

Optimierte Gerätetechniken für UV- und Lichttherapie

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

vorgelegt der Fakultät IV für Elektrotechnik und Informatik
der Technischen Universität Berlin

vom Diplom-Ingenieur Mehmet Yeni, geb. 25.06.1966

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. H. Lemke

Berichter: Prof. Dr. rer. nat. H. Kaase

Prof. Dr.-Ing. D. Gall

Prof. Dr. med. H. Meffert

Tag der Wissenschaftlichen Aussprache:

20. Jan. 2005

Berlin 2005

D 83

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	1
2. Theoretische Grundlagen	3
2.1 Elektromagnetische Strahlung	3
2.2 Photobiologische Grundlagen	7
2.3 Wirkungen optischer Strahlung auf den menschlichen Organismus	10
2.3.1 Aufbau und Funktionsweise der menschlichen Haut.....	12
2.3.2 Aufbau und Funktionsweise des menschlichen Auges	14
2.4 Die gesundheitlichen Wirkungen optischer Strahlung auf den Menschen	17
2.4.1 Wirkungen der UV-Strahlung	18
2.4.2 Die Vitamin D ₃ -Photosynthese	23
2.4.3 Photoinduzierte Melatoninsuppression.....	27
2.5 Referenzsonnenspektrum	32
2.6 Klassifizierung von Bestrahlungsgeräten	36
2.6.1 UV-Bestrahlungsgeräte	36
3. Messtechnik	38
3.1 Spektralradiometrie	38
3.2 Messung der UV-Gesamtstrahlungsleistung	44
3.2.1 Messergebnisse	46
3.3 Photometrie	48
3.3.1 Messung des Lichtstroms am Spiralphotometer	48
3.3.2 Messung der spektralen Bestrahlungsstärke im UV und VIS.....	49
3.3.3 Messung der Beleuchtungsstärke	50
3.3.4 Messung der Leuchtdichte L _v und ihrer Verteilung.....	51
3.4 IR-Radiometrie	53
3.5 Messung der Gesamtstrahlung	55
3.6 Messung der farbmetrischen Parameter (x, y, Ra, T_{cp})	56
3.7 Messung spektraler Kennzahlen von Materialien	59

Inhaltsverzeichnis

4. Gerätetechnik	62
4.1 Komponenten	62
4.1.1 Strahlungsquellen	62
4.1.2 Lampenbetrieb, Einbrennzeiten, Alterung von Lampen	70
4.1.3 Materialien	71
4.2 Sonnensimulator zur Vitamin D₃-Photosynthese	80
4.3 Untersuchungen an UV-Bestrahlungsgeräten	89
4.3.1 UV-Bestrahlungskabinen mit Halogen-Metaldampflampensystemen	90
4.3.2 UV-Bestrahlungskabinen mit <i>Leuchtstofflampensystemen</i>	94
4.3.3 UV-A1-Bestrahlungsgeräte	96
4.3.4 Solarien und Heimsonnen	101
4.4 Lichttherapiegeräte	115
4.4.1 Technische Ausführung von Lichttherapiegeräten	115
4.4.2 Zentrale Beleuchtungsstärke E_v	116
4.4.3 Spektrale Zusammensetzung des Lichtes	117
4.4.4 Farbtemperatur T_{cp}	122
4.4.5 Ausschluß schädigender Strahlungswirkungen	124
4.4.6 Leuchtdichte	124
4.4.7 Flimmerfreiheit	128
4.5 IR-Bestrahlungsgeräte	130
5. Vorschläge für Zertifizierungskriterien	134
5.1 Solarien	134
5.1.1 Gleichmäßigkeit der Bestrahlungsstärke über die Körperfläche	135
5.1.2 Bewertung der Gleichmäßigkeit der einzelnen Nutzflächen	136
5.1.3 Kriterium Nutz- und Gefährdungsverhältnis	137
5.2 Lichttherapiegeräte	138
6. Zusammenfassung	140
7. Literatur	142

Abkürzungen:

AM	Air Mass
CIE	Internationale Beleuchtungskommission
DIN	Deutsches Institut für Normung
HIT	Halogen-Metaldampflampe
ICNIRP	International Commission for Non Ionizing Radiation Protection
IESNA	Illuminating Engineering Society of North America
IR	Infrarot
IRPA	International Radiation Protection Association
LED	Light Emitting Diode
LL	Leuchtstofflampe
MED	Minimale erythemwirksame Dosis
OWL	Optischer Wellenleiter
PTFE	Polytetrafluorethylen
SEV	Sekundärelektronenvervielfacher
STP	Standarttemperatur- und druck
UV	Ultraviolett
VIS	Visuell

Indizes für wichtige photobiologische Wirkungen:

ad	Atopische Dermatitis
bi	Bilirubin-Isomerisierung
biol	Biologische Wirkung allgemein
ca	Karzinogenese
er	UV-Erythem
ke	Photokeratitis
ko	Photokonjunktivitis
ms	Melatonin suppressiv
pi	Sofortpigmentierung
pp	Verzögerte Pigmentierung
vd	Vitamin D ₃ -Bildung

1. Einführung

Die Licht- und Phototherapie gewinnt gegenwärtig durch den zunehmenden Einsatz von Bestrahlungsgeräten in der Photomedizin immer mehr an Bedeutung. Als Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte in der Photobiologie heben sich z. Zt. insbesondere die Lichttherapie gegen die sog. saisonale Depression (SAD) und die Vitamin D₃-Photosynthese hervor. Neben der therapeutischen Anwendung der UV-Strahlung ist eine steigende Popularität der nichttherapeutischen UV-A-Bestrahlung durch kommerzielle Solarien und sog. Heimsolarien zur Erzielung von kosmetischen und biopositiven Effekten zu beobachten.

Als ein intensives Forschungsfeld in der Photomedizin gelten die gesundheitlichen Effekte des Vitamin D₃ und die Photosynthese dieses Stoffes durch natürliche und künstliche UV-Strahlungsanteile. Vitamin D₃ ist ein lebenswichtiges Hormon, das aktiv an der Regulierung des Kalzium- und Phosphathaushaltes, des Immunsystems, des endokrinen Systems, des Nervensystems, der Muskulatur sowie des Zellwachstums beteiligt ist. Zur Synthese von aktivem Vitamin D₃ aus den Vorstufen des Vitamin D ist UV-Strahlung in einem bekannten Spektralbereich notwendig, da nur ca. 5 % dieses Stoffes über die Nahrung aufgenommen werden kann. Neben dem geografisch bedingten Mangel an Vitamin D₃ in äquatorfernen Breitengraden durch fehlende natürliche UV-B-Einstrahlung - besonders in den Wintermonaten- kommt es bei Patienten mit Nierenleiden aufgrund fehlender oder gestörter Synthese des aktiven Vitamin D₃ zu verschiedenen Mangelerscheinungen. Diese werden zumeist medikamentös behandelt. Pilotstudien an denen der Verfasser der vorliegenden Arbeit beteiligt ist, zeigen, dass durch kontrollierte UV-Bestrahlungen der Gesundheitszustand dieser Patienten verbessert werden kann. Zudem werden in diesen Studien Erfolge bei der Behandlung von Bluthochdruck und Osteoporose durch gezielte UV-Bestrahlung verzeichnet. Zahlreiche aktuelle Untersuchungen belegen außerdem, dass Vitamin D₃ eine wesentliche Rolle bei der Prävention von Prostata-, Dickdarm- und Brustkrebs spielt. Der aktuelle Stand der Gerätetechnik zur Vitamin D₃-Photosynthese und Untersuchungen an verschiedenen Materialien sowie Bestrahlungsquellen bilden die Basis des im Rahmen dieser Arbeit fertiggestellten UV-Sonnensimulators.

Der zunehmende Einsatz von kommerziellen Solarien erfordert aus Gründen der Bevölkerungsgesundheit Maßnahmen zur photobiologischen Bewertung solcher Geräte. Im Rahmen der in Deutschland kürzlich eingeleiteten Zertifizierungsverfahren sind Kriterien zur

spektralradiometrischen Vermessung sowie der photobiologischen Bewertung solcher Geräte definiert worden. Diese Kriterien werden anhand von zahlreichen von dem Verfasser durchgeführten spektralradiometrischen Messungen an Solarien und Heimsonnen und photobiologischen Bewertungen kommentierend dargestellt.

Bei der Lichttherapie zeichnet sich durch aktuelle Studien die spektrale Zusammensetzung der optischen Strahlung ab, die für diese Anwendung nötige Melatoninsuppression bewirkt. Zudem wird verstärkt an den für diese Therapieform nötigen absoluten Bestrahlungsstärken und dem Vergleich dieser Werte mit natürlicher Globalstrahlung geforscht. Die an einer Vielzahl von Lichttherapiegeräten durchgeführten lichttechnischen, spektralradiometrischen und farbmetrischen Untersuchungen werden vergleichend dargestellt. Anhand dieser Ergebnisse werden photobiologische Bewertungsgrößen definiert.

Durch die intensive Erforschung der spektralen und quantitativen Zusammenhänge der photomedizinischen Wirkungen der optischen Strahlung auf den menschlichen Organismus sowie technische Weiterentwicklungen von Bestrahlungsgeräten und deren Komponenten ist eine Minimierung der schädigenden Effekte bei gleichzeitiger Steigerung der Effektivität solcher Geräte in verschiedenen photomedizinischen Anwendungen möglich. Hierbei sind für die Bewertung UV-bedingter gesundheitlicher Risiken und der gesundheitsfördernden Effekte das Verständnis der zugrunde liegenden biophysikalischen und biologischen Mechanismen sowie exakte spektralradiometrische Messungen der eingesetzten Strahlung von entscheidender Bedeutung.

Neben der eingehenden Darstellung der benutzten Spektralradiometer wird in der vorliegenden Arbeit eine Vielzahl an Meßgeräten vorgestellt, mit denen die lichttechnischen, radiometrischen und farbmetrischen Untersuchungen durchgeführt wurden. Für die Bestimmung der UV-Strahlungsleistung wurde ein neues Konzept entwickelt, das die Technik der Goniophotometrie eines Spiralphotometers nutzt. Mit Hilfe dieser neuartigen Messtechnik ist es nunmehr möglich, UV-Strahlungsleistungen in definierten Wellenlängenintervallen zu erfassen.

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Elektromagnetische Strahlung

Durch die Maxwell-Gleichungen wird der Zusammenhang zwischen dem elektrischen Feld, dem magnetischen Feld, den felderzeugenden Ladungen (Quellen) und den elektrischen Strömen beschrieben. Elektrische Ladungen und Ströme erzeugen statische Felder und bei zeitveränderlichen Feldern kommen Induktion und Verschiebungsstrom hinzu. Die Lösungen der Maxwell-Gleichungen haben Wellencharakter. Betrachtet man ein quellenfreies Gebiet im Vakuum, (d. h., $\vec{J} = q = 0$) vereinfachen sich diese Gleichungen. Wenn man das Gleichungssystem dann nach \vec{E} oder \vec{H} auflöst, erhält man eine dreidimensionale Feldgröße für die jeweils verbleibende Feldgröße und es folgt hier im Beispiel für \vec{E} :

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad \text{Gl. 2-1}$$

Mit $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$, der Lichtgeschwindigkeit im freien Raum bzw. Vakuum:

$$c = c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} \quad \text{Gl. 2-2}$$

Dabei ist $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ AsV}^{-1}\text{m}^{-1}$ die Dielektrizitätskonstante im Vakuum und $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ VsA}^{-1}\text{m}^{-1}$ die Permeabilität des Vakuums. Die orthogonal zueinander stehenden \vec{E} - und \vec{H} -Wellen breiten sich in kartesischen Koordinaten rotationssymmetrisch zur z-Achse. Im Bereich niedriger Frequenzen treten vor allem die Welleneigenschaften der elektromagnetischen Strahlung, bei sehr hohen Frequenzen die Teilchen-Eigenschaften in den Vordergrund. Im Zwischenbereich (optische Strahlung, Röntgenstrahlung) sind je nach den experimentellen Bedingungen die Welleneigenschaften oder die Teilcheneigenschaften der Strahlung zu beobachten.

Unter optischer Strahlung werden entsprechend der DIN /29/ im Allgemeinen elektromagnetische Schwingungen im Wellenlängenbereich von 1 nm bis 1 mm bzw. im Frequenzbereich von 300 GHz bis 30 THz verstanden. Optische Strahlung tritt in Form endlicher Wellenzüge (Photonen oder Quanten) auf. Dabei übertragen die Quanten ihre Energie in diskreter Form und nicht kontinuierlich auf den Wechselwirkungspartner. Diese diskreten Energieniveaus werden durch das Plancksche Wirkungsquantum $h = 6,62606877 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ beschrieben. Durch die Plancksche Beziehung wird der Zusammenhang zwischen der Wellenlänge und der Energie von Quanten beschrieben:

$$E = h \cdot \nu \quad \text{Gl. 2-3}$$

Unter der Bedingung der Dispersionsrelation ergeben sich die Umrechnungen in Wellenlängen:

$$c_0 = \lambda \cdot \nu = \frac{\lambda}{T} \quad \text{Gl. 2-4}$$

Für die Einteilung der elektromagnetischen Strahlung in Wellenlängenbereiche werden physikalisch-chemische Absorptionsprozesse gewählt. Eine Übersicht über die Teilgebiete der elektromagnetischen Strahlung gibt Tabelle 2-1 wieder.

Die Einteilung des UV-Spektrums in drei Teilspektralbereiche UV-A (400 nm - 315 nm), UV-B (315 nm - 280 nm) und UV-C (unter 280 nm) wurde erstmals von Coblenz 1932 beziehend auf die Erythemwirkung auf menschlicher Haut eingeführt /24/. Diese Wellenlängengrenzen wurden von der deutschen Industrienorm (DIN) etwa übernommen, wobei die untere Grenze des UV-C bei 100 nm und die Obergrenze des UV bei 380 nm festgelegt wurde /29/. Abweichend von der DIN wird die Obergrenze des UV-A in der europäischen Norm sowie nach CIE mit 400 nm und die obere Grenze des UV-B bzw. die untere Grenze des UV-A mit 320 nm angegeben /20/, /40/. In den Empfehlungen der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) wird UV-A zwischen den Wellenlängen 315 nm- 400 nm angegeben. Aufgrund qualitativ unterschiedlicher epidermaler Pigmentierungsreaktionen unterteilten einige Autoren das UV-A-Spektrum in UV-A1 (340-400 nm) und UV-A2 (315-340 nm). Die in DIN angegebene untere Grenze der UV-Strahlung mit 100 nm entspricht mit 12,4 eV der Ionisierungsenergie Wasserstoff (H). Im Wasser und typischen biologischen Geweben werden zur Bildung eines Ionenpaares im Mittel ein Energiebetrag von ca. 30 eV benötigt /5/. Strahlung bei Wellenlängen von > 1 nm ist nichtionisierend. Die kurze Grenzwellenlänge der optischen Strahlung wird deshalb auf 100 nm festgelegt.

Wenn optische Strahlung auf Materie trifft, werden Photonen entweder reflektiert, transmittiert oder absorbiert. Ein Körper, der alle auf ihn treffende Strahlung vollständig absorbiert, ist der schwarze Strahler (Planckscher Strahler). Die Strahldichte eines solchen Hohlkörpers wird durch das Plancksche Strahlungsgesetz definiert und beschreibt diejenige Strahlung, die ein Körper im thermischen Gleichgewicht maximal abgeben kann:

Theoretische Grundlagen

$$L_{e\lambda}(\lambda, T) = \frac{2\pi^5 h c_0^2}{15 \pi^3} \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc_0}{k\lambda T}} - 1} \quad \text{Gl. 2-5}$$

Dabei ist $k = 1,380\,658 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ die Boltzmann-Konstante. Die Gesamtenergie, die ein Planckscher Strahler über alle Wellenlängen ausstrahlt, ist durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz definiert:

$$\begin{aligned} L_e(T) &= L_0 \cdot T^4 \\ &= \frac{2k^4 \pi^4}{15h^3 c_0^2} \cdot T^4 \end{aligned} \quad \text{Gl. 2-6}$$

Die Wellenlänge der maximalen Ausstrahlung ist nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz durch die Beziehung in Gl. 2-5 festgelegt und verhält sich umgekehrt proportional zur Temperatur des Planckschen Strahlers:

$$\text{Aus } \frac{\partial L_e(\lambda)}{\partial \lambda} = 0 \text{ folgt } \lambda_{\max} T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ mK}.$$

Optimierte Gerätetechniken für UV- und Lichttherapie

Tabelle 2-1: Teilgebiete der elektromagnetischen Strahlung, die dazugehörigen Wellenlängen und Photonenenergien

Bezeichnung der Welle			Frequenz in Hz	Wellenlänge	Photonenenergie in eV
Radiowellen			$3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^{10}$	10 km – 10 mm	$1,2 \cdot 10^{-10} - 1,2 \cdot 10^{-4}$
Mikrowellen			$3 \cdot 10^{10} - 3 \cdot 10^{11}$	10 mm – 1 mm	$1,2 \cdot 10^{-4} - 1,2 \cdot 10^{-3}$
IR-Strahlung	IR-C	1 mm – 50 μ m	$3 \cdot 10^{11} - 6 \cdot 10^{12}$	1 mm – 50 μ m	$1,2 \cdot 10^{-3} - 2,5 \cdot 10^{-2}$
		50 μ m – 3 μ m	$6 \cdot 10^{13} - 1 \cdot 10^{14}$	50 μ m – 3 μ m	$2,5 \cdot 10^{-2} - 4,1 \cdot 10^{-1}$
	IR-B	3 μ m – 1400 nm	$1 \cdot 10^{14} - 2,1 \cdot 10^{14}$	3 μ m – 1400 nm	$4,1 \cdot 10^{-1} - 8,9 \cdot 10^{-1}$
	IR-A	1400 nm – 780 nm	$2,1 \cdot 10^{14} - 3,8 \cdot 10^{14}$	1400 nm – 780 nm	$8,9 \cdot 10^{-1} - 1,6$
sichtbare Strahlung (VIS)			$3,8 \cdot 10^{14} - 7,9 \cdot 10^{14}$	780 nm – 380 nm (400 nm)	1,6 – 3,3 (3,1)
UV-Strahlung	UV-A ¹	(400 nm)/ 380 nm – (320 nm)/ 315 nm	$(7,5 \cdot 10^{14})/ 7,9 \cdot 10^{14}$ – $(9,4 \cdot 10^{14})/ 9,5 \cdot 10^{14}$	(400 nm)/ 380 nm – (320 nm)/ 315 nm	(3,1)/ 3,3 – (3,9)/ 3,9
		UV-B ¹	315 nm – 280 nm	$9,5 \cdot 10^{14} - 1,1 \cdot 10^{15}$	315 nm – 280 nm
	UV-C	280 nm – 200 nm	$1,1 \cdot 10^{15} - 1,5 \cdot 10^{15}$	280 nm – 200 nm	4,4 – 6,2
		200 nm – 1 nm	$1,5 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{17}$	200 nm – 1 nm	$6,2 - 1,2 \cdot 10^3$
Röntgenstrahlung			$3 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{19}$	1 nm – $1 \cdot 10^{-11}$ m	$1,2 \cdot 10^3 - 1,2 \cdot 10^5$
Gammastrahlung			$3 \cdot 10^{19} - 3 \cdot 10^{21}$	$1 \cdot 10^{-11}$ m – $1 \cdot 10^{-13}$ m	$1,2 \cdot 10^5 - 1,2 \cdot 10^7$
Kosmische Strahlung			$> 3 \cdot 10^{21}$	$< 1 \cdot 10^{-13}$ m	$> 1,2 \cdot 10^7$

1: Von der CIE wird der Wellenlängenbereich des UV-A mit 320 nm - 400 nm angegeben /20/.

2.2 Photobiologische Grundlagen

Das Potential für mögliche photochemische und biologische Reaktionen auf optische Strahlung hängt neben den Eigenschaften des Absorbers auch von der Eindringtiefe der Photonen ab, die durch die Energie der Quanten bestimmt wird. Bei den als direkt bezeichneten Effekten tritt die Wirkung am Ort des Auftreffens der Strahlung auf. Dahingegen werden als indirekte Effekte die Wirkungen bezeichnet, die an Orten entstehen, wo keine Strahlungsabsorption erfolgt. Nach Grotthus-Drapper wird von einer auf eine biologische Struktur auftreffenden Strahlung nur ihr absorbiertes Anteil wirksam. Durch aktive Absorption werden photochemische Effekte und durch passive Absorption Wärmewirkungen hervorgerufen /20/.

Die Bewertung von Bestrahlungsgeräten setzt die Kenntnis der möglichen photomedizinischen Reaktionen voraus; dazu gehören sowohl die gewünschten als auch die schädlichen Photoeffekte. Diese sind abhängig von:

- (1) der Bestrahlungsstärke E in der Bestrahlungsebene
- (2) der Strahlungsfunktion $S(\lambda) = \frac{E_\lambda(\lambda)}{E_\lambda(\lambda = \lambda_0)}$
- (3) dem Aktionsspektrum $s(\lambda)_{\text{biol,rel}}$ des betrachteten Effektes
- (4) der Bestrahlungszeit t
- (5) der Eindringtiefe der Strahlung
- (6) den relevanten Umgebungsparametern

In allgemeiner Form wird eine photobiologisch wirksame (aktinische) Strahlungsgröße X_{biol} aus einer spektralen Strahlungsgröße $X_\lambda(\lambda)$ berechnet:

$$X_{\text{biol}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial X(\lambda)}{\partial \lambda} \cdot s(\lambda)_{\text{biol,rel}} d\lambda \quad \text{Gl. 2-7}$$

Dabei wird durch die spektrale Wirkungsfunktion $s_{\text{biol,rel}}(\lambda)$ der photobiologische Vorgang zwischen den Grenzwellenlängen λ_1, λ_2 des Empfindlichkeitsbereichs beschrieben.

In den meisten Fällen wird die Bestrahlungsstärke einer künstlichen oder natürlichen Strahlungsquelle in der Anwendungsebene zur photobiologischen Bewertung der Strahlung herangezogen. Nach dem Van Krefeld-Gesetz (Additivitätsgesetz) wird die effektive (biologisch wirksame) Bestrahlungsstärke E_{biol} in $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$ beschrieben:

$$E_{biol} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{d\Phi(\lambda)}{dA} \cdot s(\lambda)_{biol,rel} d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial E(\lambda)}{\partial \lambda} \cdot s(\lambda)_{biol,rel} d\lambda \quad \text{Gl. 2-8}$$

Die durch die aktinische Bestrahlungsstärke erzielte Dosis bzw. Bestrahlung in Jm^{-2} folgt aus dem Zeitintegral mit der Bestrahlungsdauer t :

$$H_{biol} = \int_0^t E_{biol,1}(t) dt \quad \text{Gl. 2-9}$$

Die photobiologisch wirksame Bestrahlung H_{biol} , die eine gerade merkliche Reaktion erzeugt, heißt Schwellenbestrahlung $H_{s,biol}$. Die zu dieser Bestrahlungsstärke zugehörige Bestrahlungszeit heißt Schwellenbestrahlungsdauer $t_{s,biol}$. Dabei gilt:

$$t_{s,biol} = \frac{H_{s,biol}}{E_{biol}} \quad \text{Gl. 2-10}$$

Die Reaktion des Absorbers ist hauptsächlich von der Zahl der absorbierten Photonen pro Flächeneinheit abhängig und es ist zunächst unwichtig, in welchem Zeitintervall die Photonen absorbiert werden. Dieses Axiom der Dosimetrie für nichtionisierende Strahlung (NIR) ist als Bunsen-Roscoe-Gesetz oder Linearitätsgesetz bekannt:

$$H_{biol} = \int_0^{t_1} E_{biol,1}(t) dt = \int_0^{t_2} E_{biol,2}(t) dt \quad \text{Gl. 2-11}$$

Bei zeitlich konstanter Bestrahlungsstärke gilt:

$$H_{biol} = t_1 E_{biol,1} = t_2 E_{biol,2} \quad \text{Gl. 2-12}$$

Das Additivitätstheorem besagt ebenso, dass die Wirkungen einzelner Spektralintervalle unabhängig voneinander sind und diese zu einem untrennbaren Gesamteffekt addiert werden. Dieses Gesetz setzt voraus, dass keine katalytischen oder antagonistischen Effekte auftreten. Für rein photochemische Prozesse kann davon ausgegangen werden, dass die Wirkung vom Produkt der Bestrahlungszeit und der wirksamen Bestrahlungsstärke errechnet werden kann. In der photobiologischen Praxis gilt dies nur, falls keine Reparaturmechanismen in dem zu betrachtenden Bestrahlungszeitraum erfolgen. Hierbei kann man bei der Strahlentherapie dann den Bestrahlungsvorgang zeitlich ausdehnen (Protahierung) oder in Teilbestrahlungen gliedern (Fraktionierung). Nach dem Stark-Einsteinschen Äquivalentgesetz verursacht ein absorbiertes Photon $h \cdot \nu$ genau ein Elementarakt an einem Molekül oder einem Atom des absorbierenden Stoffes. Dieser photochemische Primärprozess kann darin bestehen, dass das absorbierende Atom, Ion oder Molekül in angeregte oder nicht angeregte Atome oder Radikale zerlegt wird (Dissoziati-

on) oder dass ein Elektron ausgelöst wird (photoelektrischer Effekt). Die Folgeprodukte der photochemischen Primärreaktion können anschließend mit den unveränderten Atomen, Ionen oder Molekülen der absorbierenden Substanz oder untereinander reagieren (photochemischer Sekundärprozess). Dabei ist es möglich, dass der ursprüngliche Zustand ganz oder teilweise wiederhergestellt wird. Die Sekundärreaktionen verlaufen unabhängig von der Strahlungsabsorption und können von der Konzentration der Primärprodukte abhängen. Dies kann zu einer Einschränkung des Linearitätsgesetzes führen. Einen solchen photobiologischen Prozess stellt die Photoreparatur dar, bei der die durch kurzwellige Anteile der Strahlung verursachten photobiologischen Wirkungen infolge der Bestrahlung mit langwelligen Spektralanteilen rückgängig gemacht werden. Bei solchen Sekundärprozessen wird das Additivitätsgesetz in seiner Gültigkeit eingeschränkt.

