlung bestimmter Hautkrebs- und Krebsvorstadien werden Vorstufen von Photosensibilisatoren (Aminolaevulinsäure) in Salbenform auf die Haut gebracht. In den Krebszellen reichern sich die daraus entstandenen Porphyrine weitaus stärker an als in gesunden Hautzellen. Porphyrine fluoreszieren unter UV-A-Bestrahlung. Deshalb kann man auf diese Weise die Begrenzung des Krebses gut erkennen. Das Verfahren wird als photodynamische Diagnostik bezeichnet. Der photodynamischen Diagnostik folgt die photodynamische Therapie, wobei die krebsbefallene Haut mit großen Dosen roten oder grünen Lichtes bestrahlt wird.

Einer Art natürlicher und kostenloser photodynamischer Therapie wird die Akne („Pubertätspickel“) in der lichtreichen Jahreszeit unterzogen. Am Krankheitsprozeß Akne ist auch das lipophile (fettliebende) *Propionibacterium acnes* beteiligt. Das Bakterium lebt vom und im Fett der menschlichen Talgdrüsen. Im Sommer reicht die natürliche Bestrahlung der Haut aus, um das Bakterium abzutöten und damit den Verlauf der Akne zu mildern [10].

## 4 Infrarotstrahlung

### 4.1 Wirkmechanismen

Wegen der geringen Quantenenergie kann IR-Strahlung nur erwärmen, aber nicht chemisch modifizieren. Das gilt auch für extrem große Energiedichten, wie sie mit Laser realisiert werden können. Das wesentliche Chromophor ist Wasser (vgl. Tabelle 2). Im Falle der Laser-Anwendung kann das Gewebswasser schlagartig derart überhitzt werden, daß es Gewebe koaguliert

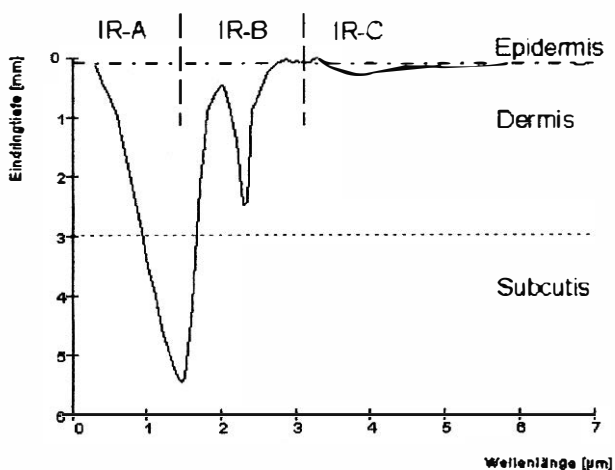


Bild 3. Eindringtiefe der optischen Strahlung in die Haut (Tiefe für 95% Absorption).

und schneidet. Bei moderater IR-Anwendung werden die biologischen Effekte von der Eindringtiefe der IR-Strahlung und den Absorptionsbanden des Wassers dominiert. Das kurzwellige oder nahe Infrarot (IR-A) wird in den oberen Hautschichten kaum absorbiert (Bild 3) und überwiegend erst in Höhe der oberflächlichen Blutgefäße in Wärme umgewandelt, die mit dem strömenden Blut im Körper verteilt wird. Mittleres und langwelliges Infrarot (IR-B/C) werden bereits in der Epidermis absorbiert. Dadurch unterscheiden sich die primären Wirkungen der infraroten Strahlenqualitäten untereinander erheblich. IR-A wirkt durch den Wärmeeintrag in den Organismus. Moderate Mengen von IR-B/C verursachen reflektorisch die Erweiterung kleiner Blutgefäße.