Die Zusammenhänge der häufigsten aktinischen Strahlungsgrößen, die im Rahmen dieser Arbeit bei der Bewertung von Bestrahlungsgeräten zu bestimmen sind, betreffen:

- aktinische Strahldichte

$$L_{\text{eff}} = \int_0^{\infty} L_{\lambda}(\lambda) s(\lambda)_{\text{eff,rel}} \cdot d\lambda \quad \text{Gl. 2-13}$$

- aktinische Bestrahlungsstärke

$$E_{\text{eff}} = \int_0^{\infty} E_{\lambda}(\lambda) s(\lambda)_{\text{eff,rel}} \cdot d\lambda = \int_{(2\pi\text{sr})} L_{\text{eff}}(\Omega) \cos \varepsilon_2 d\Omega \quad \text{Gl. 2-14}$$

- aktinische zylindrische Bestrahlungsstärke

$$E_{z,\text{eff}} = \frac{1}{\pi_{(4\pi\text{sr})}} \int L_{\text{eff}}(\Omega) \sin \varepsilon d\Omega \quad \text{Gl. 2-15}$$

- aktinische Bestrahlung

$$H_{\text{eff}} = \int_0^{t_1} E_{\text{eff}}(t) dt \quad \text{Gl. 2-16}$$

- aktinische zylindrische Bestrahlung

$$H_{z,\text{eff}} = \int_0^{t_1} E_{z,\text{eff}}(t) dt \quad \text{Gl. 2-17}$$

2.3 Wirkungen optischer Strahlung auf den menschlichen Organismus

In der Kette der Wechselwirkungen optischer Strahlung mit biologischem Gewebe bildet die **physikalische Phase** mit einer Zeitspanne von 10^{-16} s bis 10^{-13} s die erste Stufe. In dieser primären Phase kommt es zur lokalen Absorption eines Teils der Strahlungsenergie und als Folge zur Anregung oder Ionisation von Atomen oder Molekülen am Ort der physikalischen Wechselwirkung. Zu diesen Molekülen gehören Nukleinsäure (DNS), Aminosäuren, Proteine, Enzyme, Teile der Zellmembran und Wassermoleküle im Zellplasma. In der **physikalisch-chemischen Phase** nach 10^{-13} s bis 10^{-2} s wird die absorbierte Energie durch thermodynamischen Energieausgleich in die nähere Umgebung des Wechselwirkungsortes verteilt. Dies geschieht entweder durch intramolekularen Energietransfer oder intramolekulare Energiewanderung, bei der die Absorptionsenergie innerhalb des Biomoleküls weitergeleitet wird. Bei dem intramolekularen Energietransport führt die absorbierte Energie des Photons zu einem Ausgleichsvorgang zwischen verschiedenen Molekülen z. B. durch Stöße. Hierbei kann es zu Veränderungen der Struktur, zu Brüchen in den Molekülketten oder zur Zerstörung der Moleküle durch Abspalten von funktionellen Gruppen kommen. In der darauf folgenden **biologische Phase** wird die Energieleitung fortgesetzt, bis der thermodynamische Energieausgleich hergestellt ist. Hierbei kann es infolge der Veränderungen in den Biomolekülen zu Beeinflussungen des Zellstoffwechsels, zur Modifikation der Erbsubstanz und zu Veränderungen der Proteinsynthese kommen. Dadurch können submikroskopische oder sogar sichtbare Schäden an den Zellen oder deren Organellen sowie unsichtbare Veränderungen wie Mutationen an der Erbsubstanz und Denaturierung von Proteinbausteinen erfolgen, die auch zu malignen Entartungen von Zellen führen können. Diese Phase kann eine Zeitdauer von 10^{-2} s bis Jahrzehnte aufweisen.

Man unterscheidet die Wechselwirkungen der optischen Strahlung je nach ihrem Wirkungsort. Bei den direkten Strahlungswirkungen kommt es zu einer einstufigen Anregung oder Veränderung der Makromoleküle innerhalb einer Zelle, die Strahlung absorbiert. Die wichtigste **direkte** Strahlungswirkung ist diejenige unmittelbar mit der DNS. Wegen des geringen relativen Massen- und Volumenanteils der DNS in der Zelle kommen die direkten DNS-Strahlungswirkungen in lebenden Organismen jedoch vergleichsweise selten vor.

Die **indirekten** Strahlenwirkungen erfolgen über chemische Sekundärprozesse mit dem Zellplasma und Zellwasser, wobei es zuerst zu einer Wechselwirkung der Strahlung mit

den Wassermolekülen kommt und anschließend diese selbst in mehrstufigen chemischen Prozessen zu einer Wirkung in der DNS und anderen Biomolekülen führt.

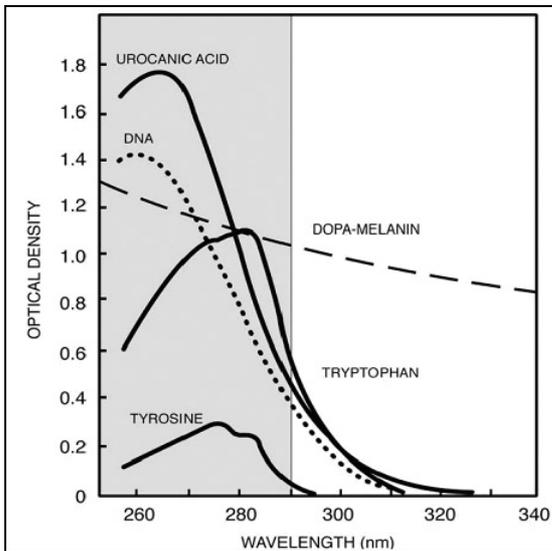


Abb. 2-1: UV-Absorptionsspektren der verschiedenen Chromophoren des menschlichen Organismus nach /92/

Als kleinste Einheit des Lebens besteht die Zelle aus einer semipermeablen äußeren Membran, einem wasserreichen Cytoplasma und aus dem genetischen Material in Form von DNS (Desoxyribonukleinsäure). Die Erbsubstanz DNS befindet sich als kettenförmiges Molekül im Zellkern und besteht aus den vier Bestandteilen den Nukleotiden Adenin, Cytosin, Guanin und Thymin, welche die eigentlichen Träger der Erbinformationen sind. Diese Nukleinsäuren können bestimmte Wellenlängen der UV-Strahlung absorbieren. Solche photochemischen Reaktionen von Chromophoren und die Reaktionen der Moleküle, an welche Energie von dem angeregten Chromophore weitergegeben wird, stellen den ersten Schritt einer Kette von Ereignissen dar, die letztendlich zu einer spezifischen, biologischen Antwort des Organismus auf optische Strahlung führt. Veränderungen an der DNS nach Wechselwirkung mit ionisierender Strahlung oder durch sonstige (chemische, virale, thermische) Einflüsse sind wegen der zentralen Steuerfunktion der Zelle besonders schwerwiegend. Schäden an den Zellorganellen sind dagegen nur dann gravierend, wenn diese bei hohen Strahlendosen an allen Organellen gleichzeitig stattfinden und so der gesamte Zellstoffwechsel zum Erliegen kommt.

Die UV-Absorptionsspektren für verschiedene im menschlichen Auge und in der Haut vorkommende Klassen von Molekülen sind in Abb. 2-1 dargestellt. Tyrosin und Tryptophan sind als Aminosäuren hauptsächlich für die UV-A-Absorption zuständig. Die trans-Urocansäure kommt in großen Mengen in den äußeren epidermalen Schichten der Haut

vor und ist bei den chemischen Prozessen vor allem bei der Reaktion des Organismus auf UV-A-Strahlung beteiligt. Melanin ist das Pigment der Melanozyten /80/, /7/.

Die für die optische Strahlung in den Teilbereichen UV, VIS und IR empfindlichen Organe sind die Haut und die Augen. Strahlung kann in diesen Organen lokale oder systematische Wirkungen verursachen.

2.3.1 Aufbau und Funktionsweise der menschlichen Haut

Die Haut ist mit einer Oberfläche $1,5 \text{ m}^2 - 2 \text{ m}^2$ und einer Masse bis zu 10 kg das größte menschliche Organ. Eine der Hauptfunktionen der menschlichen Haut als Sinnes-, Ausscheidungs- und Aufnahmeorgan ist neben der Regulation des Flüssigkeits- und Temperaturhaushaltes der Schutz vor mechanischen, chemischen und physikalischen Einwirkungen (Schlag, Druck, Strahlung). Die Haut besteht aus den drei Schichten Epidermis, Dermis und Subcutis (siehe Abb. 2-2).

Die **Epidermis** (Oberhaut) besteht hauptsächlich aus Keratinozyten (Hornstoff) und erfüllt vorrangig Barriere- und Schutzfunktionen. Die Zellen untereinander sind durch Haftzonen (Desmosomen) miteinander verbunden. In der Basalzellschicht sind Melanozyten, Merkelzellen, Langerhanszellen und T-Lymphozyten eingelagert. Die Melanozyten bilden das Pigment, welches für die Färbung der Haut verantwortlich ist. Die Merkelzellen sind mit Nervenfasern verbunden und vermitteln einen Teil des Tastsinns. Die Langerhanszellen und T-Lymphozyten gehören zum Immunsystem der Haut. In der untersten Schicht der Oberhaut, der Keimschicht, erfolgt durch Zellteilung die Neubildung von Zellen. Durch die ständige Neubildung der Zellen werden die darüber liegenden Zellen kontinuierlich immer weiter nach oben geschoben, wo sie langsam austrocknen, verhornen und die oberste Hornschicht der Haut bilden. Der gesamte Vorgang des Hauterneuerungsprozesses dauert etwa 28 Tage.

Die aus Bindegewebe bestehende **Dermis** sorgt u. a. für die Elastizität, Reißfestigkeit und Thermoregulation der Haut. In ihr befinden sich Schweiß- und Talgdrüsen, die Nervenbahnen, Blut- und Lymphgefäße sowie die Sinneszellen. Das Bindegewebe in der Dermis wird von drei Strukturelementen gebildet: Die länglich und parallel angeordneten Faserbündel von Kollagen, Elasthinfasern (Elastizität) sowie viskose Glukosaminoglykan-Grundsubstanz. Die zellularen Bestandteile dieser Hautschicht sind die Fibroblasten, die für die Glukosaminoglykanproduktion, Kollagen- und Elastinsyntesen zuständig sind sowie die immunologisch aktiven Mastzellen, Makrophagen und Lymphozyten.

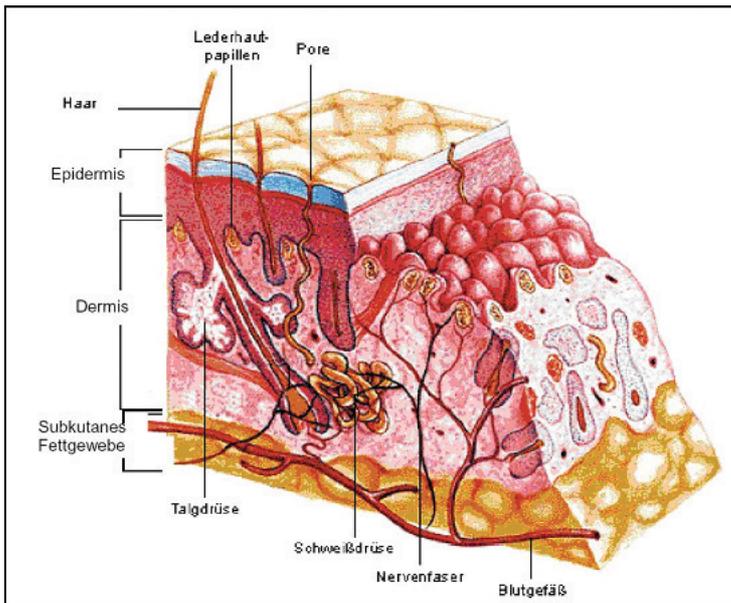


Abb. 2-2: Aufbau der menschlichen Haut nach /7/

Das stratum reticulare bildet den unteren Teil der Dermis. Diese geht kontinuierlich in die tiefer gelegene Subcutis (Unterhaut) über. Das stratum papillare ist die obere Schicht der Dermis: Sie bildet die scharfe, wellenförmige Grenze zur Epidermis. Durch ihre wellenförmige Struktur wird die Kontaktfläche zur Epidermis vergrößert und so die Nährstoffversorgung der untersten Epithelschicht der Epidermis - den Basalzellen- über die in den Papillarkörpern verlaufenden Blutgefäße sichergestellt.

Die **Subcutis** folgt der Dermis als letzte der drei Hautschichten und fungiert als Verbindung zu der darunter liegenden Muskulatur /120/. Diese Hautschicht enthält vor allem Fett- und Bindegewebe, ermöglicht die Verschiebbarkeit der Haut und dient als Fettspeicher und Wärmeisolator.

Die photosensiblen Bestandteile der Haut sind die Proteine, das DNA-Material sowie das Melanin und andere Moleküle. Die Eindringtiefe der optischen Strahlung in die Haut wird neben der Photonenenergie durch die Beschaffenheit der Haut, d. h. die Melanin- und Proteinkonzentration, die Dicke und Wassergehalt der Epidermis bestimmt /69/, /97/, /111/. Die spektrale Abhängigkeit der Eindringtiefe der UV-Teilstrahlungen in die menschliche Haut verdeutlicht Abb. 2-3.

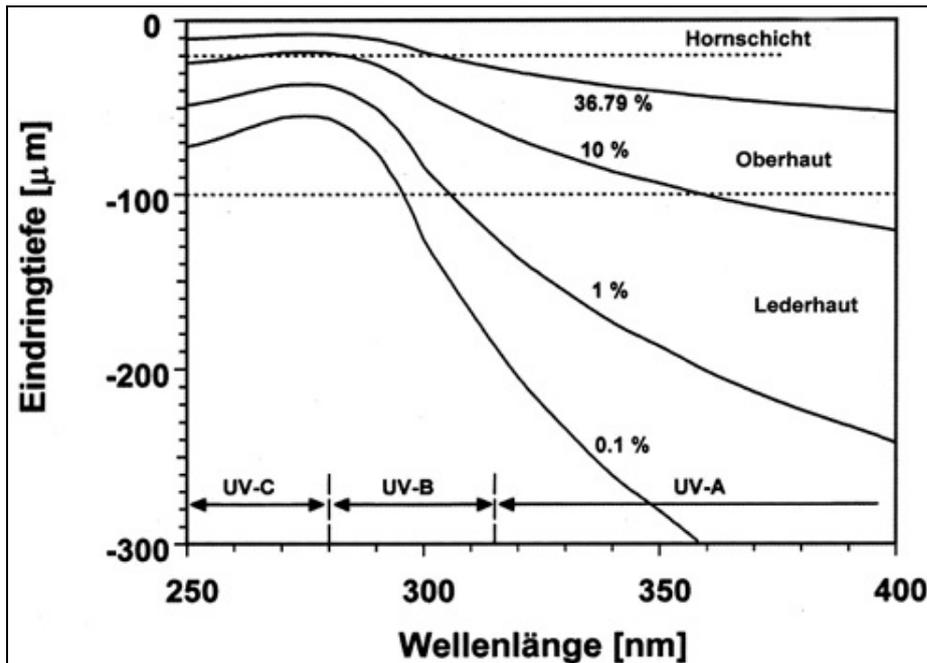


Abb. 2-3: Spektrale Abhängigkeit der Eindringtiefe der UV-Strahlung in die Haut nach /13/

2.3.2 Aufbau und Funktionsweise des menschlichen Auges

Das menschliche Auge ist ein nahezu kugelförmiges Organ, sein Durchmesser beträgt ca. 24 mm, seine Länge etwa 26 mm. Dieses Organ ist mittels sechs Augenmuskeln in alle Richtungen drehbar gelagert. Der mit durchsichtigen Medien (vordere Augenkammer, Linse, Glaskörper) gefüllte Auginnenraum wird durch die innere, mittlere und äußere Haut umgeben. Dabei sind die Häute konzentrisch geschichtet.

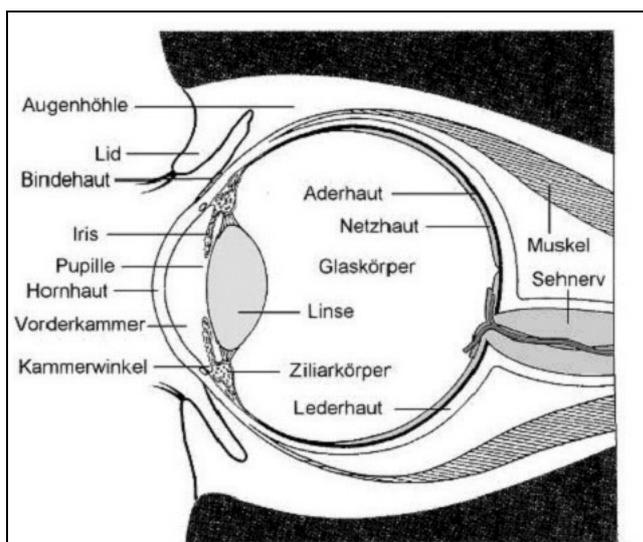


Abb. 2-4: Aufbau des menschlichen Auges nach /137/

Die äußere Augenhaut besteht aus der Lederhaut (Sclera) und der Hornhaut (Cornea). Sie wird durch den Augeninnendruck gespannt. Die Aderhaut, der Strahlenkörper (Ziliarkörper) und die Regenbogenhaut (Iris) bilden die mittlere Augenhaut (siehe Abb. 2-4). Die gefäß- und pigmentreiche Aderhaut dient vorwiegend zur Stoffwechselfversorgung des Auges. Der Ziliarkörper stellt eine Halte- und Spannvorrichtung für die Augenlinse dar. Die Regenbogenhaut fungiert als Blende vor der Linse und kann verschiedenfarbig pigmentiert sein. Der Durchmesser der Öffnung in der Mitte der Regenbogenhaut, die Pupille, kann sich in Abhängigkeit vom Leuchtdichteniveau und der Entfernung des Sehobjektes zwischen 2 mm und 8 mm verändern.

2.3.2.1 Der Sehvorgang

Der Wellenlängenbereich der sichtbaren elektromagnetischen Strahlung erstreckt sich nach DIN 5031 von 380 nm bis 780 nm und erzeugt beim Menschen über das Auge eine Gesichtsempfindung. Die innere Augenhaut besteht aus der für den Sehvorgang wichtigen Netzhaut mit ihren lichtempfindlichen Empfängerelementen, den Zapfen und Stäbchen /135/. Das in die Stäbchen und Zapfen gelangende Licht löst in diesen Zellen eine chemische Reaktion aus, wodurch Rhodopsinmoleküle abgebaut werden. Dies bewirkt ein elektrisches Generatorpotential, das eine Änderung der Durchlässigkeit der Zellmembran für Natrium- (Na^+), Kalium- (K^+), und Chlor- (Cl^-) Ionen zur Folge hat. Durch die Wanderung dieser Ionen durch die Zelle wird die Potentialdifferenz von 60 mV – 90 mV zwischen dem Zellinnern und der Membran umgekehrt. Dieses für kurze Zeit entstehende sog. Aktionspotential wird über das Axon der Sehzelle zur Bipolarzelle weitergeleitet und bildet die Grundlage für das elektrische Signal, das über die Sehnerven zum Gehirn gelangt und eine Gesichtsempfindung hervorruft. Danach stellt sich der ursprüngliche Ruhezustand wieder ein. Je größer der Lichtreiz ist, umso mehr Aktionspotentiale pro Zeiteinheit werden erzeugt und über das Axon zum Gehirn weitergeleitet (Impulsfolge). Bei diesem Vorgang handelt es sich also um eine Impulsfrequenzmodulation /103/.

Entscheidend für die Wirkung der UV-Strahlung auf das Auge ist die Eindringtiefe der Strahlung /128/. Aufgrund der Absorption von Photonen mit Wellenlängen $380 \text{ nm} < \lambda < 780 \text{ nm}$ durch Rezeptoren ist dieser Bereich der optischen Strahlung sichtbar und für die Gesichtsempfindung sowie die Farbwahrnehmung verantwortlich. Für beide Rezeptortypen sind in /28/ relative spektrale Empfindlichkeiten definiert. Für einen farbennormalsichtigen, helladaptierten (Leuchtdichten über einen Wert von ca. 3 cdm^{-2} - 6 cdm^{-2}) Beobachter und 2° -Gesichtsfeld wird der Hellempfindlichkeitsgrad durch $V(\lambda)$. Für das 10° -

Gesichtsfeld und dunkeladaptiertes Auge wird der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad für das skotopische Sehen durch $V'(\lambda)$ definiert /30/, /22/.

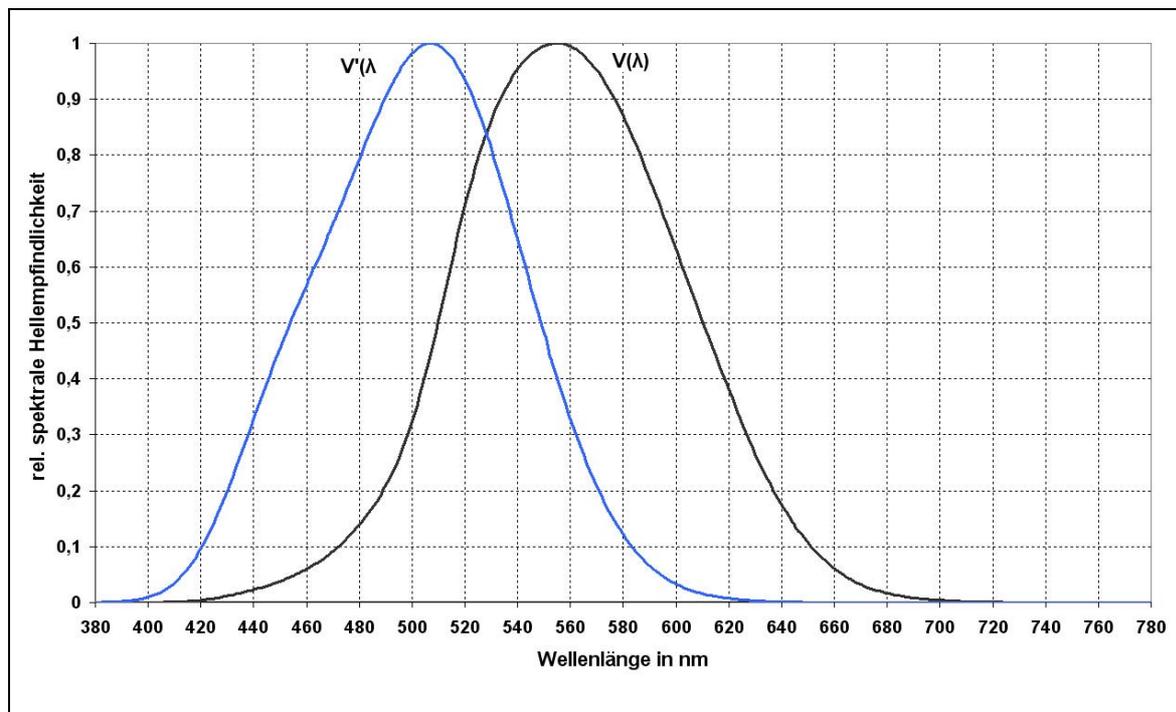


Abb. 2-5: Spektrale Hellempfindlichkeitsfunktionen des menschlichen Auges nach /28/

Entscheidend für die Farbwahrnehmung sind die Empfindlichkeiten der drei Zapfentypen, die für das Sehen bei höheren Leuchtdichten zuständig sind. Ihre Empfindlichkeitsfunktionen bilden ein Tripel von Spektralwerten, das zu einem Primärvalenzsystem gehört und durch eine lineare Transformation in das Normvalenzsystem überführbar ist. Metamere Farbreize unterschiedlicher Spektralverteilung, die gleichen Farbvalenzen entsprechen, erzeugen in den Zapfen gleiche Erregungen und sind damit ununterscheidbar. Diese Tripel der durch die Zapfenempfindlichkeiten gegebenen Spektralwertfunktionen werden als Grundspektralwertkurven bezeichnet (siehe Abb. 2-6).

Außerhalb des VIS kann optische Strahlung verschiedene Wirkungen hervorrufen. Kurzwellige UV-Strahlung unterhalb der Wellenlänge $\lambda < 295$ nm wird in der Hornhaut absorbiert. Längerwellige UV-Strahlung im Bereich 320 nm - 380 nm wird hauptsächlich in der Augenlinse absorbiert, wobei ein Teil dieser Strahlung jedoch auch die hintere Augenkammer erreichen kann. Im infraroten Bereich des Spektrums mit $\lambda > 780$ nm wird optische Strahlung in der Augenlinse, im gallertartigen Glaskörper und in der Netzhaut absorbiert.

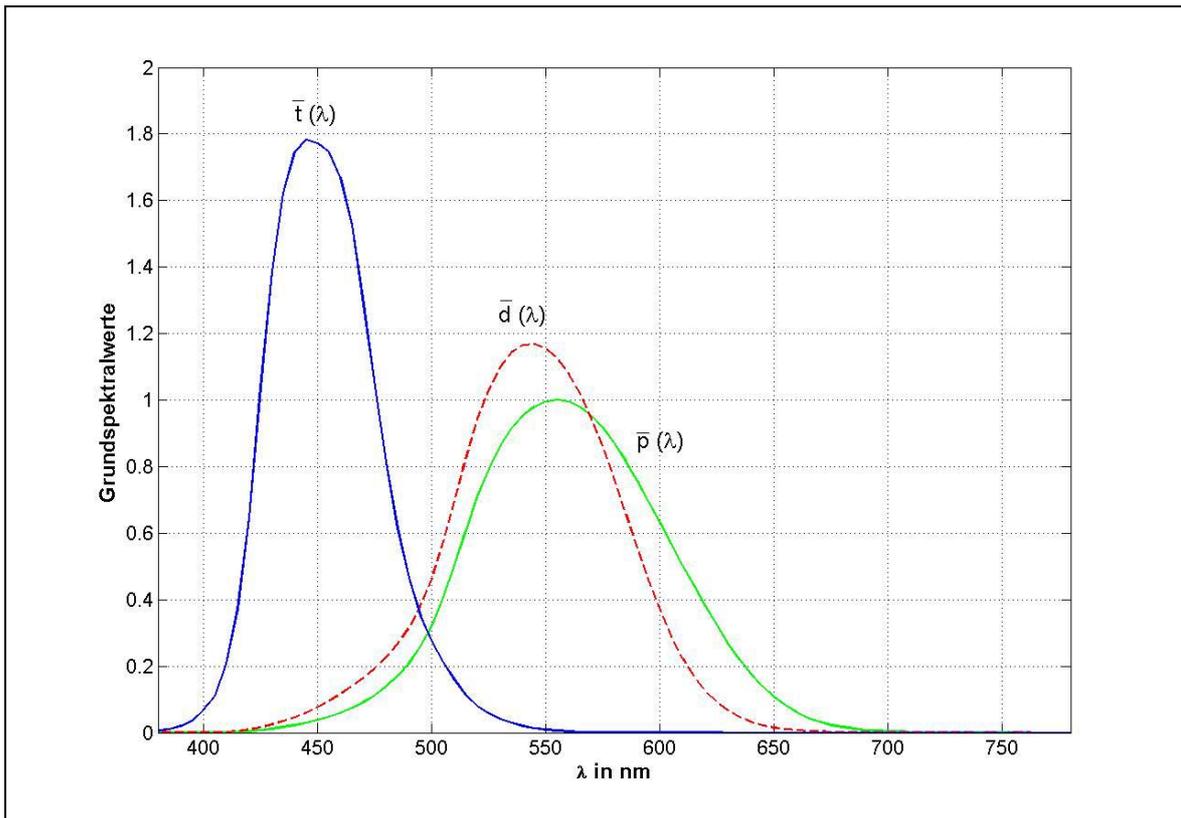


Abb. 2-6: Grundspektralwerte der drei zapfenförmigen Sehzellen nach /117/

2.4 Die gesundheitlichen Wirkungen optischer Strahlung auf den Menschen

Die Sonnenstrahlung reguliert in allen lebenden Organismen wichtige Körperfunktionen und stellt bei der Optimierung und Bewertung von Strahlungsquellen und Bestrahlungsgeräten die natürliche Referenz dar. Die spektralen Eigenschaften der natürlichen Globalstrahlung werden im Abschnitt 2.5 behandelt. Die Bestrahlung der menschlichen Haut mit solarer oder künstlicher UV-Strahlung kann sowohl gesundheitsfördernde als auch schädigende Effekte hervorrufen. Das Auftreten dieser erwünschten und unerwünschten Effekte hängt von der spektralen Zusammensetzung der Strahlung, der Dosis sowie der Häufigkeit der Anwendung ab. Bei der Beurteilung der gesundheitlichen Effekte werden neben exakten spektral-radiometrischen Größen und der gerätetechnischen und strahlungsphysikalischen Eigenschaften der Strahlungsquellen auch Kenntnisse über die spektralen, systemischen und lokalen Eigenschaften der einzelnen photobiologischen Wirkungen benötigt. Für die Bewertung künstlicher Bestrahlungsgeräte sind alle möglichen gesundheitlichen Effekte gegeneinander abzuwägen.

Beim menschlichen Organismus dienen die Haut und die Augen als Empfangsorgane für optische Strahlung und sind damit primäre Orte für photobiologische Effekte bei Strahlungsexposition. Die gesundheitlichen Effekte werden in akute und chronische Wirkungen eingeteilt, wobei die letzteren erst nach längeren Einwirkzeiten auftreten und durch körpereigene Reparaturmechanismen nicht aufgehoben werden können. Im Folgenden werden die gesundheitlichen Effekte der optischen Strahlung erläutert.

2.4.1 Wirkungen der UV-Strahlung

2.4.1.1 Akute Wirkungen über die Haut

Die Wirkungen der UV-Strahlung spielen sich primär in der Epidermis ab, wobei in deren unterster Schicht (*stratum basale*) die Bildung der bei vielen Reaktionen der Haut beteiligte Melanin erfolgt. Die Haut besitzt die Eigenschaft, dass sie sich bei wiederholter Exposition an die UV-Strahlung adaptiert. Für die UV-Adaptation sind zwei Mechanismen zuständig.

Ausbildung einer **Lichtschwiele**: Vor allem UV-B stimuliert die Vermehrung der Basalzellen in der Epidermis, die äußere Schicht der Epidermis, das sog. Stratum corneum, weitet sich auf, so dass ein geringerer Anteil der Strahlen die Dermis erreichen kann. Durch diese Reaktion der menschlichen Haut wird die in der Oberhaut verstärkt, UV-B und ggf. UV-C absorbiert. Jedoch stellt die Lichtschwiele wegen der größeren Eindringtiefe nur eine begrenzte Schutzfunktion gegen UV-A. Die Verdickung der äußeren Schicht der Epidermis wird bei Abwesenheit von Strahlung langsam abgebaut. Die Abstoßungszeit alter Hornschichten kann 2 bis 3 Monate betragen.

Hautbräunung infolge *Pigmentierung*: Bei UV-Strahlendosen unterhalb der Erythemschwelle werden Melanozyten angeregt und aus vorrätigem Tyrosin (Baustein zahlreicher Eiweißverbindungen) der Pigmentstoff Melanin hergestellt, welches an die Hautoberfläche transportiert wird. Die Neusynthese des Melanins erfolgt durch UV-B-Strahlung während durch UV-A und Sauerstoff die farbschwachen Melanin-Pigmente gedunkelt werden. Durch Melanin wird die Basalzellschicht vor schädigenden Einflüssen der UV-Strahlung geschützt. Das Absorptionsspektrum des Melanins ist in Abb. 2-1 zu sehen. Bei der so genannten **Sofortpigmentierung**, die wenige Stunden nach einer UV-Exposition der unbestrahlten Haut stattfindet, kommt es zur Photooxidation von Melaninvorstufen zu Melanin in der Epidermis und zu einer Dunkelfärbung der bestrahlten Haut. Der wirksame Spektralbereich für diese auch als Direktpigmentierung bezeichnete Haut-

reaktion liegt zwischen 300 nm und 440 nm und erreicht bei 340 nm ihren Maximalwert. Die Schwellendosis für eine gerade noch sichtbare Verfärbung der Haut ist mit $H_{s,pi} = 100.000 \text{ Jm}^{-2}$ relativ hoch. Die Rückbildung der Direktpigmentierung erreicht nach Stunden bis zu einigen Tagen die Hälfte des Maximalwertes und dauert über eine längere Zeit.

Bei der **verzögerten Pigmentierung** wird vor allem durch die Exposition mit UV-Strahlung zwischen den Wellenlängen 285 nm und 440 nm in der Epidermis vermehrt Melanin synthetisiert und es kommt zum Melanozytenwachstum. Dabei lagern sich die noch farbschwachen Melaningranula um die Zellkerne, um die dort befindliche Erbsubstanz vor Strahleneinflüssen zu schützen. Diese auch als sekundäre Pigmentierung bezeichnete Wirkung erfolgt nach drei bis fünf Tagen nach UV-Exposition und erreicht ihr Maximum nach fünf bis sieben Tagen. Die Schwellenbestrahlung für die verzögerte Pigmentierung $H_{s,pd}$ liegt zwischen 300 Jm^{-2} und 450 Jm^{-2} . Die Einteilung der unterschiedlichen Hauttypen erfolgt nach der Fähigkeit zur Pigmentierung.

UV-Strahlung kann bis in die *stratum basale* eindringen und zu Schäden der Erbsubstanz der Pigmentzellen führen. In solchen Zellen werden DNS-Photoprodukte (z.B. Pyrimidindimere) gebildet, die entweder absterben oder von körpereigenen Abwehrmechanismen repariert werden. Nicht irreversible Pyrimidindimere bilden die Vorstufen von chronischen UV-Schäden in der menschlichen Haut. Das Wirkungsspektrum der Pyrimidindimerisierung erreicht sein Maximum bei einer Wellenlänge von 305 nm und ist auf der Abb. 2-7 dargestellt.

Das UV-Erythem als Symptom stellt sich eine akute Entzündung der menschlichen Haut als Folge einer zu hohen UV-Bestrahlung ein. Diese klinisch auch als *erythema solaris* oder *dermatitis solaris* bekannte Wirkung ist die bekannteste physiologische, reversible Reaktion der Haut auf Strahlung im gesamten UV-Spektrum. Als Ursachen gelten die Absorption der UV-Strahlung in der Hornhaut und in der übrigen Epidermis und dadurch bedingte Freisetzung von zu den gefäßführenden Abschnitten der Haut diffundierenden Stoffen sowie die Absorption direkt in den gefäßführenden Anteilen der Haut sowie die dadurch verursachte Direktwirkung auf die Gefäßwände. Als Folge dieser primären Absorptionen kommt es zur Neubildung von erythemauslösenden Stoffen wie Histamin (aus Histidin) oder Serotonin. Das UV-Erythem tritt erst einige Stunden nach Strahlungsexposition auf und erreicht nach 6 bis 24 Stunden seine maximale Ausprägung. In Abhängigkeit

von der Erythemdosis kann die Reaktion der Haut dabei von einem leichten Sonnenbrand bis zu schwersten Verbrennungen reichen. Als weitere Symptome des UV-Erythems gelten neben Hautrötung Hautschwellungen und Juckreiz /81/.

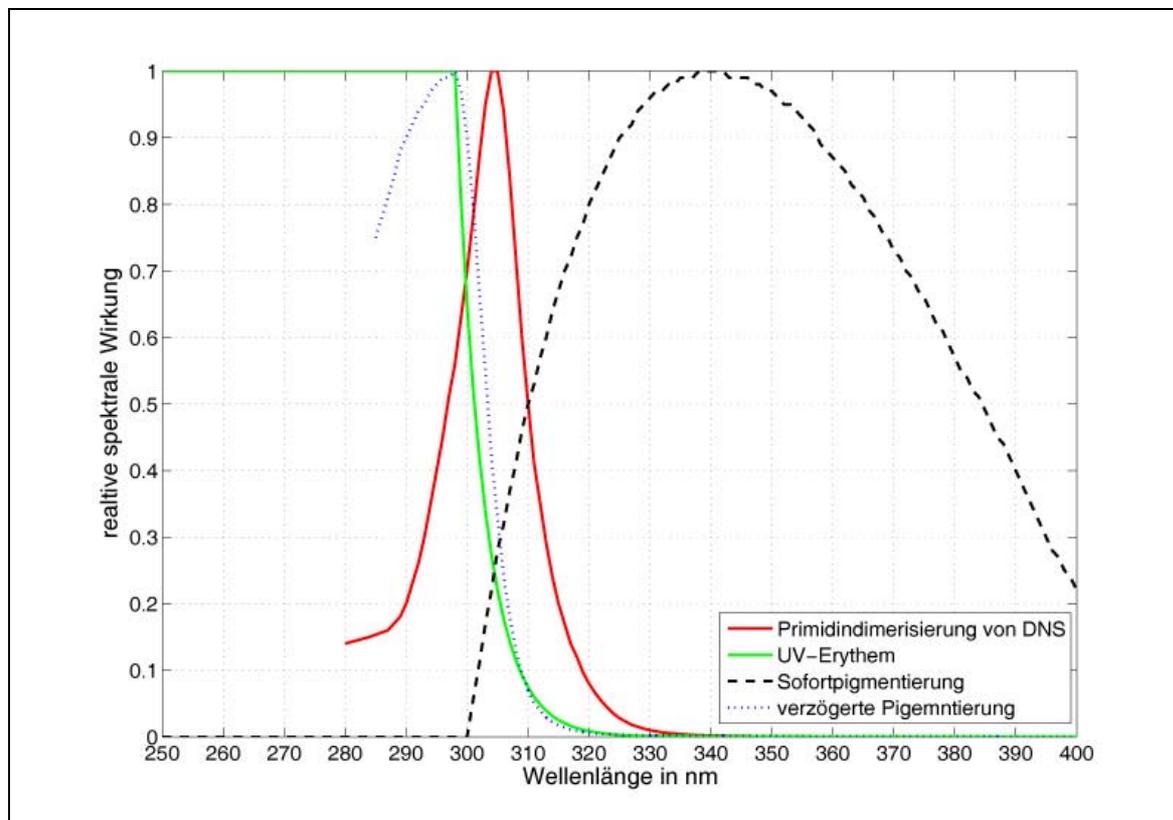


Abb. 2-7: Die relativen spektralen Wirkungsfunktionen für die Direkt- und Sofortpigmentierung sowie das UV-Erythem nach /27/

Für die spektrale Wirkungsfunktion des UV-Erythems spielen die Eiweiß- sowie die Tyrosinabsorptionseigenschaften eine entscheidende Rolle (vgl. Abb. 2-1). Durch die DIN sind relative spektrale Wirkungsfunktionen definiert (siehe Abb. 2-7), die diese akuten Wirkungen der UV-Strahlung auf die menschliche Haut beschreiben. Die individuelle Abhängigkeit der Empfindlichkeit der menschlichen Haut gegenüber UV-Strahlung hängt u. a. von der ethnischen Zugehörigkeit, dem Alter und dem Gesundheitszustand ab. Die ethnische Zugehörigkeit und genetischen Vorbedingungen lassen sich durch die Einteilung in Hauttypen klassifizieren. Als Maß für die Empfindlichkeit wird die Erythemschwelendosis nach Gl. 2-7 definiert. Sie bezeichnet die Dosis der UV-Strahlung, die 24 h nach der Exposition auf der Haut eine sich gegenüber der unbestrahlten Haut abhebende Rötung verursacht. Durch die CIE /18/ werden für verschiedene Hauttypen Schwellenbestrahlungen für das UV-Erythem definiert, wobei diese für den Hauttyp I bei 200 Jm^{-2} (= 2 SED), bei 250 Jm^{-2} (= 2,5 SED), bei 350 Jm^{-2} (= 3,5 SED) und bei 450 Jm^{-2} (= 4,5 SED) liegen. Der Wert der minimalen erythemwirksamen Dosis für den menschlichen Körper

wird in DIN /35/ mit 1 MED angegeben. Dieser Wert entspricht der Schwellendosis für das UV-Erythem $H_{s,er} = 250 \text{ Jm}^{-2}$ für den hellhäutigen Europäer ohne UV-Vorbestrahlung.

2.4.1.2 Akute Wirkungen über die Augen

Durch Einwirkung von UV-Strahlung $\lambda \leq 310 \text{ nm}$ auf das menschliche Auge von wirksamen Dosen $H_{s,ko} = 50 \text{ Jm}^{-2}$ kann im menschlichen Auge eine Entzündung der Bindehaut, die sog. **Photokonjunktivitis** ausgelöst werden. Dabei werden durch photochemische Reaktionen die Epithelzellen geschädigt. Die **Photokeratitis** (Hornhautentzündung) wird durch die Entzündung des Epithels der Hornhaut bei einer Schwellendosis $H_{s,ke} = 100 \text{ Jm}^{-2}$ ausgelöst. Diese akuten Schädigungen machen sich nach sechs bis acht Stunden nach UV-Exposition durch starke Augenschmerzen bemerkbar. Da sowohl in der Hornhaut als auch in der Bindehaut neue Epithelzellen nachgebildet werden, sind diese akuten Wirkungen der UV-Strahlung auf das Auge reversibel und nach ein bis zwei Tagen vollständig geheilt. Die Wirkungsfunktionen für akute Schädigungen des Auges durch UV-Strahlung sind in Abb. 2-8 dargestellt.

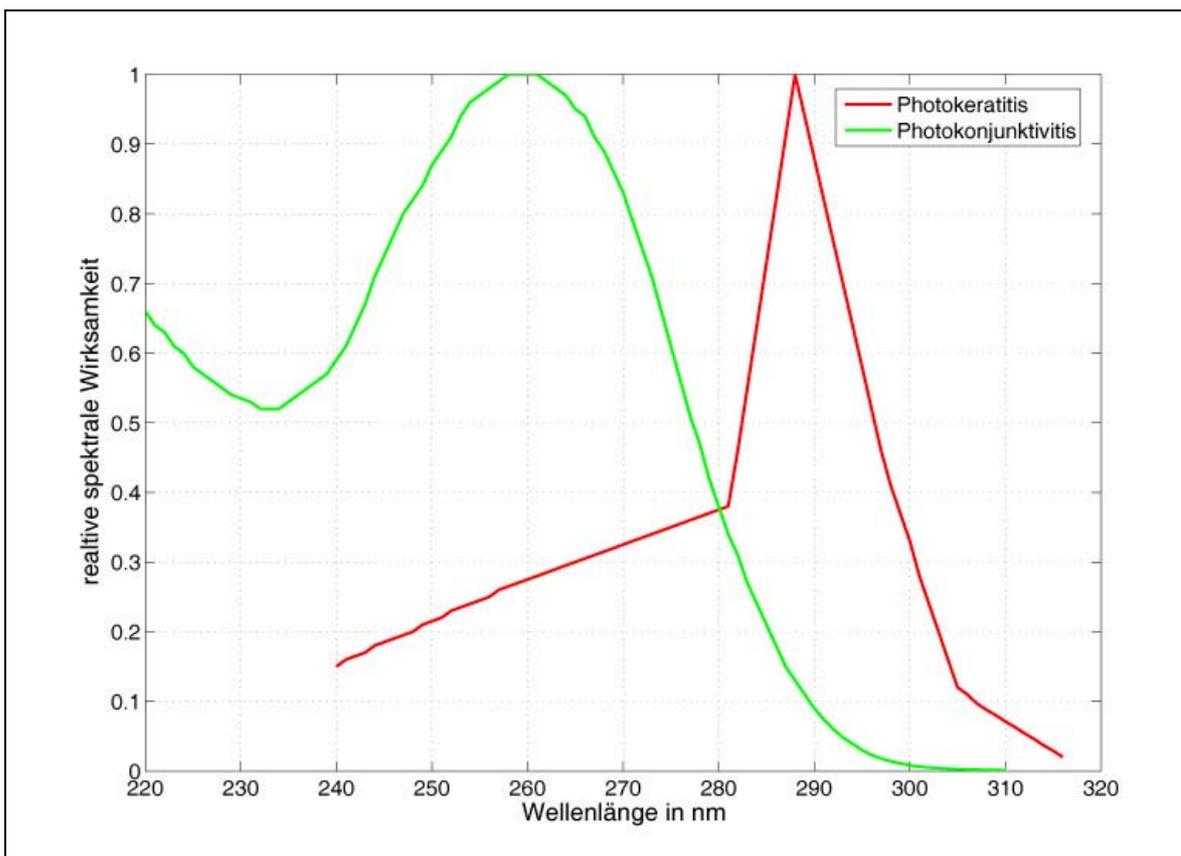


Abb. 2-8: Wirkungsfunktion der Photokeratitis und Photokonjunktivitis

2.4.1.3 Chronische Wirkungen über die Haut

Zu den chronischen Folgen der UV-Exposition zählt die **vorzeitige Hautalterung** (Photoaging). Durch übermäßige UV-Exposition kann es in der Lederhaut, die ca. 98 % der für die Hautelastizität verantwortlichen Kollagenfasern enthält und für relativ hohe Anteile des UV-A durchlässig ist (vgl. Abb. 2-3), zu aktinischen Hautveränderungen kommen. Die Begleiterscheinungen hierbei sind verstärkte Faltenbildung, Pigmentverschiebungen, Poren- und Gefäßweiterungen sowie Entstehung von Altersflecken und Bindegewebsabschlaffung. In der Literatur wird empfohlen, dass bei therapeutischen UV-Bestrahlungen in suberythemösen Dosen eine kumulative Jahresdosis von 100 MED nicht überschritten werden soll /140/. Ein Wirkungsspektrum für diese chronischen Folgen der UV-Strahlung ist nicht bekannt.

An durch übermäßiger Exposition von natürlicher oder künstlicher UV-Strahlung chronisch geschädigter Haut steigt die Wahrscheinlichkeit der Entstehung von **Hautkarzinomen**. Es wird vermutet, dass die Schädigung der Haut im frühen Lebensalter durch häufiges UV-Erythem die Wahrscheinlichkeit später an Hautkarzinomen zu erkranken wesentlich erhöht. Man unterscheidet dabei zwischen dem nichtmelanozythärem Hautkrebs und malignem Melanom. Nichtmelanozythäre Basalzell- oder Stachelzellkarzinome treten überwiegend an den häufig bestrahlten Hautarealen auf, wobei es zu keiner Metastasenbildung kommt. Malignes Melanom tritt vorwiegend an bedeckten Hautpartien und überwiegend bei helleren Hauttypen mit Neigung zu Sommersprossen und Pigmentmalen auf. Die Wahrscheinlichkeit der Metastasenbildung liegt bei dieser Art des Hautkrebses bei 20 % - 30%. Das Wirkungsspektrum dieser schwerwiegendsten chronischen Folge der UV-Bestrahlung ähnelt dem des UV-Erythems, wobei davon ausgegangen wird, dass hohe UV-Bestrahlungen auch eine Gefährdung herbeiführen können.

2.4.1.4 Chronische Wirkungen über die Augen

Als eine chronische Wirkung übermäßiger UV- oder IR-Exposition gilt der **Katarakt** der Augenlinse (grauer Star), wobei es unter Einwirkung der Strahlung in Folge photochemischer Reaktionen zur Veränderung bestimmter Eiweiße in der Augenlinse kommt. Dadurch können die Brechungseigenschaft der Linse verändert und eine irreversible Linsentrübung herbeigeführt werden. Als Begleiterscheinungen können dabei langsam zunehmende Sehstörungen sowie starke Blendungserscheinungen auftreten. Bei dem UV-Katarakt sind besonders Strahlen im UV-A aber auch im UV-B wirksam, wobei die Schädigung nach langzeitiger Exposition durch räumlich ausgedehnte Strahlungsquellen auftritt. Der IR-Katarakt (Glasbläserstar, Feuerstar) wird durch langjährige Wirkungsdauern

(10- 30 Jahre) verursacht. Als schädigend gilt dabei Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 780 nm - 2000 nm /51/, /106/.

Durch die Internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (IC-NIRP) werden daneben als chronische Wirkungen der optischen Strahlung die Netzhautverbrennung und die Blaulichtgefährdung (*Photoethinitis*) genannt. Die thermische Verbrennung der Netzhaut kann bei kurzzeitigen (in s, ms oder ns) und sehr hohen örtlichen Bestrahlungsstärken auf der Netzhaut wie bei ungeschütztem Blick in die Sonne und besonders bei Laserstrahlung hervorgerufen werden, wobei die betreffende Wirkungsfunktion bei 435 nm - 440 nm ihren Maximalwert erreicht. Die Blaulicht-gefährdung (*blue light hazard*) erfolgt meist überlagert mit der Netzhautverbrennung und beschreibt den irreversiblen Prozess der photochemischen Veränderungen in den Zellen der Netzhaut und des darunter liegenden Gewebes. Diese Schädigung erfolgt unter Einwirkung von hohen Bestrahlungsstärken auf der Netzhaut und Expositionszeiten von länger als 10 s im kurzwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums und bei einem Wirkungsmaxima im Wellenlängenbereich 435 nm - 440 nm /56/, /51/.

2.4.2 Die Vitamin D₃-Photosynthese

Bereits 1645 wurden die bekanntesten Vitamin D-Mangelerkrankungen Rachitis und Osteomalazie von Whistler beschrieben /138/. Der erste therapeutische Einsatz von künstlicher UV-Strahlung zur Behandlung von Vitamin D-Mangel erfolgte durch Hudschinski 1919, der von Heilerfolgen bei rachitischen Kindern nach Bestrahlungen ihrer Arme mit Quecksilberdampflampen berichtete /104/. McCollum erbrachte 1922 den Nachweis für die Existenz eines antirachitisch wirkenden Vitamins und nannte es Vitamin D /98/. 1923 gelang Goldblatt und Soames die Synthese des Prävitamin D (7-dehydrocholesterol) durch Bestrahlung der Haut mit Tageslicht /63/.