#### 4.2 Schädwirkungen

IR-A ist gut hautverträglich. Der Hitzeschmerz bei zu starker IR-B/C-Anwendung veranlaßt den Betroffenen, sich der lästigen Einwirkung rasch zu entziehen. Nach einmaliger, massiver Überdosierung kommt es im Sinne der Verbrennung zur Entzündung, die graubraune Flecken hinterläßt. Nach gewohnheitsmäßig sehr häufigen IR-B/C-Anwendungen treten Hitzeschmerz, Hitzeentzündung, Hitzepigmentierung und schlimmstenfalls Krebs auf. Die Hitzepigmentierungen sind z. B. auf der Haut unter dem Heizkissen zu finden oder bei Besitzern von Kachelöfen über den Schulterblättern. Der schottische Kaminkrebs bildet sich über den Schienbeinkanten. Gefährlich kann Thermotherapie in der Sauna oder der IR-A-Kabine für Kranke mit schweren Herz- oder Anfallsleiden werden. Bei den wenigen bekannt gewordenen Todesfällen waren meist Alkohol oder Kokain mit im Spiel.

#### 4.3 Erwünschte Effekte und therapeutische Anwendungen

Die Wärmeanwendung zählt zu den ältesten therapeutischen Methoden des Menschen. In der Sauna erfolgt

die Erwärmung der Haut durch langwellige Infrarotstrahlung von den erhitzten Wänden und Steinen und durch Wärmeleitung von der Sitzfläche und aus der Luft. Durch die Erwärmung der Haut werden reflektorisch auch andere Gebiete stärker durchblutet. Es setzt eine Kaskade verschiedener Wirkungen ein: Kreislauftraining, Verbesserung der Beweglichkeit von Gelenken, Schmerzlinderung, Verbesserung der Wundheilung, zunächst kurzfristige Steigerung, dann anhaltende Minderung der Infektanfälligkeit. Diese therapeutischen bzw. prophylaktischen Erfolge werden oft als Folge langfristiger Adaptation erklärt. Das betrifft besonders Veränderungen im Tonus der vegetativen Regulation des Herzens, des Blutdrucks und der peripheren Durchblutung. Bei der milden oder moderaten IR-A-Therapie wird die Bestrahlungsstärke so eingerichtet, daß die Körperkerntemperatur während der 30minütigen Bestrahlung maximal um 1 °C ansteigt. Die Behandlung der Bluthochdruckkrankheit mit IR-A-Bestrahlungs-Serien befindet sich noch im Erprobungsstadium [11].

Die Nutzung des kurzweligen Anteils der Infrarotstrahlung für medizinische Zwecke wurde durch die ersten industriell gefertigten Lampen befördert (Quarzlampengesellschaft Hanau 1935). Heute steht in der III. Generation z. B. sehr ausgereifte Infrarot-A-Hyperthermiertechnik für die moderate Ganzkörperhyperthermie zur Verfügung [17]. Die Technik beruht auf wassergefilterter Infrarot-A-Strahlung. Die Filterung durch Wasser ist der Absorption von Teilen der Infrarotstrahlung in der Atmosphäre sehr ähnlich, so daß die Wärmewirkungen weitgehend dem gewohnten Sonnenspektrum entsprechen. Eine ausführliche Beschreibung der Anlage IRATHERM 2000 ist in [2] enthalten.

Ein wichtiger Effekt der Überwärmung ist (neben der Primärerwärmung und dem Abtransport durch das Blut) die Weitstellung kleiner Gefäße, die den Wärmetransport verstärkt.

Bei der lokalen Thermotherapie wird die Strahlenquelle (sog. Rotlichtlampe bzw. IR-A-Projektor) auf die Haut über der erkrankten Stelle gerichtet. So werden chronische Entzündungen, Schmerzen nach Unfällen oder Operationen und chronische Schmerzzustände aus dem rheumatischen Formenkreis behandelt. Zur hier nicht näher besprochenen Krebsbehandlung mittels Ganzkörperhyperthermie sind Körperkerntemperaturen um die 43 °C erforderlich.