Die chemischen Strukturen von Vitamin D₂ und Vitamin D₃ wurden in den 30er Jahren von A. Windaus aufgeklärt /139/. Erst in den Jahren 1969 bzw. 1971 wurden zwei wichtige Hydroxylisierungsschritte in der Niere und der Leber beschrieben, die zur Umwandlung dieses Vitamins in die aktive Form dieser Substanz nötig sind. Schließlich wurde in den 70er Jahren ein Rezeptorprotein für Vitamin D biochemisch charakterisiert und 1987 die Sequenz des Vitamin D-Rezeptors aufgeklärt.

Für optimales Wachstum und Funktionieren des Körpers benötigen lebende Organismen genügende Zufuhr von Calcium und Phosphat mit der Nahrung. Die Plasmakonzentration

beider Ionen wird in engen Grenzen gehalten. Im Wesentlichen spielen drei Organe für diese Homöostase eine entscheidende Rolle: das *Darmsystem*, durch welches diese Ionen in das innere Milieu aufgenommen werden, die *Knochen*, der die Ionen speichert und bei Bedarf zur Regulation des Serumspiegels Calciumionen abgeben kann und die *Niere*, welche die Geschwindigkeit der Ausscheidung bestimmt. Die hauptsächlichen endokrinen Regulatoren des Calcium- und Phosphathaushaltes sind die beiden Peptidhormone Parathormon (PTH) und Calcitonin (CT) sowie das vom Steroidgerüst abgeleitete aktive Vitamin D₃ (1,25-Dihydroxycholecalciferol auch Calcitriol genannt), das aus den Vorstufen des Vitamin D gebildet wird (siehe Abb. 2-9). Aktuell wird zudem ein membranständiger Rezeptor charakterisiert, der vermutlich die schnellen Effekte des Vitamin D-Hormons vermittelt. Insgesamt existieren drei spezifische Bindungsproteine für von Vitamin D₃ abgeleitete Secosteroide: das Vitamin D-bindende Protein im Serum, der membranständige Rezeptor und der klassische intrazelluläre Rezeptor (VDR). Der 1,25-Dihydroxy-Cholecalciferol wird aus Vitamin D₃ (wie auch aus D₂) durch zwei Hydroxylierungs-Schritte gebildet. Diese Substanz, deren Vorstufen weitgehend inert sind, ist das aktive Hormon /70/. Die Synthese von aktivem Vitamin D₃ aus den Vorstufen des Vitamin D erfolgt auf der menschlichen Haut unter Einwirkung von UV-B-Strahlung. Nur ca. 5 % dieses Stoffes wird über die Nahrung aufgenommen.

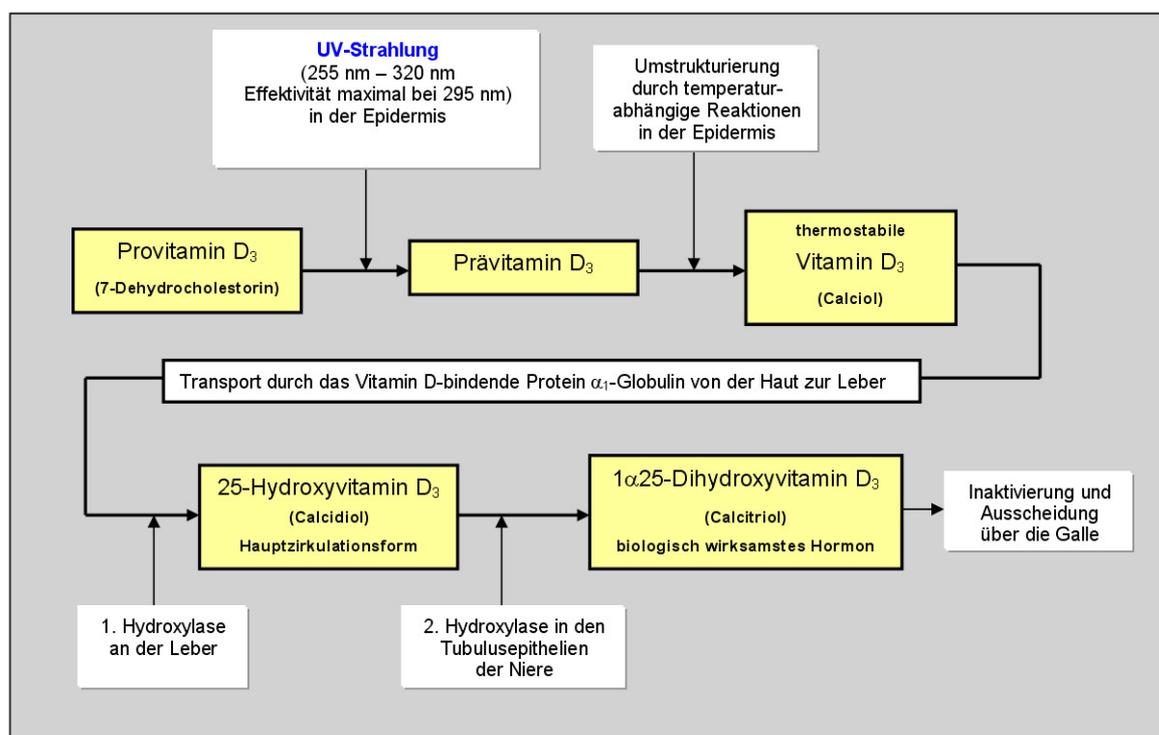


Abb. 2-9: Vitamin D₃-Photosynthese

Theoretische Grundlagen

Bei mangelnder Strahlungseinwirkung wird diese Substanz zu einem essentiellen Nahrungsbestandteil und wird aus diesem Grunde als ein Vitamin bezeichnet. Erst seit 1965-1970 wird von der Wissenschaft die Bedeutung des „Vitamins D“ als **Hormon** betont.

Als gesichertes Maß für das zirkulierende native Vitamin D₃ gilt der Blutspiegel des hauptsächlich hormonell wirksamen Metaboliten 1,25-Dihydroxy-Vitamin D₃. Weiterhin ist erwiesen, dass es eine fast lineare Korrelation zwischen der Vitamin D-wirksamen Bestrahlung (Dosis) und der Höhe des Blutspiegels von 25-Hydroxy-Vitamin D₃ gibt /87/.

Gegenwärtig ist die Erforschung der gesundheitlichen Effekte des Vitamin D und seinen Derivaten ein aktuelles Feld in der Forschung. Als Hauptursachen des Mangels an aktivem Vitamin D₃ gelten neben organischen Schäden an der Niere und Leber, ein Defizit an natürlicher Vitamin D₃-wirksamer Strahlung aufgrund der geographischen Lage und der jahreszeitlichen Schwankungen sowie fehlende oder ungenügende Sonnenexposition. Nördlich bzw. südlich des 40.-45. Breitengrades kann es in den Wintermonaten November/ Dezember bis März/ April (bzw. Mai/Juni bis September/ Oktober) zu Mangelercheinungen aufgrund ungenügender Vitamin D-Aktivierung kommen. Zudem kommt es wegen der Abnahme der Vitamin D-Photosynthesefähigkeit der menschlichen Haut ab dem ca. 50. Lebensjahr zu einem allgemeinen Mangel dieses Vitamins /65/.

Vitamin D-Mangel gilt heute als eine der Hauptursachen von Rachitis bei Kindern, Osteomalazie, Osteoporose sowie Muskelschwäche /16/, /95/. Der chronische Mangel des Vitamins D kann als ernste Konsequenzen einen erhöhten Bluthochdruck, Sklerose, Bildung von Dickdarm-, Prostata-, Brust und Eierstockkarzinomen sowie Diabetes Typ 1 zur Folge haben /66/, /64/, /17/, /65/, /85/. Zahlreiche abgesicherte Studien belegen, dass durch künstliche UV-Bestrahlungen im Wirkungsspektrum der Vitamin D₃-Photosynthese (siehe Abb. 2-10) therapeutische Erfolge der oben aufgezählten Symptome beobachtet werden /86/, /84/.

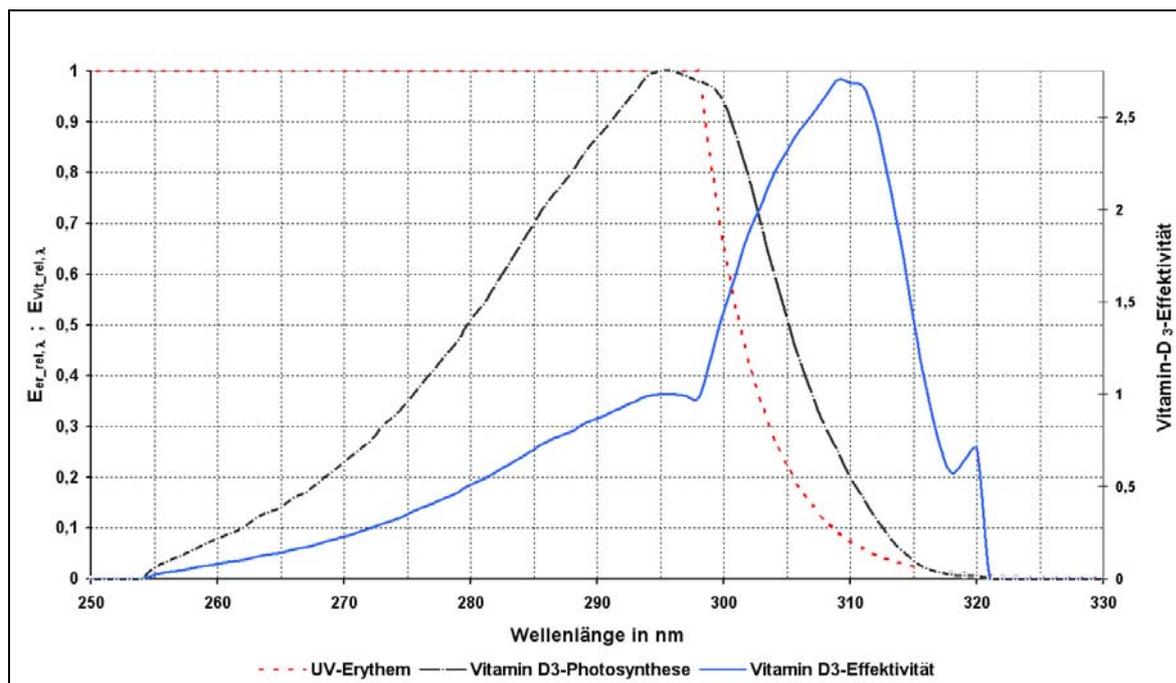


Abb. 2-10: Rel. Wirkungsfunktionen des UV-Erythems, der Vitamin D₃-Photosynthese sowie der Effektivität der Vitamin D₃-Photosynthese

Bei der Photosynthese des Vitamins D₃ durch künstliche oder natürliche Strahlung spielt neben der Höhe der Vitamin D₃-wirksamen Bestrahlungsstärke E_{vd} die gleichzeitig erzielte erythemwirksame Bestrahlungsstärke E_{er} eine wichtige Rolle. Da i. A. suberythematös bestrahlt werden muss, kann durch die Vitamin D₃-Effektivität f_{vd} ein Vergleich von Strahlungsquellen bzw. Bestrahlungsgeräten erfolgen:

$$f_{vit} = \frac{\int s_{vit}(\lambda) \cdot E(\lambda) d\lambda}{\int s_{er}(\lambda) \cdot E(\lambda) d\lambda} \quad \text{Gl. 2-18}$$

Wie Abb. 2-10 verdeutlicht, zeichnet sich der Spektralbereich zwischen ca. 295 nm und 320 nm dadurch aus, dass bei relativ hoher Wirksamkeit der Vitamin D₃-Photosynthese die relative Erythemwirksamkeit der Strahlung Werte > 1 annimmt, d. h. die Vitamin D₃-Effektivität f_{vd} wird hier maximal. Aus diesem Grunde eignet sich dieser Spektralbereich, der auch als Therapiefenster bezeichnet wird, besonders für die Bestrahlungsanwendungen zur Vitamin D₃-Photosynthese. Mit der hauttypenabhängigen Schwellenbestrahlungszeit zum Erreichen des UV-Erythems

$$t_{s,er} = \frac{250 \text{ Jm}^{-2}}{E_{er}}$$

folgt für den Hauttyp II die maximale Vitamin D₃-wirksame Dosis bei der suberythematösen Bestrahlung:

$$H_{vit,max} = \int_0^{t_{s,er}} s_{vit(\lambda)} \cdot E(\lambda) d\lambda \quad \text{Gl. 2-19}$$

In der photomedizinischen Praxis wird bei der UV-Bestrahlung zur Vitamin D₃-Photosynthese gewöhnlich bei der Erstbestrahlung eine Bestrahlungsdauer von $\leq 0,5 t_{s,er}$ gewählt und diese schrittweise erhöht.

2.4.3 Photoinduzierte Melatonininsuppression

Lebewesen zeigen physiologische Anpassung an verschiedene geophysikalische Zyklen, wobei diese periodischen Rhythmen als Zeitgeber für den Organismus dienen. Zu diesen Zeitstrukturen zählen u. a. der annulale (1 Jahr), der lunare (≈ 1 Monat) und der diane bzw. diurnale (≈ 24 h) Zyklus.

Als circadian (von lat. *circa*: ungefähr; *dia*: Tag) ablaufende Prozesse im menschlichen Organismus gelten die Regelung der Körpertemperatur und des Schlaf-Wachzyklus, der Ausstoß gewisser Hormone (Melatonin, Cortisol, Testosteron, Aldosteron), der Blutdruck sowie der Nieren- und Leberstoffwechsel /58/. Auch ultradiane (sich innerhalb eines Tages mehrfach wiederholende Rhythmen; Steuerung von EEG, Atmung) und infradiane Rhythmen (länger als einen Tag dauernd; Steuerung von Winterschlaf, Menstruationszyklus) werden durch das circadiane System beeinflusst. Die Anpassung der physiologisch-psychologischen Prozesse des Körpers an die zeitlichen Umweltbedingungen erfolgt durch sog. innere Uhren. Die Bestandteile dieser endogen angelegten inneren Uhr sind:

- Der Rhythmusgenerator (Schrittmacher), ein System von Afferenzen, das eine Abstimmung der generierten endogenen Zyklen mit der lokalen Umwelt ermöglicht.
- Das System von Effektoren, das den (synchronisierten) Rhythmus des Schrittmachers umsetzt (z. B. durch Hormonsynthese).
- Der exogene Stimulus, der die Synchronisation ermöglicht (z. B. Lichtsignale).

Bei Ausschaltung von Zeitgebern läuft die innere Uhr frei. So dauert bei völliger Dunkelheit die freilaufende circadiane Periode des Menschen im Mittel 10 min – 20 min länger als der 24-Stunden-Tag. Durch die Störung der Synchronisation der inneren Uhr und daraus resultierender, fehlender Tagesrhythmik kann es zu verschiedenen Störungen der Körperfunktionen kommen. Zur Anpassung dieser Periode an den aktuellen Tages-Nachtrhythmus wird das retinal absorbierte Licht herangezogen. Im Wesentlichen werden

bei der Synchronisierung der inneren Uhr Lichtsignale zu Dämmerungszeiten dazu benutzt, um die Phasenlänge des circadianen Systems an die aktuelle Tag-Nachtperiode anzupassen. Dabei werden dann die Lage und Dauer der Photoperiode (Tag) und der damit korrespondierenden Skotoperiode (Nacht) ermittelt. Wie van Esseveldt et al. erklären, verzögert das circadian wirksame Licht am Ende der Photoperiode die Melatoninsuppression durch eine Phasenverschiebung, während am Anfang der Photoperiode dadurch ein Phasenvorlauf verursacht wird. Aus den Änderungen der Tages- und Nachtperiodendauern kann das Zeitsystem die Jahreszeit bestimmen /129/. Somit stellt das System neben einer inneren Uhr auch einen inneren biologischen Kalender dar /105/.

Bei der Synchronisation der inneren Uhr spielen die beiden Photorezeptorarten (Zapfen oder Stäbchen) keine Rolle /46/. Vielmehr reagieren einige der Ganglienzellen als sog. circadiane Photorezeptoren. Nach neuesten Untersuchungen sind neben den beiden visuellen Rezeptortypen Zapfen und Stäbchen circadiane (nichtvisuelle) Photorezeptoren auf der Netzhaut des Menschen aufzufinden, die als ein wesentlicher Teil des Zeit-Systems fungieren /29/, /94/. Diese setzen bei bestimmten Beleuchtungsstärken auf der Netzhaut mit Melanopsin und Chrytochrome zwei Photopigmente frei, wodurch eine neuronale Projektion des Lichtsignals auf den suprachiasmatischen Nucleus (SCN) im Hypothalamus erfolgt /57/. Der Hypothalamus stellt ein Steuerzentrum der vegetativen Funktionen dar und gilt als zentrales Bindeglied zwischen dem Nervensystem und dem Hormonsystem. Der Übertragungskanal von der Retina auf den SCN wird der retinohypothalamische Trakt (RHT) genannt. Der SCN generiert einen endogenen Rhythmus der neuronalen Aktivität durch molekulargenetische Faktoren in Form von rhythmischen Neuroenenentladungen. Aufgrund der neuronalen Eingangssignale vom SCN wird von der Zirbeldrüse das Hormon Melatonin ausgeschüttet /108/. Die Synchronisierung des endogenen Rhythmus und damit der Melatoninausstoßes erfolgt durch retinale Lichtsignale, mit deren Hilfe das RHT das SCN beeinflusst. Rückkopplungsmechanismen zwischen dem Auge, dem SCN und der Zirbeldrüse reagieren auf die Veränderungen des durch das Auge wahrgenommenen Lichtes durch nervale Informationen als auch durch neuroendokrine Veränderungen über Melatonin /93/.

Brainard und Thapan untersuchten die spektrale Abhängigkeit der für die Melatoninsuppression wirksamen Bestrahlungsstärke /52/, /53/, /127/. Dabei stellte sich heraus, dass die spektrale Empfindlichkeit der circadianen Photorezeptoren sich im Vergleich zur Hellempfindlichkeitskurve für das Tagessehen zum kurzwelligen Bereich des sichtbaren

Spektrums verschieben. Daraus resultiert, dass die Blauanteile des Lichtes wirksamer bei der Steuerung der inneren Uhr sind. Die maximale Wirksamkeit der Melatoninunterdrückung erfolgt für optische Strahlung bei Wellenlängen von 456 nm (Thapan et al.) bzw. 465 nm (Brainard et al.). Ausgehend von den von Brainard angegebenen Messdaten wurde unter Beachtung der Durchlässigkeit der Augenmedien für optische Strahlung das relative Wirkungsspektrum zur Melatoninsuppression $s(\lambda)_{ms, rel}$ ermittelt. In Abb. 2-11 sind der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ für 2°-Gesichtsfeld, der spektrale Empfindlichkeitsgrad für das Dunkelsehen $V'(\lambda)$ für 10°-Gesichtsfeld nach DIN, die von den Brainard und Thapan angegebenen Messdaten sowie vom Autor daraus ermittelte Wirkungsfunktion für die Melatoninsuppression aufgetragen.

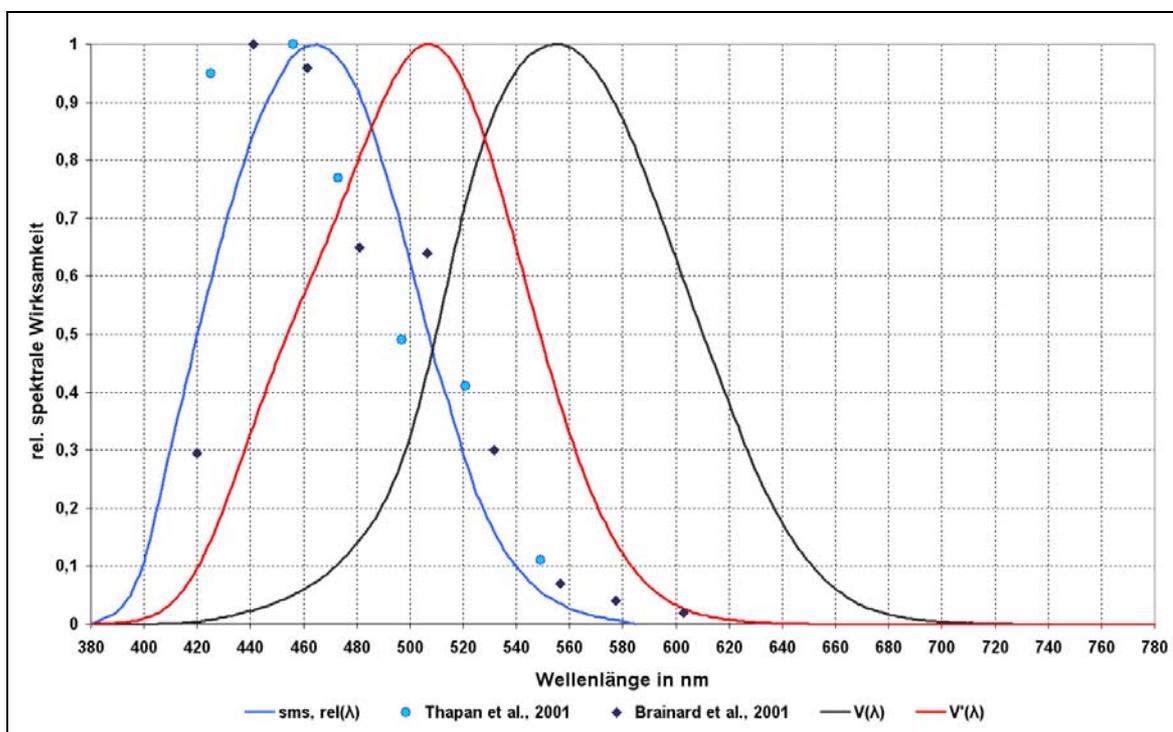


Abb. 2-11: Relative spektrale Wirksamkeit der Melatoninsuppression

2.4.3.1 Wirksame Bestrahlungsstärken

Neben der spektralen Wirkungsfunktion zur Melatoninsuppression durch optische Strahlung ist der Schwellwert der Bestrahlungsstärke für diesen Effekt nicht abgesichert. Brainard et al. geben für 8 Wellenlängen von 440 nm – 600 nm wirksame Bestrahlungsstärken an, die bei Bestrahlung von Probanden mit monochromatischem Licht einer Xenon-Bogenlampe zu signifikanten Melatoninsuppressionen führten. Für das Wirkungsmaximum bei 460 nm wird hier als Schwellenwert der wirksamen Bestrahlungsstärke zur Melatoninunterdrückung mit $0,03 \text{ Wm}^{-2}$ ($6 \cdot 10^{13}$ Photonen) angegeben. Die Sättigung der Wirkung für diese Wellenlänge wird bei einer Bestrahlungsstärke von $0,4 \text{ Wm}^{-2}$ erreicht. Bei

420 nm ergeben sich signifikante Unterschiede in der Wirkung bei einer wirksamen Bestrahlungsstärke von $0,3 \text{ Wm}^{-2}$. Zum langwelligen Teil des Spektrums hin nimmt die Schwellenbestrahlungsstärke zur Melatoninsuppression stetig zu. Laut einer weiteren Studie wird nach Bestrahlung mit monochromatischem Licht der Wellenlänge von 460 nm über 6,5 h eine doppelt so große Phasenverschiebung der zeitlichen Lage der Melatoninsuppression erzielt, als mit monochromatischem Licht der Wellenlänge von 555 nm /91/.

Zeitzer et al. haben die Abhängigkeit der Melatoninsuppression und der Phasenverschiebung der circadianen Rhythmus in Abhängigkeit von der örtlichen Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut untersucht /146/. Dabei wurden Probanden mit einer Leuchtstofflampe neutrallichtweißer Lichtfarbe in einem Beleuchtungsstärkebereich zwischen 3 lx und 9100 lx über 6,5 h bestrahlt. In Abb. 2-12 sieht man für 3 lx, 106 lx und 9100 lx die Verschiebung der zeitlichen Lage der Melatoninsuppression.

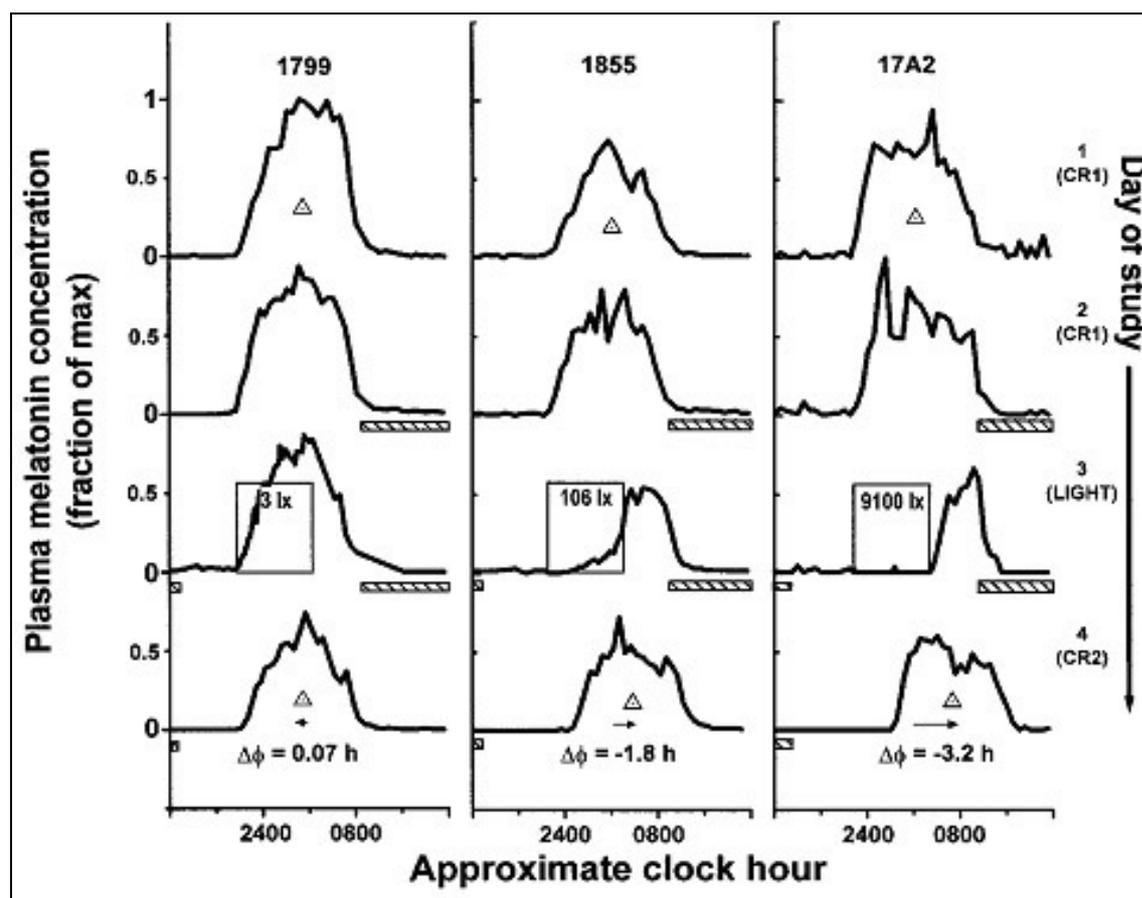


Abb. 2-12: Phasenverschiebung der circadian Rhythmus in Abhängigkeit von der horizontalen Beleuchtungsstärke nach /146/

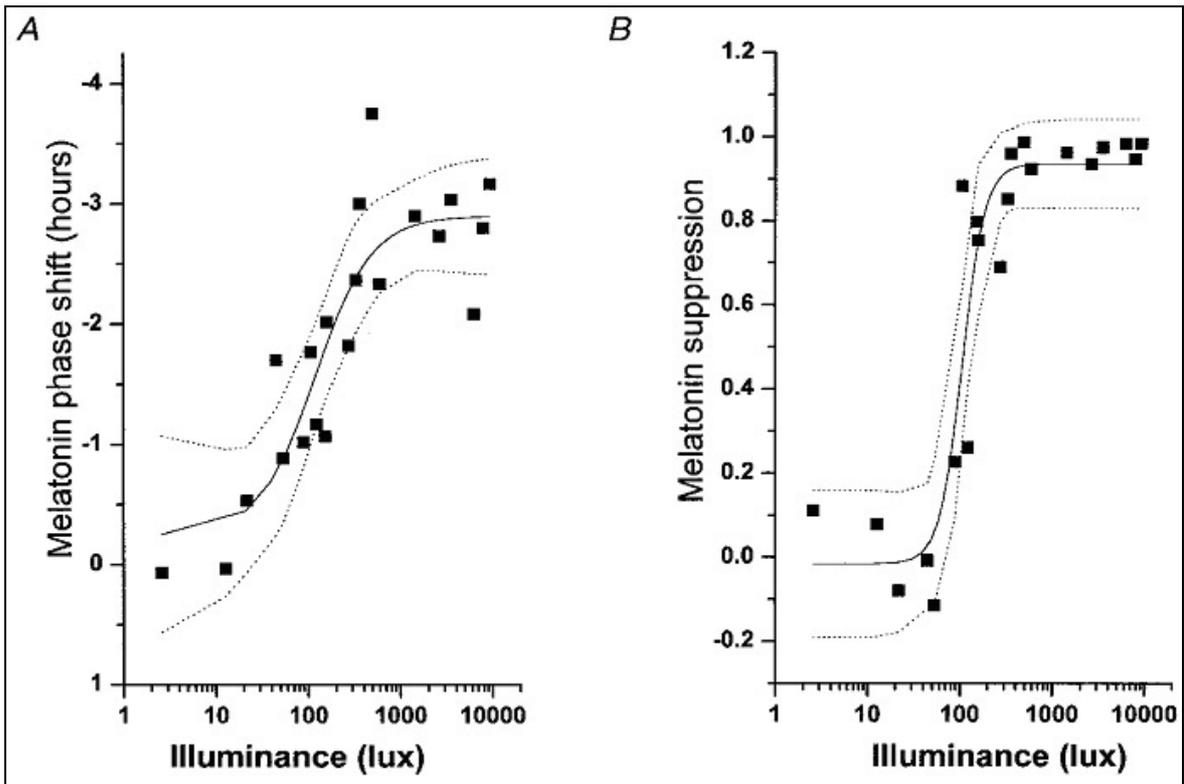


Abb. 2-13: Phasenverschiebung und Melatoninsuppression in Abhängigkeit von der horizontalen Beleuchtungsstärke nach /146/

Abb. 2-13 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen der horizontalen Beleuchtungsstärke und der dadurch bewirkten Phasenverschiebung (A) bzw. relativen Höhe der Melatoninsuppression (B). Die Sättigung der Verschiebung der zeitlichen Lage der Melatoninsuppression erfolgt bei einer Beleuchtungsstärke von ca. 550 lx. Die Sättigung der Melatoninsuppression wird bei 200 lx erreicht.

2.5 Referenzsonnenspektrum

Zur Bewertung der Wirksamkeit für die erwünschte Anwendung, für die gesundheitlichen Gefahren sowie zur Kennzeichnung von Bestrahlungsgeräten für Photo- und Lichttherapie sind spektrale Vergleiche der künstlichen Strahlung solcher Geräte mit natürlich auftretenden Strahlungsgrößen hilfreich. Für spektral selektive Prozesse wie die des UV-Erythems werden die Globalbestrahlungsstärke und ihre spektrale Zusammensetzung als Vergleichsgröße herangezogen. Für definierte Zustände des Himmels und konkrete Sonnenhöhenwinkel sind durch DIN und IEC spektrale Bestrahlungsstärken der Referenzsonne $E(\lambda)_{\text{ref}}$ definiert worden, die als Bewertungsgrundlage von künstlichen UV-Quellen dienen [38], [23].

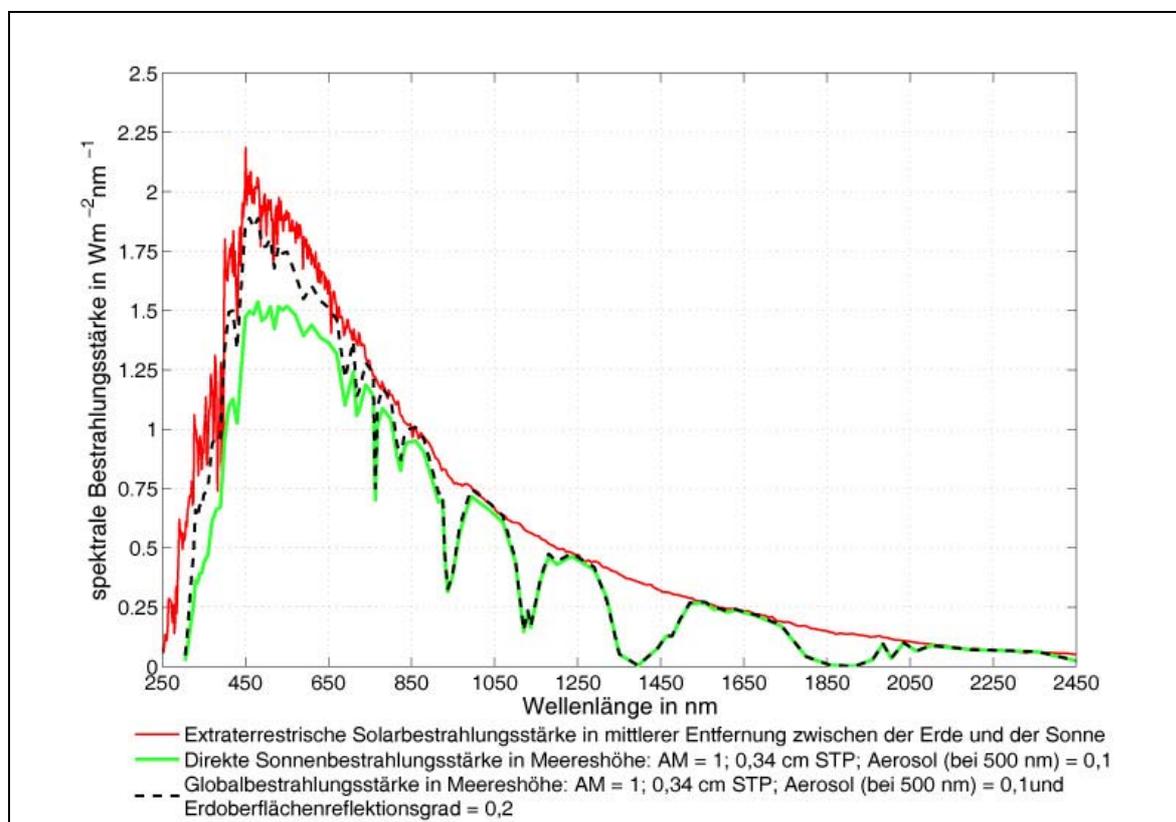


Abb. 2-14: Extraterrestrische Solarstrahlung sowie Global- und Solarbestrahlungsstärken in Meereshöhe nach IEC [23]

Für einen mittleren Abstand zwischen der Erde und der Sonne ($149,6 \cdot 10^6$ km) ergibt sich für die extraterrestrische Gesamtbestrahlungsstärke $E_0 = 1367 \text{ Wm}^{-2}$. Dieser Wert wird als die Solarkonstante bezeichnet. Die Solarstrahlung wird beim Durchgang durch die Atmosphäre durch Reflektionen, Absorption und Streuung in seinen spektralen Eigenschaften, räumlicher Verteilung und im Absolutwert verändert. Hierbei spielen die Rayleigh-Streuung an Luftmolekülen, die Abschwächung durch Aerosolen sowie Absorptionen

durch Wasserstoff-, Ozon- (O₃) und andere Gase eine Rolle. Die Globalstrahlung setzt sich aus den direkten und diffusen Anteilen der Solarstrahlung auf einer horizontalen Ebene zusammen, für sie gilt:

$$\frac{\partial E_G(\lambda)}{\partial \lambda} = \sin \gamma \cdot \frac{\partial E_{dir}(\lambda)}{\partial \lambda} + \frac{\partial E_{dif}(\lambda)}{\partial \lambda} \quad \text{Gl. 2-20}$$

Abb. 2-14 zeigt den spektralen Verlauf der extraterrestrischen Solarbestrahlung in einer mittleren Entfernung der Erde von der Sonne und der direkten Sonnen- sowie der Globalbestrahlungsstärke in Meereshöhe und für einen Höhenwinkel $\gamma = 90^\circ$ (am Äquator).

Chen /17/ und Grothmann /55/ geben zum Test von externen Sonnenschutzmitteln für den ultravioletten Spektralbereich spektrale Bestrahlungsstärken an, die natürlichen Verhältnissen der Sonneneinstrahlung nahe kommen und etwa im Bereich der internationalen und nationalen Empfehlungen liegen /38/. Die hier angenommene Referenzspektralverteilung im UV gilt für den senkrechten Strahlungsgang durch die Atmosphäre (relative Luftmasse $n = 1$; $\gamma = 90^\circ$), eine mittlere Ozonschichtdicke von $d_{O_3} = 3,2$ mm STP und für einen Trübungskoeffizienten $\beta = 0,06$, der bei sehr klaren Himmelszuständen mit geringer Trübung und großen Sichtweiten vorkommt. Die numerische Integration nach Gl. 2-8 ergibt für dieses definierte Referenzspektrum eine erythemwirksame Bestrahlungsstärke von 251 mWm^{-2} bzw. eine Bestrahlungsdauer zum Erreichen einer MED von 17 Minuten und als wirksame Bestrahlungsstärke für die Vitamin D₃-Photosynthese 426 mWm^{-2} .

Nach DIN wird das Verhältnis der durch ein UV-Bestrahlungsgerät erzeugten erythemwirksamen Bestrahlungsstärke $E_{er,Gerät}$ zur erythemwirksamen Globalbestrahlungsstärke an einem Referenz-Sonnentag als der Sonnenerythempfaktor f_{SE} bezeichnet /35/:

$$f_{SE} = \frac{E_{er,Gerät}}{E_{er,Gl}} \quad \text{Gl. 2-21}$$

Für die maximale erythemwirksame Bestrahlungsstärke der Globalstrahlung für den Sonnenhöhenwinkel von 90° wird dabei ein Wert von 300 mWm^{-2} angesetzt. In den Empfehlungen der Strahlenschutzkommission wird der Sonnenerythempfaktor mit SEF bezeichnet und der Maximalwert der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke der Referenzsonne mit 254 mWm^{-2} bzw. die äquivalente Bestrahlungsdauer zum Erreichen der MED mit 16 Minuten angegeben. Bei der Berechnung des Sonnenerythempfaktors wird als Maximalwert der erythemwirksamen Globalstrahlung eine Bestrahlungsstärke von 300 mWm^{-2} angesetzt.

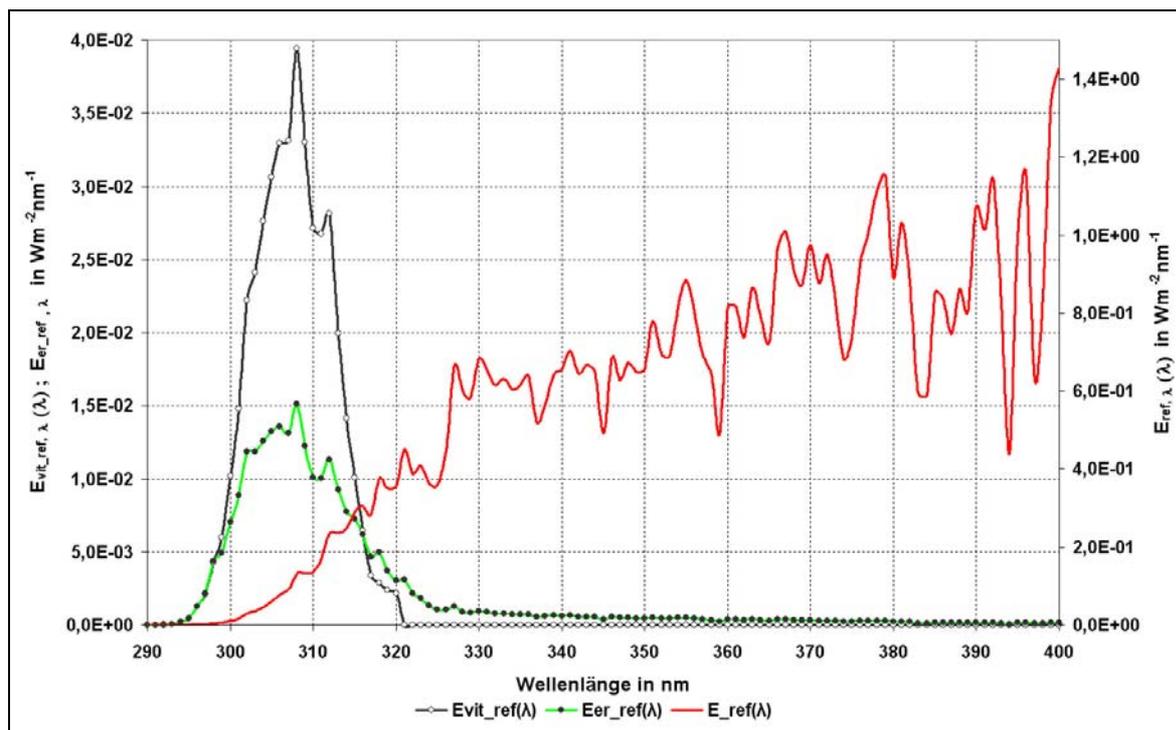


Abb. 2-15: Erythem- und Vitamin D₃-wirksamen Bestrahlungsstärken der Referenzspektralverteilung für UV nach DIN /38/

Die Ergebnisse der im Fachgebiet Lichttechnik vorgenommenen dauerhaften Messungen der Globalbestrahlungsstärke auf einer horizontalen Fläche zeigen, dass die erythemwirksame Strahlungsleistung der terrestrischen Solarstrahlung überwiegend in einem Spektralbereich von $295 \text{ nm} < \lambda < 330 \text{ nm}$ vorzufinden ist. Auf der Grundlage dieser Messdaten und der von der DIN angegebenen spektralen Bestrahlungsstärken für die Referenzsonne im UV kann man für verschiedene Höhenwinkel γ die erythemwirksamen Bestrahlungsstärken berechnen.

Tabelle 2-2: Wirksame Bestrahlungsstärken für die Bildung des UV-Erythem sowie für Vitamin D₃-Photosynthese zu verschiedenen Jahreszeiten in Berlin

Datum	21.03	21.06	21.09	21.12
Sonnenhöhenwinkel in °	38,5	60,9	37,5	14,9
$E_{er} (290\text{nm}-400\text{nm})$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$
$E_{er} (290\text{nm}-330\text{nm})$	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$
$E_{er} (<320 \text{ nm})$	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$8,5 \cdot 10^{-8}$
$E_{er} (>320 \text{ nm})$	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-7}$
$E_{vd} (290\text{nm}-400\text{nm})$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$8,1 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$

Theoretische Grundlagen

Tabelle 2-2 gibt eine Übersicht über die wirksamen Bestrahlungsstärken für das UV-Erythem, die dazugehörigen Schwellenbestrahlungszeiten sowie die zu verschiedenen Jahreszeiten zu erwartenden wirksamen Bestrahlungsstärken für die Vitamin D₃-Photosynthese in Berlin zu Mittagszeit. Die Abhängigkeit der spektralen erythemwirksamen Bestrahlungsstärke von dem Sonnenhöhenwinkel verdeutlicht Abb. 2-16.

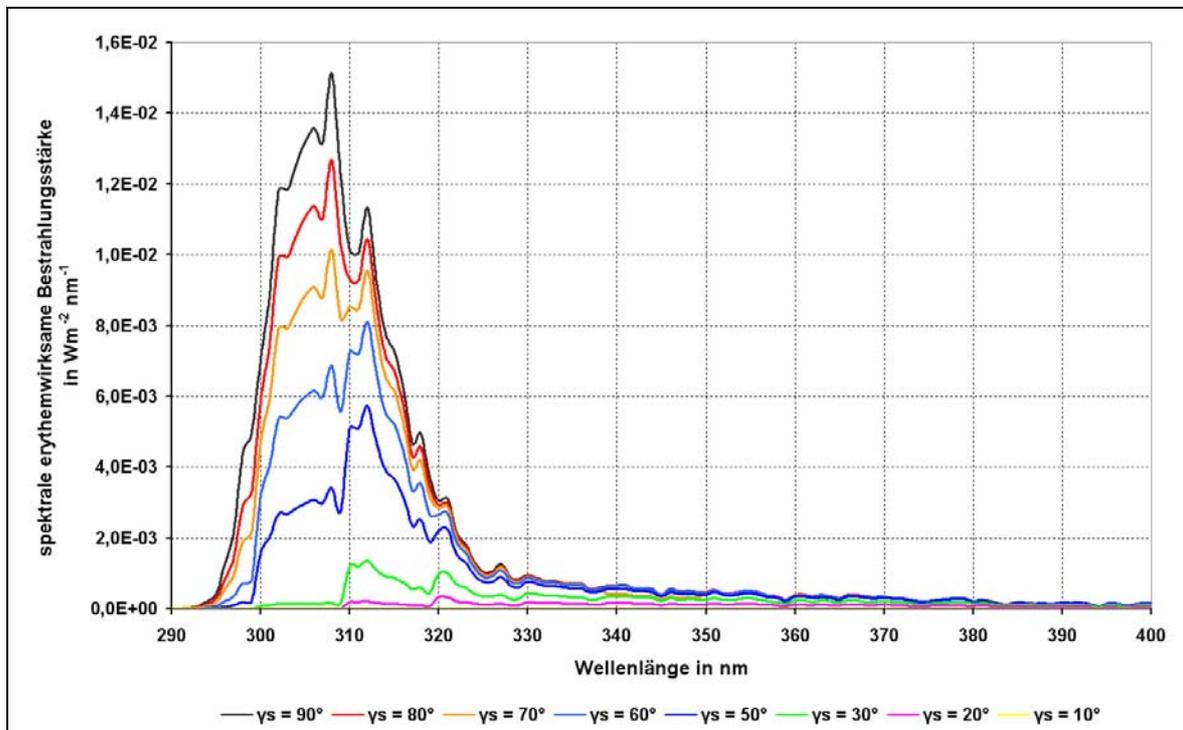


Abb. 2-16: Spektrale erythemwirksame Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit vom Sonnenhöhenwinkel in Berlin zu Mittagszeit

2.6 Klassifizierung von Bestrahlungsgeräten

2.6.1 UV-Bestrahlungsgeräte

Die Größe der Nutzfläche von Bestrahlungsgeräten für nichttherapeutische Zwecke erfolgt nach der Gleichmäßigkeitsforderung /35/:

$$g_2 = \frac{E_{biol,min}}{E_{biol,min}} \geq 0,4 \quad \text{Gl. 2-22}$$

Bei der Klassifizierung von UV-Bestrahlungsgeräten sind die erythemwirksamen Bestrahlungsstärken in UV-Teilspektren sowie der Vergleich dieser Werte mit der des natürlichen Referenzspektrums ausschlaggebend. Zur Einteilung von UV-Bestrahlungsgeräten sind Typenbezeichnungen nach DIN und IEC sowie Gruppenbezeichnungen nach SSK definiert. Dabei werden die erythemwirksamen Bestrahlungsstärken im UV-A ($320 \text{ nm} \leq \lambda \leq 400 \text{ nm}$) sowie im kürzerwelligen Spektrum ($\lambda < 320 \text{ nm}$ bei der DIN und IEC bzw. $280 \text{ nm} \leq \lambda \leq 320 \text{ nm}$ bei der SSK) zur Einteilung der Geräte herangezogen. Durch die langwelligen Anteile der UV-Bestrahlung mit $\lambda \geq 320 \text{ nm}$ wird die Wirksamkeit der UV-Bestrahlungsgeräte zusätzlich durch die Direktpigmentierung beschrieben, während die kürzerwelligen Anteile ($\lambda \leq 320 \text{ nm}$) der durch UV-Bestrahlungsgeräte bewirkten Bestrahlungsstärken die Erythemwirksamkeit bzw. verzögerte Pigmentierung verdeutlichen (vgl. Abb. 2-7). In allen genannten Normen wird bei der Klassifizierung auf die erythemwirksame Gesamtbestrahlungsstärke der Referenzsonne mit $E_{er,ref} = 0,3 \text{ Wm}^{-2}$ Bezug genommen. Nach der IEC werden UV-Bestrahlungsgeräte bis zu einer erythemwirksamen Gesamtbestrahlungsstärke vom Maximalwert der Referenzsonne und nach SSK bis zum 2-fachen dieses Wertes klassifiziert. Einen Überblick geben die Tabellen 2-5 und 2-6.

Tabelle 2-3: Grenzwerte der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke für DIN/ IEC-Typen

Typ nach		E_{er} in Wm^{-2}	
DIN	IEC	$\lambda \leq 320 \text{ nm}$	$320 \text{ nm} < \lambda \leq 400 \text{ nm}$
0	-	$< 0,0005$	$\leq 0,15$
1	1	$< 0,0005$	$> 0,15$
2	2	$0,0005 - 0,15$	$> 0,15$
3	3	$0,0005 - 0,15$	$\leq 0,15$
4	4	$> 0,15$	$\leq 0,15$
5	-	$> 0,15$	$> 0,15$

Tabelle 2-4: Definitionsbereiche und Grenzwerte der erythemwirksamen Bestrahlungsstärken nach RTS der SSK

Gruppe	E_{er} in Wm^{-2}		
	UV-B $280\text{ nm} \leq \lambda \leq 320\text{ nm}$	UV-A $320\text{ nm} \leq \lambda \leq 400\text{ nm}$	UV-A + UV-B $280\text{ nm} \leq \lambda \leq 400\text{ nm}$
Ia	$< 0,0005$	$\leq 0,15$	$< 0,1505$
Ib	$< 0,0005$	$0,15 - 0,2995$	$\leq 0,30$
Ic	$0,0005 - 0,15$	$0,15 - 0,2995$	$\leq 0,30$
Id	$0,0005 - 0,15$	$\leq 0,15$	$\leq 0,30$
II	$\leq 0,6$	$\leq 0,15$	$\leq 0,60$

Die Gruppen I und II nach SSK unterscheiden sich nach ihrer Erythemwirksamkeit dadurch, dass sie eine erythemwirksame Bestrahlungsstärke kleiner bzw. maximal dem doppelten Wert der Referenzsonne besitzen. Typischerweise gehören UV-A-Bestrahlungsgeräte mit Hochdruckentladungslampen, je nach den spektralen Eigenschaften der verwendeten Filter zur Gruppe Ia, Ib oder Ic bzw. Typen 0 - 3 Solarien mit Leuchtstofflampensystemen werden in Abhängigkeit von den spektralen Eigenschaften der eingesetzten Leuchtstoffe der Gruppe Id oder II bzw. den Typen 4 oder 5 zugeordnet. Nach DIN wird keine obere Grenze für die erythemwirksame Gesamtbestrahlungsstärke definiert.

Auf die Klassifizierungen der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Lichttherapiegeräte wird im Abschnitt 4.4 und der IR-Bestrahlungsgeräte im Abschnitt 4.5 eingegangen.