## 5 Schlußbetrachtungen

Die Wirkungen optischer Strahlung auf den Menschen sind weder gut noch böse. Schließlich gehört der Sonnenschein zu unserer natürlichen Umwelt. Die Sonne hat ein Janusgesicht, wie der altrömische Gott, der die Himmelspforte bewacht [6]. Vom medizinischen Standpunkt gesehen, entscheiden bei natürlichen und

künstlichen Quellen optischer Strahlung Dosis und Wellenlänge über die Wirkung als Gift oder Arznei. Die Wissenschaft weiß viel über Wirkungen ultravioletter Strahlung, bei sichtbarem Licht und Infrarotstrahlung besteht akuter Forschungsbedarf.

#### Literatur:

- [1] Amlong, U., J. Heller, F. Schiller u. a.: Konzeption einer direkten Phototherapie der Psoriasis unter Berücksichtigung der Überschneidung verschiedener relativer Wirkungsfunktionen. *Dermatol. Monatsschr.* 172 (1986), 325.
- [2] Ardenne, M. v.: Systemische Krebs-Mehrschritt-Therapie. Stuttgart, Hippokrates Verlag 1997.
- [3] Barth, J., B. Gerlach, B. Lehmann, P. Knuschke: Serum 25 (OH) D3 and UV-exposure of residents in an old people's home in East Germany – successful use of polysulfone films. *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.* 9 (1993), 229–231.
- [4] Campbell, S. S., P. J. Murphy: Circadian clock resetting in humans by extraocular light exposure. *Photoderm. Photoimmunol. Photomed.* 14 (1998), 175.
- [5] Garland, C. F., F. C. Garland, E. D. Gorham: Solar Radiation and Colon, Breast and Ovarian Cancer Mortality Rates. In: Holick, M. F., E. G. Jung (eds): *Biologie effects of light 1995*. Berlin, New York, Walter de Gruyter 1996.
- [6] Giese, A. C.: *Living with our sun's ultraviolet rays*. New York, Plenum Press 1976.
- [7] Hönigsmann, H., G. Jori, A. R. Young: *The fundamental bases of phototherapy*. Milano, Documento editoriale 1996.
- [8] Jori, G., C. Perria: *Photodiagnostic and phototherapeutic techniques in medicine*. Milano, Documento editoriale 1995.
- [9] Krutmann, J., H. Hönigsmann: *Handbuch der dermatologischen Phototherapie und Photodiagnostik*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag 1997.
- [10] Meffert, H., K. Gaunitz, T. Gutewort, J.-U. Amlong: Aknetherapie mit sichtbarem Licht. *Dermatol. Monatsschr.* 176 (1990), 597.
- [11] Meffert, H., H.-P. Scherf, B. Meffert: Milde Infrarot-A-Hyperthermie. Grundlagen, Bestrahlungstechnik, biologische Effekte und therapeutische Anwendungen. *Akt. Dermatol.* 20 (1994) 25.
- [12] Meffert, H., H. Piazena: Humanbiologische und medizinische Wirkungen ultravioletter Strahlung. *Bundesgesundheitsblatt. Sonderheft Oktober 1994*, S. 11.
- [13] Meffert, H.: Stellenwert der UVA-1-Therapie. In: Tebbe, B., Garbe, C.: 109. Tagung der Berliner Dermatologischen Gesellschaft am 2. März 1996. *Zeitschr. Hautkr.* 71 (1996) 721.
- [14] Parrish, J. A., K. F. Jaenicke: Action spectrum for phototherapy of psoriasis. *J. Invest. Dermatol.* 76 (1981), 359.
- [15] Raab, O.: Über die Wirkung von fluoreszierenden Stoffen auf Infusorien nach Versuchen von O. Raab. *Z. Biol.* 39 (1900), 524.
- [16] von Tappeiner, H., A. Jesionek: Therapeutische Versuche mit fluoreszierenden Stoffen. *Münch. Med. Wochenschr.* 47 (1903), 2042.
- [17] Vaupel, P., W. Krüger (Hg.): *Wärmetherapie mit wassergefilterter Infrarot-A-Strahlung*. Stuttgart, Hippokrates Verlag 1992.

934

Korrespondenzanschrift:  
Prof. Beate Meffert  
Institut für Informatik  
der Humboldt-Universität zu Berlin  
Unter den Linden 6  
10099 Berlin