3. Messtechnik

Um Aussagen hinsichtlich des Dosis-Wirkungsprinzips in der Photo- und Lichttherapie zu treffen, interessiert die exakte Erfassung der angewandten Strahlungsanteile durch geeignete Messanordnungen. In der UV-, VIS- und IR-Therapie gilt die durch eine Strahlungsquelle in einer vorgegebenen Richtung und dem Abstand der Anwendungsebene erzielte wirksame Bestrahlungsstärke als die wesentliche Strahlungsgröße. Zur Beschreibung und Kennzeichnung von Strahlungs- bzw. Lichtquellen werden die durch diese in sämtliche Richtungen abgegebene Strahlungsleistung Φ_e bzw. Lichtstrom Φ_v herangezogen. Die Richtungsabhängigkeiten können durch die räumliche Erfassung von Strahlungsstärke I_e bzw. Lichtstärke I_v ermittelt werden.

Weiterhin müssen für die Bewertung von Geräten u. a. integrale Messgrößen wie Gesamtbestrahlungsstärke E_e , Leuchtdichte L_v und farbmétrische Parameter (T_{cp} , R_a , x , y) erfasst werden. Zusätzlich sind zeitliche Veränderung von Licht und Strahlung zu ermitteln.

3.1 Spektralradiometrie

Für spektralradiometrische Untersuchungen an UV-Strahlungsquellen und an UV-Bestrahlungsgeräten wurde das hochauflösende Spektralradiometer des Fachgebiets Lichttechnik benutzt.

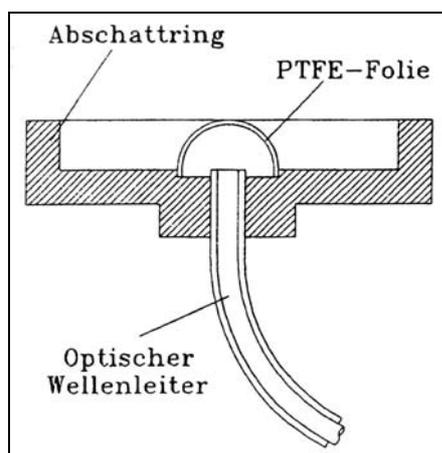


Abb. 3-1: Eingangsoptik des UV-Spektralradiometers

Als Eingangsoptik wird ein Empfängerkopf bestehend aus einem als Kugelkalotte geformten Diffusor aus PTFE-Folie zur kosinusgetreuen Bewertung der einfallenden Strahlung und einem Abschattring zur Verhinderung einer Überbewertung von Strahlung aus großen Einfallswinkeln benutzt (siehe Abb. 3-1). Die einfallende Strahlung wird dann über einen

optischen Wellenleiter (OWL) bestehend aus Quarz an den Eintrittsspalt zugeführt. Dieses Material eignet sich im gesamten UV-Spektralgebiet im Gegensatz zu anderen Gläsern wegen guter Transmissionseigenschaften. Die Faserbündel des OWLs sind in einem geringen Abstand hinter dem Krümmungsmittelpunkt der Kugelfläche kreisförmig angeordnet. Zur angepassten Ausleuchtung des Eintrittsspalt wurde als Ausgangsquerschnitt des OWLs eine Rechteckform (1 mm x 10 mm) gewählt.

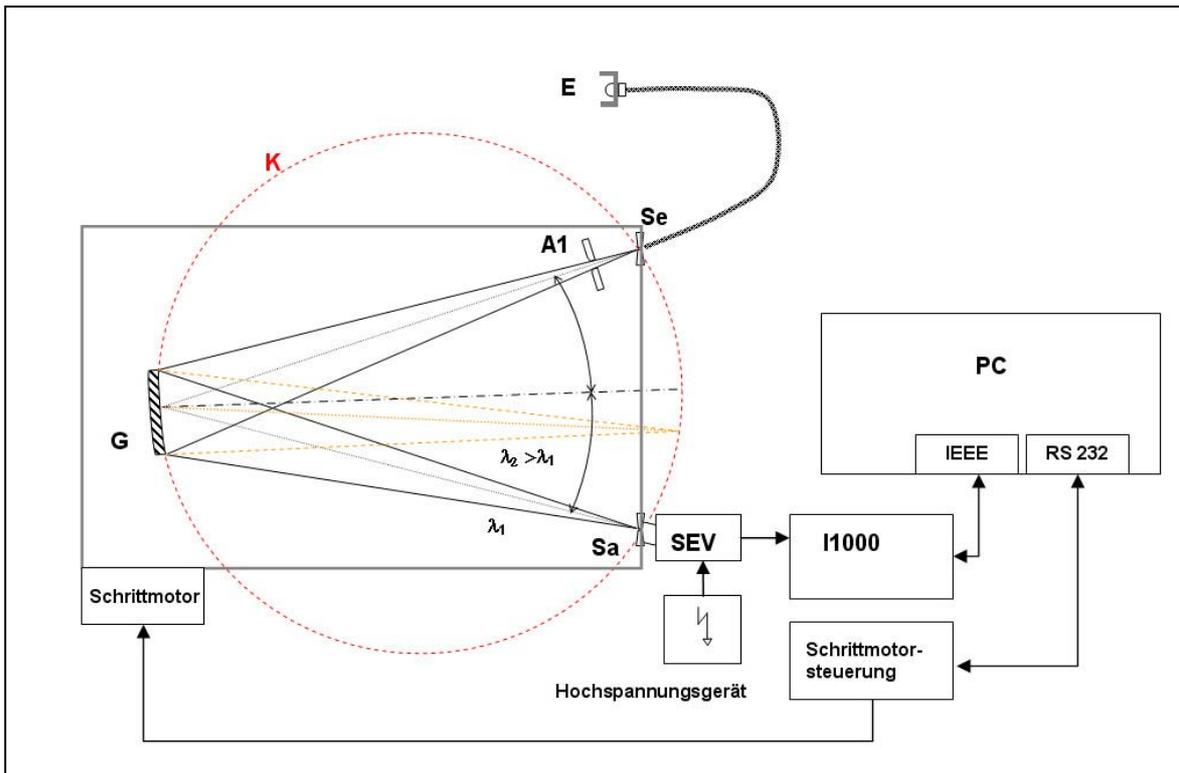


Abb. 3-2: Aufbau des stationären Einfachmonochromators hoher Auflösung

Der Einfachmonochromator (Typ McPherson Modell 225 /68/) besitzt als dispersives Element ein Konkavgitter (G) mit der Brennweite $2f = 0,995 \text{ m}$, 600 Linien/ mm und einer wirksamen Fläche von $56 \times 96 \text{ mm}^2$. Das einfallende Strahlenbündel wird durch eine Blende (A1) hinter dem Eingangsspalt so begrenzt, dass das Gitter voll ausgeleuchtet ist und die Streustrahlung reduziert wird. Der Ort der Abbildung der an dem Konkavgitter gebeugten und reflektierten Strahlung bewegt sich in Abhängigkeit von der Wellenlänge auf einem Rowland-Kreis (K). Deshalb wird zur Abbildung eines Spektralbereichs $\Delta\lambda$ neben der Drehung des Gitters auch eine Translationsbewegung notwendig, so dass sich der Austrittsspalt (S_a) des Monochromators auf diesem Kreis befindet und bei geometrisch festem Austrittsspalt alle Wellenlängen durch die Translationsbewegung des Gittertisches auf den Austrittsspalt abgebildet werden (siehe Abb. 3-2). Die reziproke Lineardispersion $\Delta\lambda / \Delta x$ beschreibt den Wellenlängenbereich, der über einen Einheitsabstand in

der Brennebene des Monochromators ausgeweitet wird und beträgt bei dem verwendeten Gitter 1,67 nm/ mm.

Der einzustellende Wert des Eintritts- bzw. Austrittspaltes hängt nach /116/ von der Halbwertbreite des Durchlassprofils ab:

$$\Delta\lambda_H = \frac{d\lambda}{dx_a} \cdot \max\{b_{sa}, \Delta X_a\} \quad \text{Gl. 3-1}$$

Hierbei sind $\frac{d\lambda}{dx_a}$ die reziproke Lineardispersion des Monochromators, b_{sa} die Breite des Austrittspaltes, ΔX_a die Breite des monochromatischen Bildes des Eintrittspaltes in der Ebene des Austrittspaltes. Mit der Gl.3-1 lässt sich für die übliche Messschrittweite von 1 nm die feste, einzustellende Breite für den Eintritts- und somit auch für den Austrittspalt unter der Voraussetzung $\Delta X_a = b_{sa}$ berechnen; der Wert beträgt 0,6 mm. Für die maximale Spaltbreite ergibt sich für den benutzten Monochromator eine spektrale Bandbreite $\Delta\lambda_H$ von 3,3 nm. Der Eintritts- und Austrittspalt (s_e, s_a) sind durch Mikrometerschrauben zwischen 0 μm bis 2.000 μm mit einer Auflösung von 10 μm per Stellknopf variierbar. Für diese minimal einzustellende Spaltbreite von 10 μm erhält man die minimale Halbwertsbreite $\Delta\lambda_{H,\min}$ des UV-Spektralradiometers von 0,1 nm.

An den Austrittspalt des Monochromators schließt als Empfänger ein Sekunderelektronenvervielfacher (SEV) vom Typ EMR 541D mit 14 stufiger Verstärkung und einer wirksamen Kathodenfläche von 5,1 cm^2 an. Der Dunkelstrom wird vor jeder Messung registriert und durch das Messprogramm rechnerisch von dem Signalwert subtrahiert Als geeigneter Arbeitspunkt des SEV erwies sich eine Versorgungsspannung der Kathode von 3,6 kV. Zur Vermeidung des Dunkelstromdrifts während eines Messzyklus wird der SEV bei dieser Spannung über einen Zeitraum von mindestens 1 h abgedunkelt betrieben. Der Drift kann dann als vernachlässigbar angenommen werden. Das Empfindlichkeitsmaximum des Empfängers liegt bei 250 nm. Die am SEV durch die einfallende Strahlung erzeugten Photoströme werden anschließend von einem Photostrommessgerät (Fa. LMT Typ Iph 1000) erfasst. Der nutzbare Messbereich dieses Gerätes liegt mit einer relativen Genauigkeit von $5 \cdot 10^{-4}$ zwischen $1,5 \cdot 10^{-2}$ A und $1 \cdot 10^{-10}$ A. Zur Vermeidung des Offsetstromdriftes ist auch dieses Gerät bis zur Konstanz vor einer Messung zu betreiben. Die Ausgabe des Messwertes sowie die Übernahme des Messbereiches an bzw. von einem IBM-kompatiblen PC erfolgt über eine IEEE-Schnittstelle.

Die Einstellung der Wellenlänge wird durch einen rechnergesteuerten Schrittmotor (Synchronmotor) mit einem Wellenlängenvorschub wählbar von $0,05 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$ bis $200 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$ und einer Umsetzung von 1:50 vorgenommen. Die Wellenlängenkalibrierung und Bestimmung der Ausgangsposition des Gittertisches erfolgt durch die Messung einer Hg-Spektrallampe bei kleiner Schrittweite ($\Delta\lambda = 0,1 \text{ nm}$). Als günstig erweisen sich hierbei die Hg-Emmissionsmaxima bei $253,65 \text{ nm}$ bzw. der Tripel bei $365 \text{ nm} - 366 \text{ nm}$.

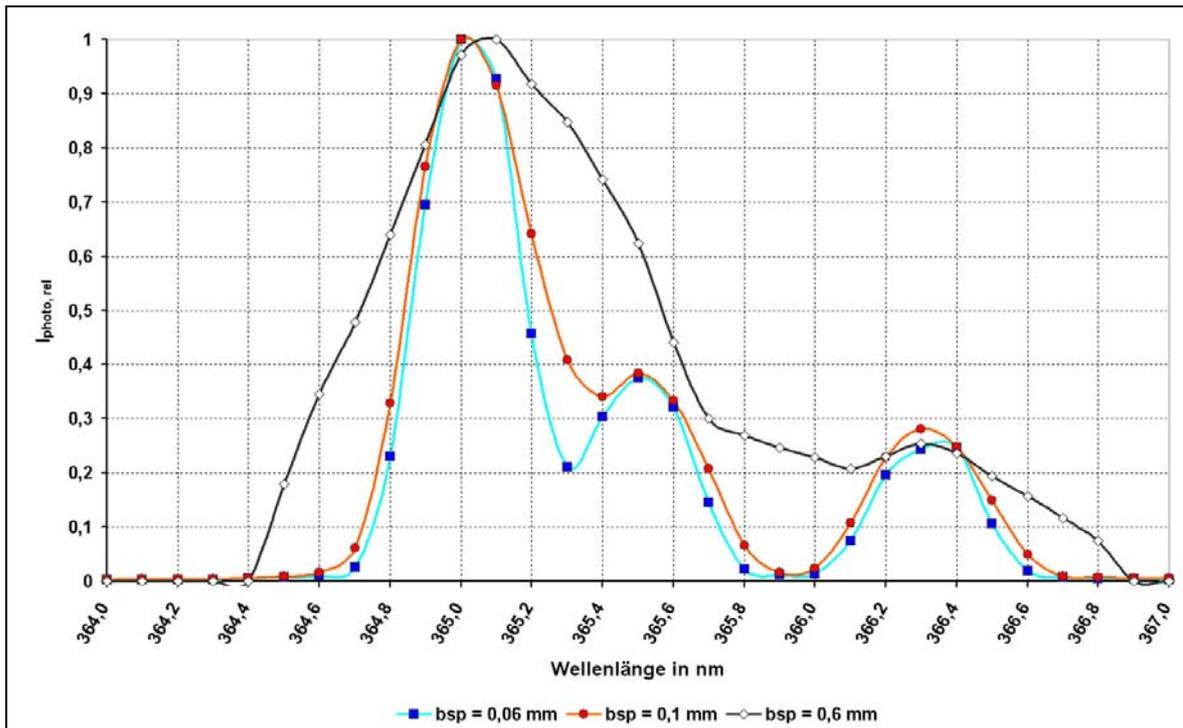


Abb. 3-3: Auflösung der Hg-Liniengruppe 365 – 366 nm am UV-Spektralradiometer

In Abb. 3-3 sind die relativen Photoströme, die an einer Hg-Spektrallampe bei Variation der Aus- und Eintrittsspaltbreiten ermittelt wurden, in Abhängigkeit von der Wellenlänge dargestellt.

Für die spektralradiometrische Absolutkalibrierung nach dem Substitutionsverfahren wird eine Strahlungsquelle (Normallampe) benötigt, deren spektrale Bestrahlungsstärke $E_{\lambda, N}(\lambda)$ in einer vorgegebenen Richtung und Entfernung zwischen der Messebene und der Strahlungsquelle bekannt ist. Dabei werden nacheinander die am Spektralradiometer gemessenen Werte der Normallampe $M_N(\lambda)$ - unter definierten geometrischen und elektrischen Kalibrierbedingungen- und die der zu messenden Strahlungsquelle $M_x(\lambda)$ aufgenommen. Die absolute spektrale Bestrahlungsstärke der zu messenden Lampe $E_{\lambda, N}(\lambda)$ lässt sich dann berechnen zu:

$$E_{\lambda,x}(\lambda) = \frac{M_x(\lambda)}{M_N(\lambda)} \cdot E_{\lambda,N}(\lambda)$$

Zur Absolutkalibrierung der spektralen Bestrahlungsstärke wurde ein Halogenglühlampennormal (Fa. Osram, Typ Halogen Bellaphot, 800 W) benutzt, das als Arbeitsnormal des Fachgebiets nach Vergleich mit einem PTB-Normal genutzt wird. Die Werte der spektralen Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,N}(\lambda)$ sind für den Spektralbereich $250 \text{ nm} \leq \lambda \leq 800 \text{ nm}$ auf dem Kalibrierprotokoll aufgeführt und gelten für folgende Kalibrierbedingungen:

- Gleichstrombetrieb der Normallampe mit $I = 3,470 \text{ A}$
- Lampenspannung $214,5 \text{ V} < U < 214,4 \text{ V}$
- Abstand zwischen der Messebene und der Strahlungsquelle bei senkrechter Halterung $d = 700 \text{ mm}$

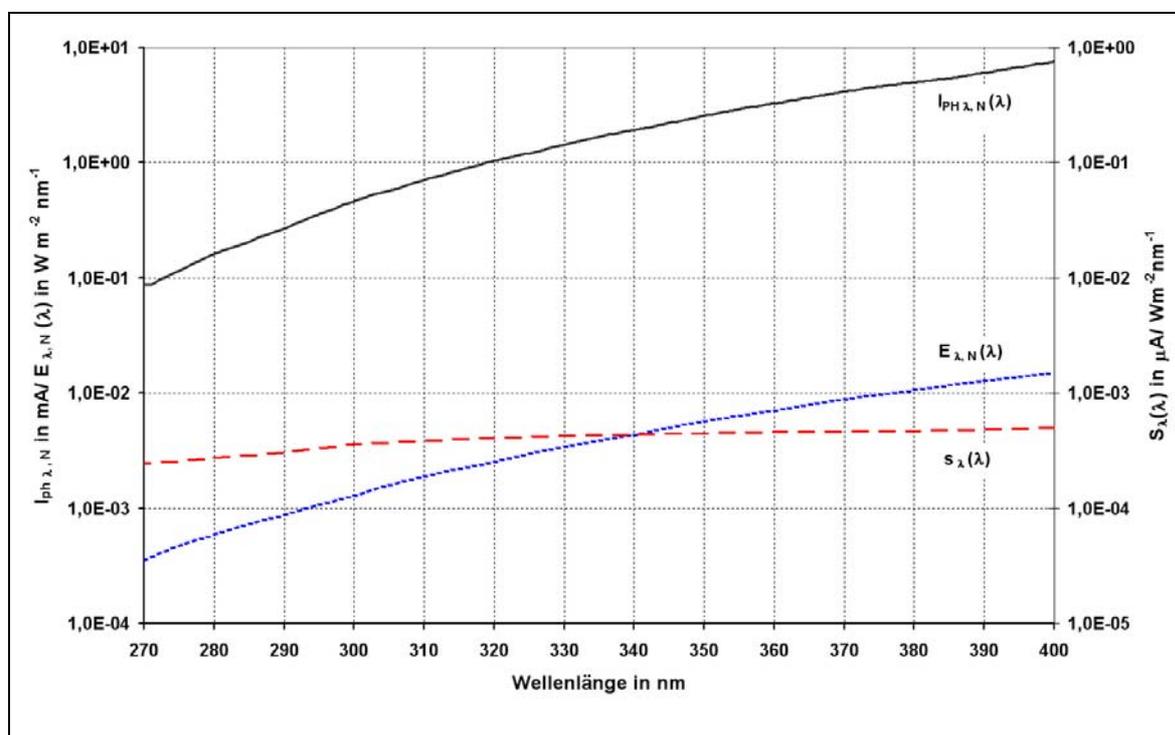


Abb. 3-4: Messwerte zur Ermittlung der spektralen Empfindlichkeit des UV-Spektralradiometers

Die spektrale Empfindlichkeit der Apparatur lässt sich aus dem Verhältnis des Photostroms $I_{ph,\lambda,N}(\lambda)$, der bei der Bestrahlung unter Kalibrierbedingungen gemessen wird, und der bekannten spektralen Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,N}(\lambda)$ hinreichend genau bestimmen:

$$s(\lambda) = \frac{I_{ph_{\lambda,N}}(\lambda) \cdot d\lambda}{E_{\lambda,N}(\lambda) \cdot d\lambda} \text{ in } \frac{\mu A}{Wm^{-2}nm^{-1}} \quad \text{Gl. 3-2}$$

Die Ergebnisse einer solchen Kalibrierung nach dem Substitutionsverfahren sind in Abb. 3-4 dargestellt. Falls die gemessenen Signale durch die Normallampe zu klein sind, kann zur Verbesserung des Störabstandes das Nutzsignal durch die Wahl eines kleineren Abstandes zwischen der Messebene und der Empfängerfläche erhöht werden. Üblicherweise wird dann aus beiden Messungen bei Strahlungsmaxima ein Faktor errechnet, der zur Gewichtung des Nutzsignals unter Kalibrierbedingungen herangezogen wird. Eine eingehende Betrachtung von Strahlungsnormalen ist in /73/ zu finden.

3.2 Messung der UV-Gesamtstrahlungsleistung

Zur Bestimmung der UV-Gesamtstrahlungsleistung Φ_{UV} werden die von einer Strahlungsquelle ausgehenden winkelabhängigen UV-Strahlstärken bestimmt. Die Integration der gemessenen Strahlstärken nach dem Spiralphotometerprinzip über den gesamten Raumwinkel 4π liefert dann die Gesamtstrahlungsleistung. Diese Methode basiert auf der Nutzung eines Strahlungsempfängers bekannter Empfindlichkeit, der die gewünschten Spektralbereiche erfasst. Diese können z. B. UV-A, UV-B, UV-C oder aktinische UV- Bestrahlungsstärken wie E_{er} , E_{VIT} u. a. sein. Bei der Messung mit dem Spiralradiometer lässt sich die Strahlungsleistung einer Strahlungsquelle durch Integration der Bestrahlungsstärke auf einer um die Quelle gelegten Kugelfläche bestimmen.

$$\Phi_e = \int_{A_2} E_e dA_2 = r^2 \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\vartheta=0}^{\pi} E_e(\vartheta, \varphi) \cdot \sin \vartheta d\vartheta d\varphi = \int_{4\pi} I_e d\Omega \quad \text{Gl. 3-3}$$

Dabei ist ϑ der Höhenwinkel und φ der Azimutwinkel; der Ursprung des sphärischen Koordinatensystems liegt im Zentrum der Strahlungsquelle.

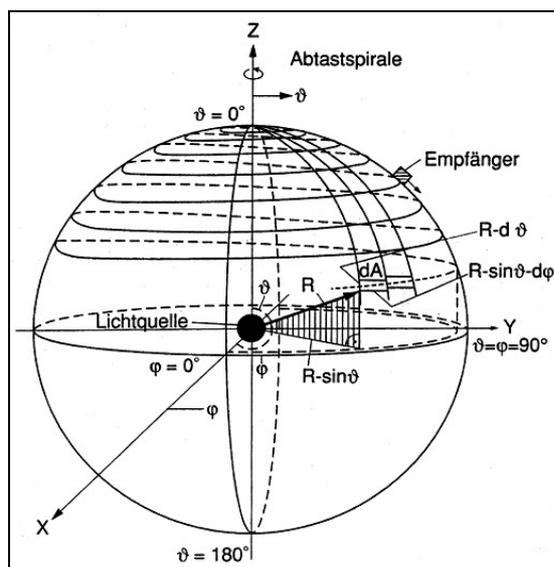


Abb. 3-5: Prinzip der automatischen Integration der Strahlungsleistung

Zur praktischen Ausführung dieser Integration wird nach /96/ ein an einem Dreharm befestigter Radiometermeterkopf mit konstanter Geschwindigkeit um eine horizontale Achse um den Winkel ϑ ($0^\circ - 180^\circ$) geschwenkt, während gleichzeitig die Strahlungsquelle mit konstanter Geschwindigkeit um eine vertikale Achse rotiert. Aus diesen beiden simultanen Rotationen resultiert dann eine spiralförmige Abtastung der Bestrahlungsstärke auf einer Kugeloberfläche durch den Empfänger, wenn nur die Drehgeschwindigkeit der Strah-

lungsquelle (damit wird φ festgelegt) wesentlich größer als die des Empfängers (damit wird ϑ festgelegt) ist (siehe Abb. 3-5).

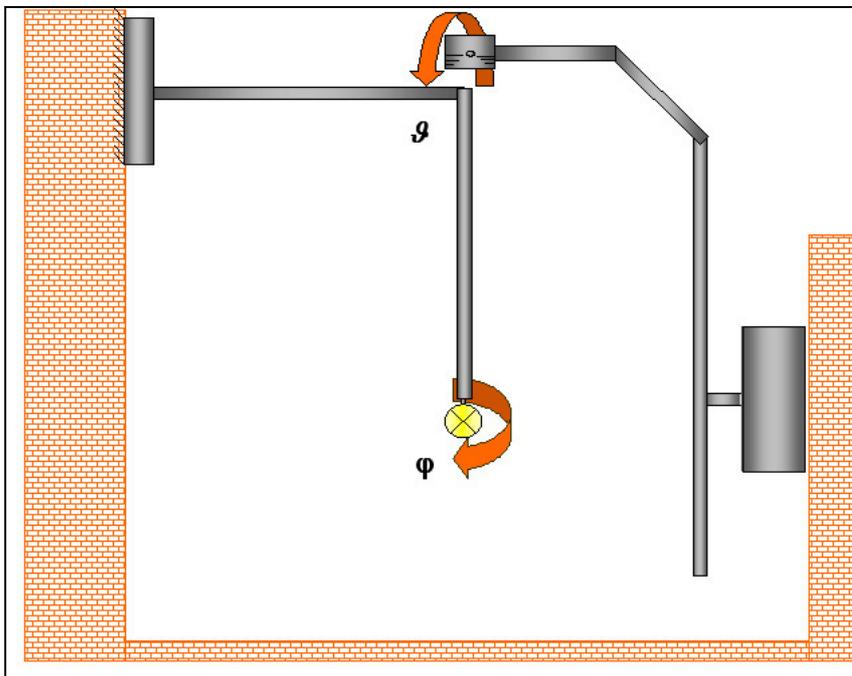


Abb. 3-6: Mechanischer Aufbau des Spiralradiometers

Das Spiralradiometer benutzt zur Messung der UV-Bestrahlungsstärken Messempfänger, deren relative spektrale Empfindlichkeit $s(\lambda)_{\text{rel}}$ einer gewünschten Bewertungsfunktion entspricht; die Kalibrierung dieser Empfänger erfolgt zuvor durch Vergleich mit einem Empfänger bekannter Empfindlichkeit. Im vorliegenden Fall werden drei spektral angepasste Empfänger für die integralen Bestrahlungsstärken $E_{\text{UV-A}}$, $E_{\text{UV-B}}$ und $E_{\text{UV-C}}$ eingesetzt. Zusätzlich werden aktinische Strahlungsgrößen wie die erythemwirksame Bestrahlungsstärke E_{er} und die Beleuchtungsstärke E_{v} gemessen. Nach der oben beschriebenen Methode lassen sich dann durch Integration dieser Messwerte der Lichtstrom, die Gesamtstrahlungsleistungen $\Phi_{\text{UV-A}}$, $\Phi_{\text{UV-B}}$, $\Phi_{\text{UV-C}}$ und die erythemwirksame Strahlungsleistung Φ_{er} ermitteln.

Eine Überprüfung der Spiralradiometer-Methode kann auch über das Verhältnis von Strahlungsleistung und Lichtstrom erfolgen, d. h. durch einen Anschluss an die Absolutskala der Photometrie. Hierbei wird angesetzt, dass bei Strahlungsquellen, deren relative spektrale Verteilung der Strahlungsleistung nicht richtungsabhängig ist, das Verhältnis zwischen der Beleuchtungsstärke und dem Lichtstrom proportional dem Verhältnis zwischen der Bestrahlungsstärke und der Strahlungsleistung in einem vorgegebenen Spektralbereich ist.

Mit der UV-Bestrahlungsstärke $E_{UV} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e\lambda}(\lambda) d\lambda$, Gl. 3-4

der Beleuchtungsstärke $E_V = K_m \int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} E_{e\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$, Gl. 3-5

und dem Lichtstrom Φ_V in lm ergibt sich das Verhältnis:

$$\frac{\Phi_{UV}}{\Phi_V} = \frac{E_{UV}}{E_V}$$

folgt damit für die Strahlungsleistung:

$$\Phi_{UV} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e\lambda}(\lambda) d\lambda}{E_V} \cdot \Phi_V$$
 Gl. 3-6

Die Messung der Beleuchtungsstärke erfolgt durch einen $V(\lambda)$ -angepassten Empfänger unter Beibehaltung der Messbedingungen für die Bestrahlungsstärkemessung.

3.2.1 Messergebnisse

Zur Kalibrierung des Spiralradiometers über die photometrische Skala eignen sich besonders Leuchtstofflampen. Neben Leuchtstofflampen für Solarien mit einer elektrischen Leistung von 100 W wurden Messungen an 800 W-Halogenglühlampen und an Leuchtstofflampen mit UV-Anteilen für die Innenraumbeleuchtung (36 W, Spektralverteilung) durchgeführt.

Tabelle 3-1: Ergebnisse der photometrischen Messungen

Lampe	E_V in lx	Φ in lm	η_v in lm/ W
LL-Solarium	253	704	7
LL-Innenbeleuchtung	1095	1511	43
Halogenglühlampe	5540	17466	23

In Tabelle 3-1 sind die Messergebnisse des Lichtstroms Φ_V , der Beleuchtungsstärke E_V dargestellt. Die sich aus dem Lichtstrom und der Lampenleistung errechnende Lichtausbeute η_v ist bei Leuchtstofflampen für Innenraumbeleuchtung mit 43 lm/ W am höchsten und bei Leuchtstofflampen für Solarien erwartungsgemäß mit 7 lm/ W am niedrigsten.

Tabelle 3-2: Ergebnisse der radiometrischen Messungen

Lampe	E_{UV-A} in W/ m ²	Φ_{UV-A} in W	η_{UV-A} in %
LL-Solarium	4,9	14,34	14
LL-Innenbeleuchtung	0,415	0,596	2
Halogenglühlampe	0,46	1,35	0,2

Tabelle 3-3: Vergleich der Ergebnisse der UV-Strahlungsleistungsmessungen

Lampe	Φ_{UV-A} in W	$\Phi_{UV-A, photo}$ in W	rel. Abweichung in %
LL-Solarium	14,34	13,63	+ 5
LL-Innenbeleuchtung	0,596	0,573	+ 4
Halogenglühlampe	1,35	1,44	- 6

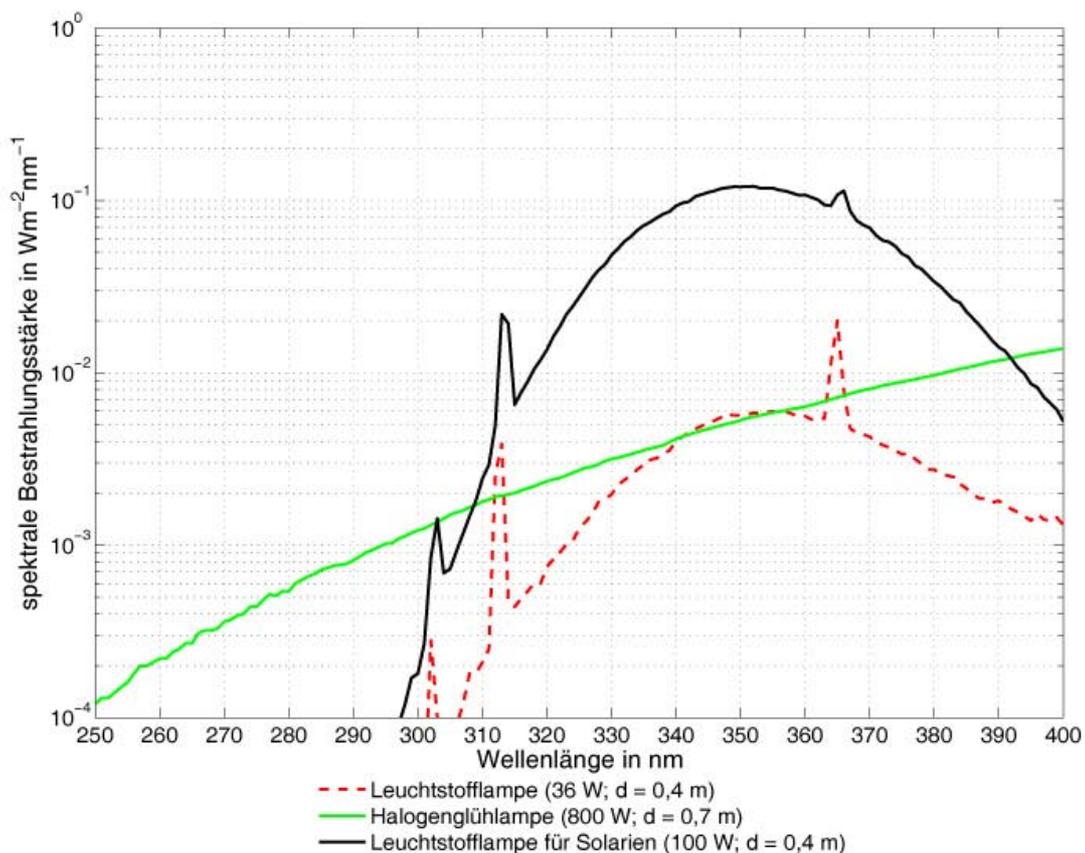


Abb. 3-7: Spektrale Bestrahlungsstärke der untersuchten Lampen

Die Ergebnisse für die radiometrischen Messungen sind in Tabelle 3-2 zusammengestellt. Die UV-A-Ausbeute η_{UV-A} , die sich aus der Lampenleistung und der Gesamtstrahlungsleistung im UV-A berechnet, ist bei Leuchtstofflampen für Solarien etwa 14 % (siehe Abb. 3-7). Sie beträgt bei Leuchtstofflampen mit UV-Anteilen für Innenraumbeleuchtung 2 %, während die gemessene Halogenglühlampe mit 0,2 % eine geringe UV-A-Ausbeute aufweist.

Der Vergleich der am Spiralradiometer gemessenen Strahlungsleistungen Φ_{UV-A} im UV-A mit den aus den Messergebnissen der Bestrahlungsstärke E_{UV-A} im UV-A, dem Lichtstrom Φ_v und der Beleuchtungsstärke E_v nach den im Kapitel 3.2 ermittelten Werten für die Strahlungsleistung $\Phi_{UV-A, photo}$ ist in Tabelle 3-3 wiedergegeben. Mit relativen Messabweichungen von kleiner als $|\pm 6 \text{ \%}|$ ist die Messung der UV-Strahlungsleistung am Spiralradiometer damit als zuverlässig anzusehen.

3.3 Photometrie

Messungen von spektralen Strahlungsgrößen im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums sind für die Berechnung der entsprechenden lichttechnischen Größen von grundlegender Bedeutung. Der Zusammenhang zwischen den spektralen Strahlungsgrößen $X_{e,\lambda}$ und den lichttechnischen Größen X wird durch die spektrale Gewichtung mit der Hellempfindlichkeit des Auges $V(\lambda)$ und dem Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalents K_m festgelegt:

$$X = K_m \cdot \int_{380nm}^{780nm} X_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$$

Dabei beträgt der Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalents K_m 689 lmW^{-1} ; wobei das Maximum von $V(\lambda)$ bei 555 nm liegt.

3.3.1 Messung des Lichtstroms am Spiralphotometer

Der Lichtstrom einer Lichtquelle lässt sich am Spiralphotometer durch die Integration der Beleuchtungsstärken auf einer um die Lichtquelle gelegten Kugelfläche bestimmen. Dabei gilt:

$$\Phi_v = \int_{A_2} E_v dA_2 = r^2 \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\nu=0}^{\pi} E_v(\nu, \varphi) \cdot \sin \nu d\nu d\varphi = \int_{4\pi} I_v d\Omega \quad \text{Gl. 3-7}$$

Die praktische Ausführung dieser Integration wird dadurch verwirklicht, dass der an einem Dreharm befestigter, $V(\lambda)$ -angepasster Empfänger mit konstanter Geschwindigkeit um eine horizontale Achse um den Winkel ϑ ($0^\circ \dots 180^\circ$) geschwenkt wird, während gleich-

zeitig die Lichtquelle (5) mit konstanter Geschwindigkeit um eine vertikale Achse φ rotiert. Aus diesen beiden simultanen Rotationen resultiert dann eine spiralförmige Abtastung der Beleuchtungsstärken auf einer Kugeloberfläche durch die Empfänger, wenn nur die Winkelgeschwindigkeit $\omega_\varphi \gg \omega_v$ ist.

Dabei wird die Beleuchtungsstärke durch den photo-elektronischen Empfänger analog erfasst und in eine proportionale Spannung umgewandelt. Ein Spannungsfrequenzwandler setzt diese Spannung in eine zu ihr streng proportionale Impulsfolge um. Die Impulse werden während des durch die Drehung des Empfängers von $v = 0^\circ$ bis $v = 180^\circ$ definierten Zeitintervalls mit einem elektronischen Zähler gezählt. Die Summe liefert dann die Integration der gemessenen Beleuchtungsstärken zur Berechnung des Lichtstroms Φ_v . Nach dieser Methode kann zudem die örtliche Verteilung des Lichtstroms durch die Angabe der Lichtstärken I_v in definierten Raumwinkeln ermittelt werden. Ein weiterer Vorteil des Messverfahrens ist, daß die Lichtquelle während der Messung in ihrer Brennlage nicht verändert wird und somit die Messung des Lichtstroms von brennlageabhängigen Lichtquellen ermöglicht wird.

3.3.2 Messung der spektralen Bestrahlungsstärke im UV und VIS

Zur Bewertung von Lichttherapiegeräten hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zur Melatonin-suppression werden spektrale Bestrahlungsstärkemesswerte im VIS benötigt. Messwerte der spektralen Bestrahlungsstärke eignen sich auch zur numerischen Ermittlung von farbmtrischen Kenngrößen wie die Farbwertanteile (x , y), ähnlichste Farbtemperatur (T_{cp}) und der allgemeinen sowie der speziellen Farbwiedergabeindizes.

Spektralradiometrische Feldmessungen sowie Verteilungsfunktionen im sichtbaren Spektrum wurden Mithilfe eines transportablen, thermostatisierten Doppelmonochromatorspektralradiometers (Typ. OL 754, Fa. Optronics Laboratories) durchgeführt. Der nutzbare Wellenlängenbereich des Spektralradiometers mit einer Doppelmonochromatoranordnung bestehend aus zwei Konkavgittern (siehe Abb. 3-8) liegt zwischen 200 nm und 800 nm. Als Eingangsoptik dient eine Ulbrichtsche Kugel mit einem Aufsatz zur Kosinuskorrektur. Die durch die Eingangsoptik erfasste optische Strahlung kann je nach Messaufgabe über einen optischen Wellenleiter (Quarz) oder direkt an den Doppelmonochromator zugeführt werden. Der an den Ausgangsspalt direkt anschließende Sekundärelektronenmultiplikator mit $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ -beschichteten Photokathoden(S 20) besitzt bei einer

Wellenlänge von $\lambda = 390 \text{ nm}$ seine maximale Quantenausbeute. Die minimale Halbwertsbreite $\Delta\lambda_{H,\min}$ des transportablen Spektralradiometers beträgt 1 nm .

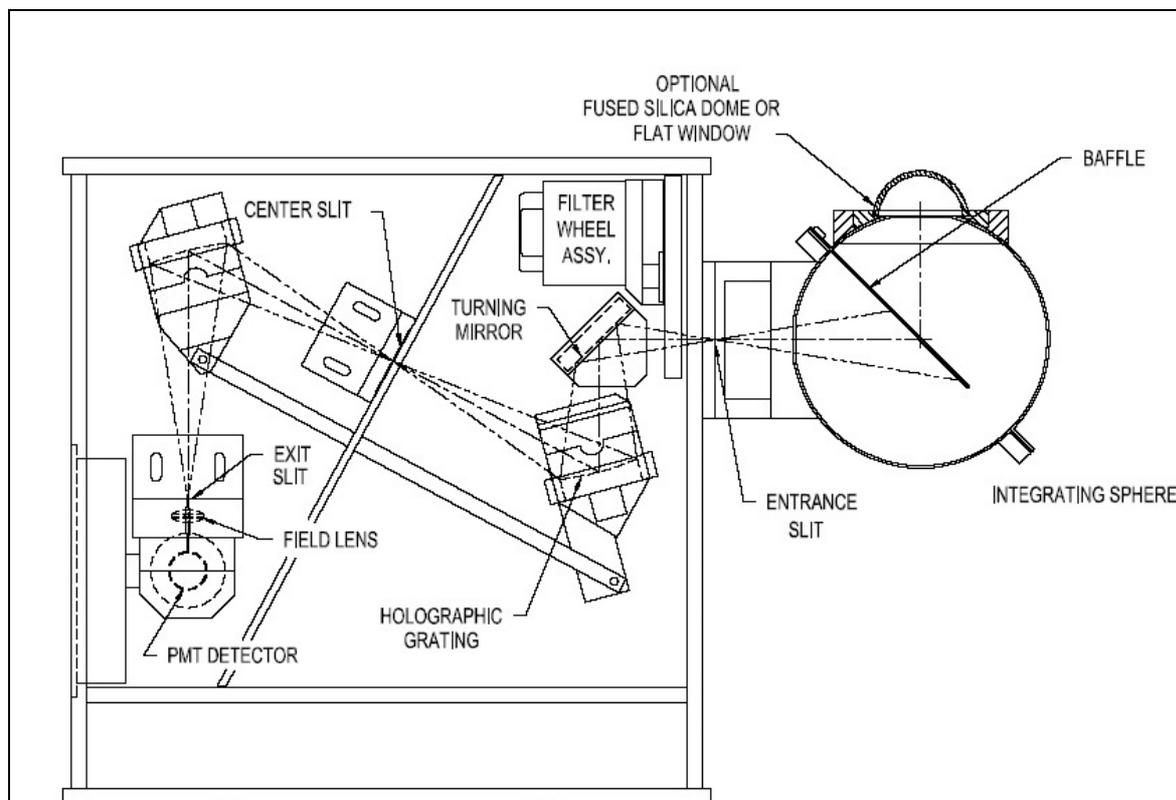


Abb. 3-8: Spektralzerlegung am Doppelmonochromator nach /61/

Die Wellenlängenkalibrierung erfolgt durch eine in einem Aufsatz integrierte Hg-Niederdrucklampe ($P = 4 \text{ W}$). Die absolute spektrale Bestrahlungsstärke wird vor jeder Messung durch eine Halogenglühlampe kalibriert. Für Umgebungstemperaturen zwischen 5° C und 40° C gelten für die Reproduzierbarkeit der Absolutkalibrierung $\pm 0,5 \%$. Die Messunsicherheit des Spektralradiometersystems beträgt $\pm 3 \%$.

3.3.3 Messung der Beleuchtungsstärke

Die integralen Messwerte der Beleuchtungsstärke wurden mit einem Handluxmeter (Fa. Mx-Elektronik, Typ Minilux) aufgenommen. Als Empfänger dient bei diesem Gerät ein Silizium-Photoelement mit $V(\lambda)$ - und \cos -Anpassung. Aus den analogen Ausgangssignalen des Empfängers werden mit Hilfe eines Operationsverstärkers, der als aktiver Tiefpassfilter arbeitet, Mittelwerte gebildet. Ein zweiter OP-Verstärker dient zur Messbereichsumschaltung. Der Messbereichsumfang des Gerätes liegt zwischen $1 \cdot 10^{-3} \text{ lx}$ und $199 \cdot 10^3 \text{ lx}$. Die Empfindlichkeit des Messgerätes wird mit $s = 2 \text{ nAlx}^{-1}$ angegeben. Nach DIN /32/ hat das Gerät die Klasse B mit einer relativen Messunsicherheit von kleiner als 6% .

3.3.4 Messung der Leuchtdichte L_v und ihrer Verteilung

Die Leuchtdichte ist die den Helligkeitseindruck beschreibende lichttechnische Größe und ist nach dem photometrischen Grundgesetz definiert:

$$L_v = \frac{d^2\phi}{dA \cdot \cos \varepsilon \cdot d\Omega} \quad \text{Gl. 3-8}$$

Zur physikalischen Messung von Leuchtdichten wird eine der Leuchtdichte proportionale Beleuchtungsstärke herangezogen, die z. B. auf einer optischen Abbildung entsteht. Für die mit Hilfe eines photoelektrischen Empfängers gemessene Beleuchtungsstärke gilt:

$$E = \int L \cos \varepsilon_2 d\Omega \quad \text{Gl. 3-9}$$

Für die Kalibrierung von Leuchtdichtemessgeräten werden Flächen bekannter und möglichst konstanter Leuchtdichte benötigt. Hierzu zählen Messanordnungen mit einer diffus reflektierenden Oberfläche, wie sie durch eine gepresste BaSO_4 -Tablette realisiert wird, die von einer Lichtstärkenormallampe beleuchtet werden. Bei bekanntem Leuchtdichtefaktor dieses Materials lässt sich die Leuchtdichte aus der Beleuchtungsstärke auf dem Leuchtdichtenormal nach Gl. 3-8 bestimmen. Der Aperturwinkel Ω wird mit Hilfe eines Tubus- oder Optik-Vorsatzes festgelegt. Bei den Messungen der Leuchtdichte wurde ein Leuchtdichte Messgerät mit einem Optik-Vorsatz benutzt (Firma LMT, Typ L 1006). Die Abb. 3-9 zeigt den Strahlengang im Leuchtdichtemessgerät.

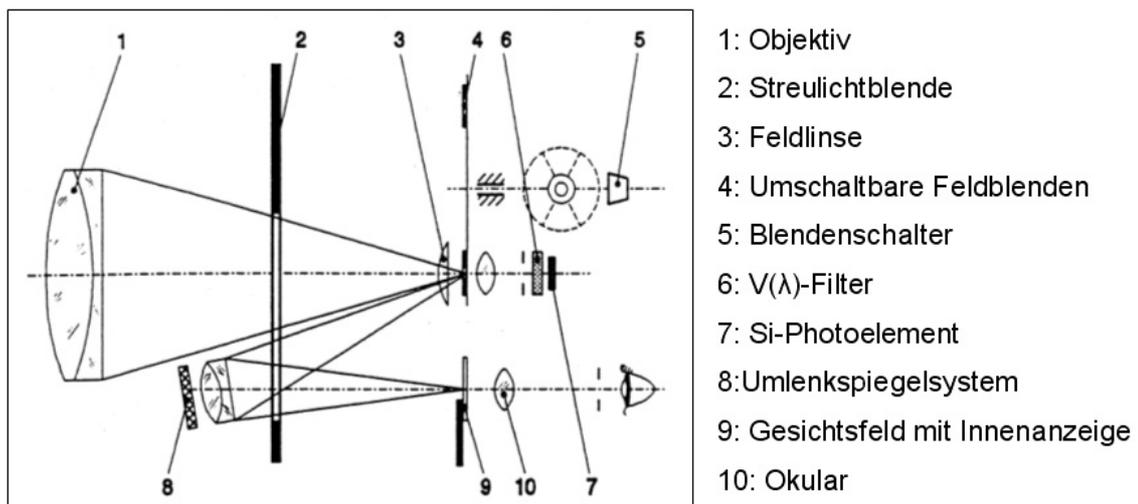


Abb. 3-9: Aufbau des Leuchtdichtemessgerätes L 1006 aus /60/

Die relative Messunsicherheit f_1 für die $V(\lambda)$ -Anpassung des Gerätes wird vom Hersteller mit kleiner 2,5 %, der relative Gesamtfehler f_{ges} mit kleiner 7,5 % (Klasse A nach DIN /32/) angegeben. Der Messbereich liegt zwischen $1 \cdot 10^{-4} \text{ cdm}^{-2}$ und $2 \cdot 10^7 \text{ cdm}^{-2}$.

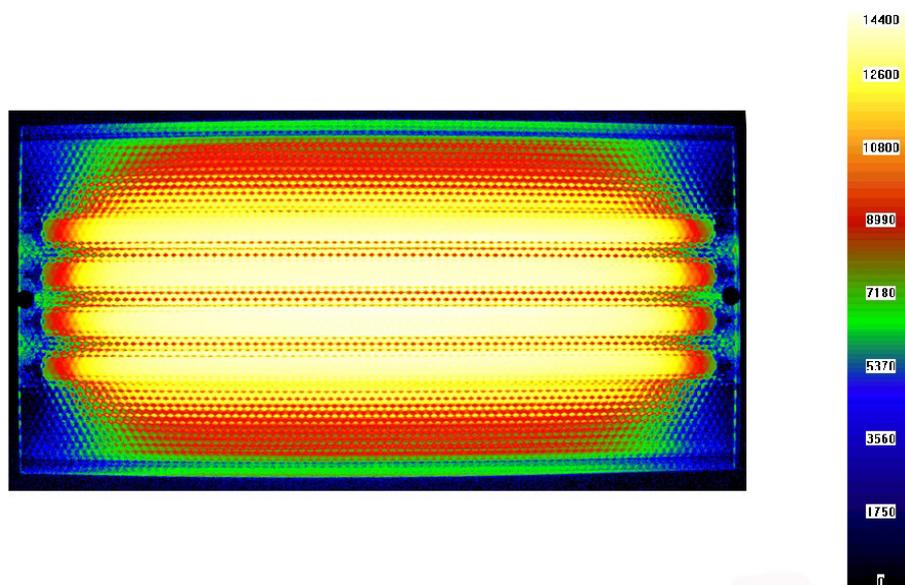


Abb. 3-10: Leuchtdichteverteilung auf der Strahlungsausstrittsfläche eines Lichttherapiegerätes mit Leuchtstofflampen und Streuscheibe

Bei der Bewertung der Blendungswirkung von Lichtquellen und Bestrahlungsquellen werden neben der mittleren Leuchtdichte, Angaben über die **Verteilung der Leuchtdichte** über die strahlende Fläche benötigt, wie es in Abb. 3-10 beispielhaft dargestellt ist. Zur Aufnahme von Leuchtdichteverteilungen von Strahlungsquellen sowie Bestrahlungsgeräten wurde ein digitales bildauflösendes Leuchtdichtemessgerät (Fa. Technoteam, Typ *Rollei d30 flex*) mit CCD-Technik eingesetzt. Bei der Messung wird das durch die Eingangsoptik abgebildete Signal nach einer $V(\lambda)$ -Filterung in Matrizen abgelegt, die bei einer Sensorfläche von $8,71 \times 6,9 \text{ mm}^2$ aus 1.280 (hor.) \times 1.024 (ver.) Bildpunkten bestehen. Dadurch wird eine örtliche Verteilung des Leuchtdichtebildes nachgebildet. Nach einer AD-Umwandlung werden die Messdaten in digitaler Form ausgegeben. Die Leuchtdichten L_G werden dabei aus den Messwerten der drei spektralen Empfänger (R, G, B) errechnet, für sie gilt nach /62/:

$$L = L_l \cdot (L_r R + L_g G + L_b B) \quad \text{mit } L_r = 0,50; L_g = 1,0; L_b = -0,10 \quad \text{Gl. 3-10}$$

Die reaktive spektrale Empfindlichkeit der einzelnen Empfänger und die spektrale Gesamtempfindlichkeit des Messsystems sind in Abb. 3-11 dargestellt.

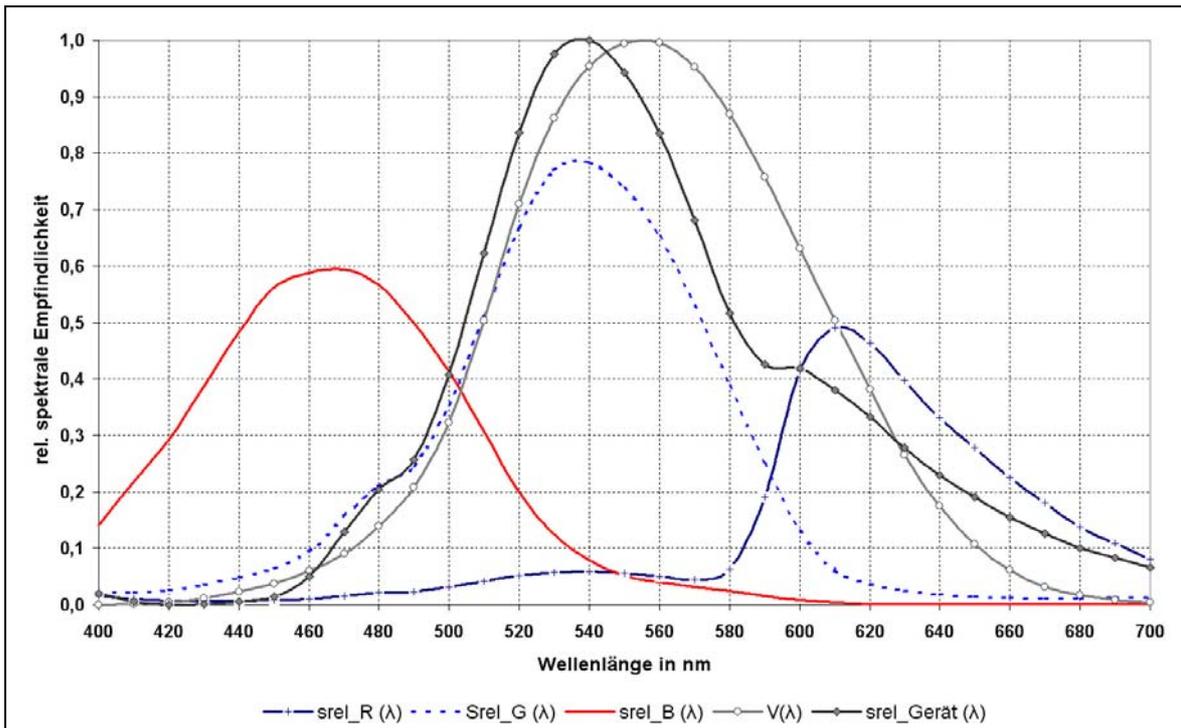


Abb. 3-11: Rel. spektrale Empfindlichkeiten der Empfänger (R,G,B); der Gesamtleuchtdichte L und die Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$

Der Messbereich der Leuchtdichtekamera liegt zwischen 3 cdm^{-2} und $2 \cdot 10^6 \text{ cdm}^{-2}$. Zur Kalibrierung des Messgerätes wird durch den Hersteller eine Lichtquelle mit der Normlichtart A (LRS-455 S/N; $T_{cp} = 2856 \text{ K}$) benutzt. Bei der Messung von Lichtquellen mit einer spektralen Verteilung, die von der Normlichtart A abweicht, ergeben sich Messunsicherheiten aus der spektralen Fehlanpassung. Diese betragen bei Halogen-Glühlampen mit Filtern der Lichtfarbe D65 weniger als 5 %, bei Leuchtstoff- und Halogen-Metaldampflampen weniger als 10 % des jeweiligen Messwertes. Für das digitale Leuchtdichtemessgerät wird vom Hersteller die Kalibrierunsicherheit kleiner als 3 %, der Linearitätsfehler f_3 kleiner als 0,2 % und die relative Gesamtmessunsicherheit mit weniger als 2 % angegeben.

3.4 IR-Radiometrie

Bei der Messung infraroter Strahlung finden in Abhängigkeit von der Wellenlänge als Empfänger Photowiderstände, Photoelemente (Si, Ge), Thermoelemente und Thermosäulen sowie Sekundärelektronenverstärker (SEV) Verwendung. In Photowiderständen verändert sich aufgrund absorbierter Strahlung die Leitfähigkeit des Halbleiters, wobei der Spannungsabfall als Maß für die absorbierte Strahlungsleistung herangezogen wird. Für die Messung längerwelliger IR-Anteile eignen sich Hg-Cd-Te-Photowiderstände. Im IR-A

sowie in der im Folgenden beschriebenen Messanordnung werden PbS-Photo-widerstände (Typ 4244, Fa. Hamamatsu) als Empfänger eingesetzt.

Zur spektralen Messung von infraroter Strahlung wird im Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Berlin eine Messanordnung mit einem Spiegelmonochromator (Typ SPM 2, Fa. Carl Zeiss Jena) benutzt. Zur Erfassung der Strahlung dient ein kosinuskorrigierter Bestrahlungsstärkemesskopf, bei dem als Streumedium PMMA benutzt wird. In dem anschließenden OWL aus Glas ($l = 1 \text{ m}$) erfolgt eine Querschnittswandlung der Faserbündel von einer eingangsseitigen Kreisfläche ($\varnothing = 3,6 \text{ mm}$) auf ein Rechteck ($1 \times 10 \text{ mm}^2$). Der Ausgang des OWLs wird durch eine Optik (Typ Tessar 4,5, Fa Carl Zeiss Jena) auf den Eingangsspalt des Spiegelmonochromators (Typ SPM 2, Fa. Carl Zeiss Jena) vergrößert abgebildet. Aufgrund der sehr geringen Signalgrößen und zur Verbesserung des Signal-Rauschabstandes wird die Strahlung vor dem Eingangsspalt des Monochromators durch einen Chopper in Form von Rechteckpulsen moduliert und einem Lock-In-Verstärker (Typ 5209, Fa. EG&G) zugeführt.

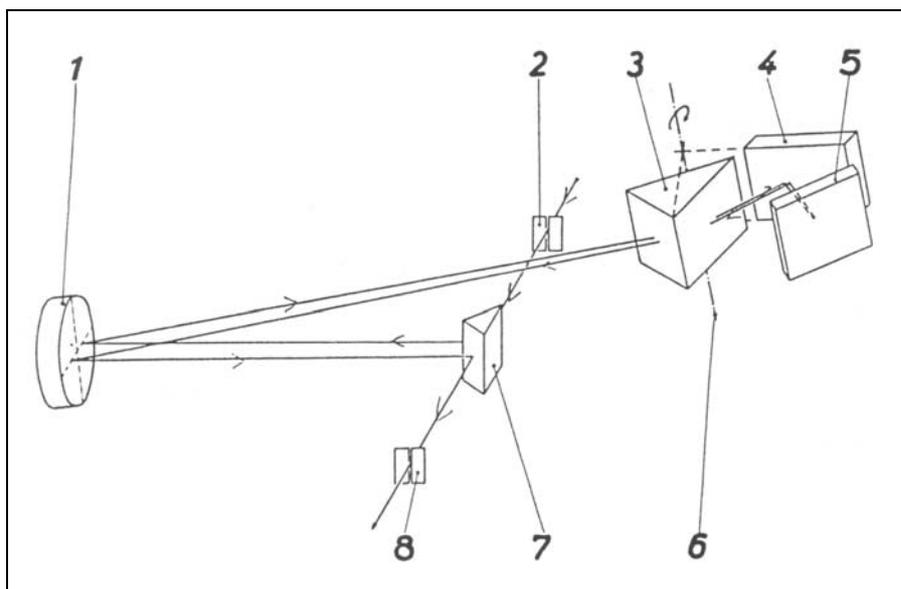


Abb. 3-12: Strahlengang im Spiegelmonochromator SPM 2 nach /126/

Die spektral zu zerlegende Strahlung tritt dann durch den Eingangsspalt (2) (siehe Abb. 3-12) und fällt nach einer Reflektion an einer Spiegelfläche (7) auf den außenaxialen, geneigt stehenden Parabolspiegel (1). Das reflektierte Strahlenbündel trifft dann auf das Dispersionsprisma (3) und nach der dort erfolgten ersten spektralen Zerlegung auf das Wadsworth- (4) sowie den Autokollimationsspiegel (5). Die hier reflektierte Strahlung durchläuft anschließend ein zweites Mal das Prisma und wird hier spektral zerlegt. Durch

den Parabolspiegel wird dann über eine zweite Spiegelfläche (7) das Spektrum der einfallenden Strahlung am Austrittsspalt erzeugt.

Je nach Wellenlängenbereich werden an diesem Spiegelmonochromator verschiedene Prismenmaterialien benutzt. Einen Überblick gibt Tabelle 3-4.

Tabelle 3-4: Prismenmaterialien und Wellenlängenbereiche für ihre Anwendung

Prismenmaterial	Anwendungsbereich in μm
Quarz (Si)	0,2 – 3,0
Flintglas (G)	0,36 - 2,5
Lithiumfluorid (LiF)	1,2 – 6,0
Steinsalz	6,0 -16,0
Kaliumbromid	16 -25

Zur spektralen Zerlegung kann am beschriebenen Spektralradiometer anstelle der Prismenvorrichtung (3)/(4)/(5) ein Plangitter benutzt werden. Im Gegensatz zu UV- und VIS werden in der IR-Spektroskopie Gitter mit geringerer Strichzahl benötigt. Für Spektralmessungen im IR-A ($700 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1400 \text{ nm}$) wird das Gitter Nr. 000160 benutzt, bei dem blaze-Wellenlänge λ_{bl} (Wellenlänge, bei der das Gitter maximalen Wirkungsgrad besitzt) bei 1000 nm liegt; für Messungen im IR-B ($700 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1400 \text{ nm}$) wird das Gitter Nr. 461919 mit $\lambda_{bl} = 2 \text{ mm}$ eingesetzt. Die eingesetzten Gitter besitzen jeweils 650 Striche/mm.

3.5 Messung der Gesamtstrahlung

Bei der Bewertung von Bestrahlungsgeräten wird die Strahlungsbelastung der Umwelt durch die integrale Größe der Gesamtstrahlungsleistung oder der Gesamtbestrahlungsstärke bestimmt. Zur Messung der von einer Strahlungsquelle abgegebenen Gesamtstrahlungsleistung werden entweder thermoelektrisch (Thermosäulen, Thermoelemente, Bolometer) oder pyroelektrische Empfänger (Pyrheliometer, Pyranometer) eingesetzt. Als besondere Anforderung an solche Geräte gilt die spektrale Unselektivität über das gesamte Spektrum der optischen Strahlung. Zudem werden für robuste Messungen hohe spektrale Absorptionsgrade der Empfängerflächen und kleine Zeitkonstanten benötigt.

Bei der Messung der Gesamtbestrahlungsstärke von Strahlungsquellen und Bestrahlungsgeräten wurde ein Schwarzflächenpyranometer benutzt. (Fa. Kipp & Zonen B. V,

Typ Solarimeter CM 5). Durch die halbkugelförmig ausgeführte Glasabdeckung wird der Messbereich des Gerätes zwischen 300 nm und 3000 nm begrenzt. Für den schrägen Lichteinfall im Winkelbereich $0^\circ \leq \varepsilon \leq 60^\circ$ ergeben sich für das Messgerät relative Unsicherheiten bis zu 10,7 % in der Achse der Anschlussstifte des Gerätes bzw. bis zu 5,0 % in der hierzu senkrechten Ebene/59/. Für die Korrektur der Nullpunktverschiebung des Pyranometers muss nach der Stabilisierung des Messwertes der Anzeigewert abgelesen werden. Anschließend wird das Messgerät abgedeckt und nach $t > 1$ min die Dunkelthermospannung ermittelt. Der tatsächliche Messwert ergibt sich aus der Differenz dieser beiden Werte. Das Ausgangssignal des genutzten Gerätes wird mit einem digitalen Multimeter (Fa. Kiethley, Typ 199) aufgenommen. Die Empfindlichkeit des Gerätes beträgt $s = 108,5 \cdot 10^{-3} \text{ VW}^{-1} \text{ cm}^{-2}$.

3.6 Messung der farbmtrischen Parameter (x, y, Ra, T_{cp})

Die technische Messung der farbmtrischen Parameter ist in der Literatur eingehend beschrieben /60/, /34/, /21/, /118/. Prinzipiell werden dabei das Spektralverfahren, bei dem die spektral gemessene Farbreizfunktion valenzmetrisch ausgewertet wird oder das integrale Dreibereichsverfahren herangezogen, in dem die drei Farbwerte der zu messenden Farbvalenz durch integrale Messungen von drei unabhängigen Empfängern ermittelt werden. Die Lichtfarbe bzw. die ähnlichste Farbtemperatur T_{cp} einer Lichtquelle werden durch den Vergleich des Farbortes mit dem Planckschen Kurvenzug (ggf. mit Hilfe Juddscher Geraden) in der Normfarbtafel ermittelt. Die Körperfarben werden durch ihre Farbwiedergabeindizes R_x bzw. durch den allgemeinen Farbwiedergabeindex R_a beschrieben.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten farbmtrischen Messungen wurde neben den spektralen Messungen mit dem Doppelmonochromator und der anschließenden numerischen Auswertung ein Dreibereichsfarbmessgerät (Fa. LMT, TYP C 1210) benutzt. Die drei Normspektralwertfunktionen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$ werden bei diesem Gerät durch optisch gefilterte photoelektrische Empfänger realisiert. Die relativen, spektralen Empfindlichkeiten der integralen Empfänger sind in Abb. 3-13 im Vergleich zu den Spektralwertfunktionen nach CIE dargestellt.

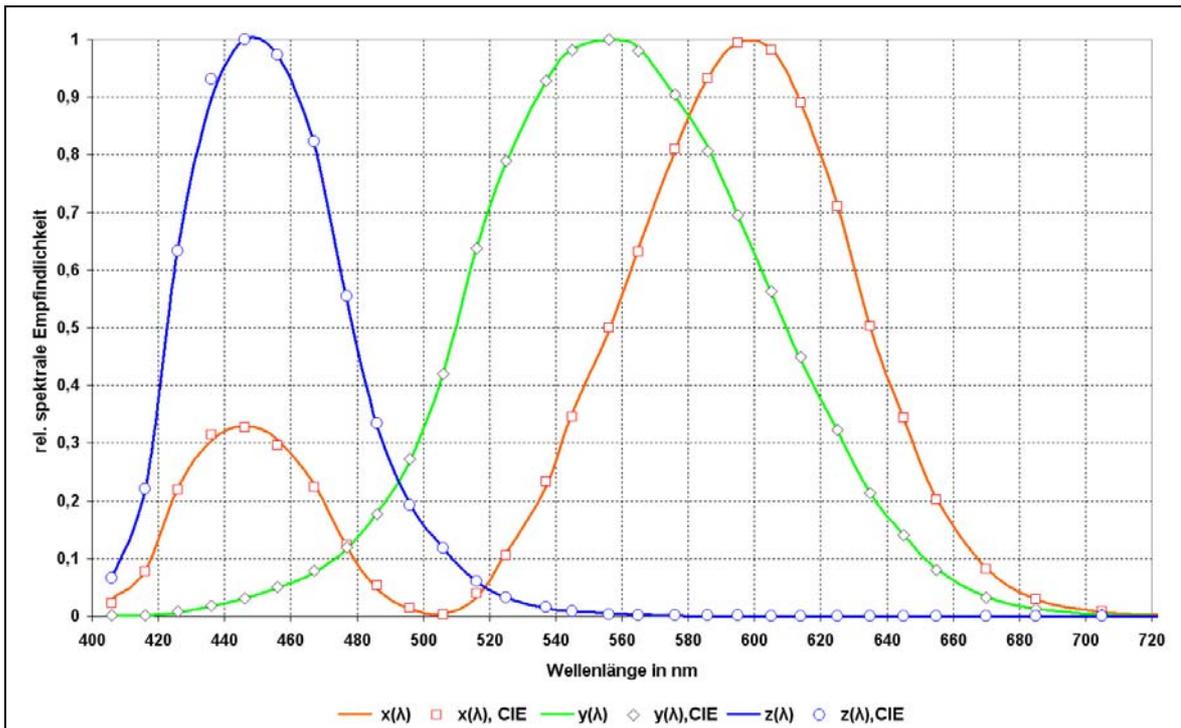


Abb. 3-13: Die Normspektralwertfunktionen und relative spektrale Empfindlichkeiten der Empfänger des Dreibereichsfarbmessgerätes

Der maximale relative Fehler beträgt für die $\bar{x}(\lambda)$ -Anpassung f_{1x} weniger als 1,5 %, für die $\bar{y}(\lambda)$ -Anpassung f_{1y} weniger als 1,0 % und für die $\bar{z}(\lambda)$ -Anpassung f_{1z} weniger als 2,0 %. Das Gerät wurde mit einer Normallichtquelle (Normlichtart A) und einer Messunsicherheit von ± 6 K kalibriert. Als Gesamtfehler wird durch den Hersteller eine relative Messunsicherheit von kleiner als 3 % angegeben.

Als ein weiteres Messgerät zur Ermittlung von farbmtrischen Größen wurde eine kompakte spektrale Strahldichtekamera (Fa. Photo Research, Typ PR-650 Spectra-Scan) eingesetzt. Bei diesem Gerät wird die optische Strahlung eines Objektes durch die Eingangsoptik (cos-Korrektur, Streulichtreduzierung) auf den Eintrittspalts abgebildet und mit einem Polychromator spektral zerlegt. Durch ein Photodiodenarray werden zwischen 380 nm und 780 nm in einem Spektralintervall von jeweils 4 nm Strahlungsanteile aufgenommen. Durch die eingebaute Elektronik erfolgt die valenzmetrische Auswertung und die Ausgabe der farbmtrischen Größen ähnlichsten Farbtemperatur T_{cp} , Normfarbwerte X, Y, Z, der Normfarbwertanteile x, y, u, v, u', v' sowie die integrale Größe der gemessenen Strahldichte. Zudem besteht die Möglichkeit über eine RS-232-Schnittstelle die Spektralwerte der Strahldichte zur weiteren numerischen Auswertung und anschließende Ermittlung der einzelnen Farbwiedergabeindizes rechnerisch zu nutzen.

Die relative Gesamtmessunsicherheit wird vom Hersteller mit weniger als 2 % und die relativen Messunsicherheiten der Normfarbwertanteile mit $x \pm 0,0015$ bzw. $y \pm 0,001$ angegeben.

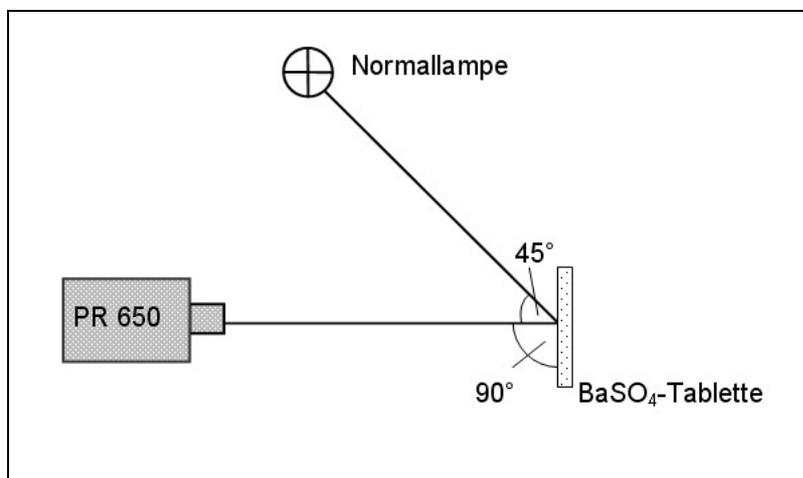


Abb. 3-14: Messung der spektralen Strahlendichte über einen Weißstandart

Zur Kontrolle der Strahlendichteskala des Messgerätes wurde die von einer Bestrahlungsstärke – Normallampe auf einem Weißstandart (gepresste BaSO₄-Pulver) erzeugte spektrale Strahlendichte herangezogen. Für diese Messanordnung nach DIN 5036 /33/ vereinfacht sich der Zusammenhang zwischen der spektralen Strahlendichte und der spektralen Bestrahlungsstärke zu:

$$L_{e,\lambda} = E_{e,\lambda}(\lambda) \cdot \frac{\beta_{\lambda}(\text{BaSO}_4)}{\pi} \quad \text{Gl. 3-11}$$

Die relativen Abweichungen bei spektralen Messungen zwischen den theoretisch nach Gl. 3-11 ermittelten und tatsächlich gemessenen Werten der spektralen Strahlendichte lassen sich angeben:

$$F_{rel}(\lambda) = \frac{L_{e,\lambda,theor}(\lambda) - L_{e,\lambda,mess}(\lambda)}{L_{e,\lambda,theor}(\lambda)} \cdot 100 \% \quad \text{Gl. 3-12}$$

In Abb. 3-15 sind die spektralen Strahlendichtewerte, die mit dem kompakten spektralen Farbmessgerät aufgenommen wurden, neben der wellenlängenabhängigen Messabweichung dargestellt. Die maximale relative Abweichung liegt mit 2,5 % bei 429 nm vor. Für die mittlere quadratische Abweichung (Standardabweichung) σ gilt:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{1-n} \cdot \sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2} \quad \text{Gl. 3-13}$$

Für die obige Messreihe ergibt sich dieser Wert zu 1,4 %.

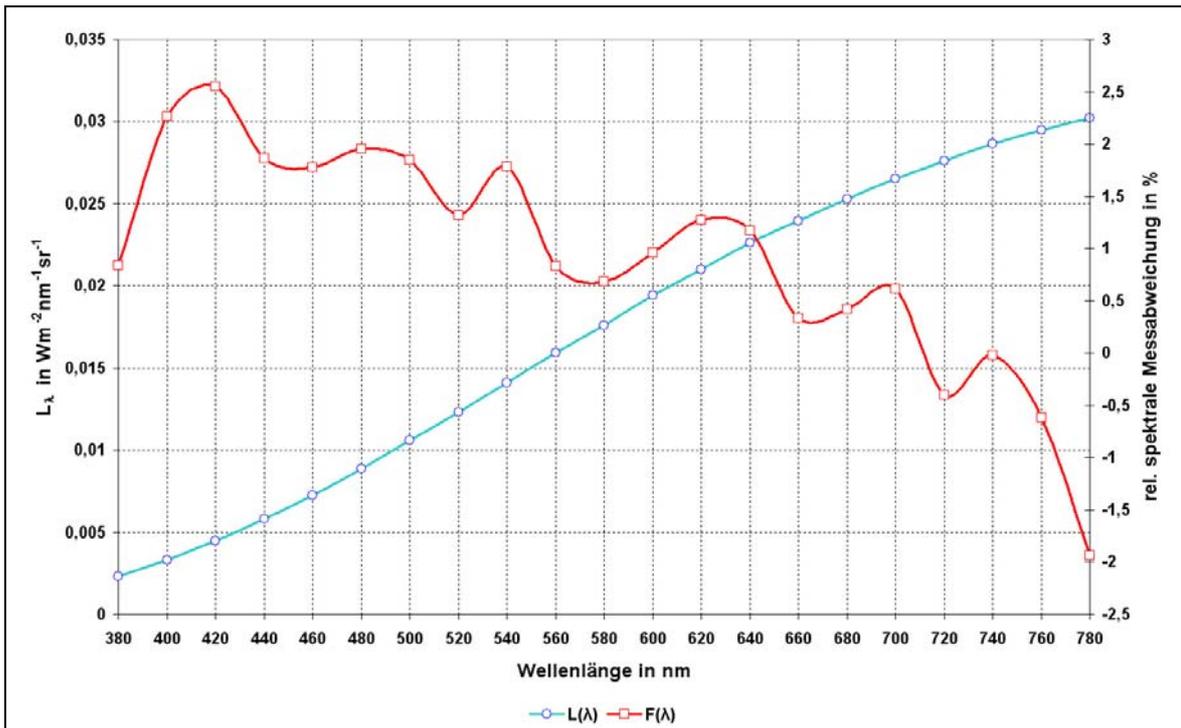


Abb. 3-15: Spektrale Strahldichte des Weißstandarts und Messabweichungen der Ergebnisse mit dem Farbmessgerätes PR 650

3.7 Messung spektraler Kennzahlen von Materialien

Die Wirkung von Strahlung auf Materialien wird durch lichttechnische Kennzahlen beschrieben. Diese hängen von einer Reihe von Parametern wie die spektrale Zusammensetzung der auffallenden Strahlung, ihr Polarisationszustand, der Raumwinkel, aus dem die Strahlung auffällt, die Beobachtungsgeometrie, die Schichtdicke und der Oberflächenzustand der Probe ab. Reflexionen und Transmissionen an Materialien können gestreut, gerichtet oder gemischt auftreten.

Für die optimale Anpassung von Bestrahlungsgeräten an die gewünschte Anwendung spielen die spektralen Eigenschaften der benutzten Materialien eine besondere Rolle. Die spektrale Zusammensetzung der angewandten Strahlung wird durch die Transmissionseigenschaften von Filtergläsern, Kunststoffabdeckungen und Reflektormaterialien wesentlich bestimmt. Durch gezielte Wahl der Materialien können unerwünschte spektrale Teilgebiete ausgesondert und photobiologisch wirksame Strahlungsanteile z. B. durch Mehrfachreflexionen räumlich geschickter verteilt werden.

Beim Einfall optischer Strahlung auf ein Material sind der spektrale Reflektionsgrad $\rho(\lambda)$, der spektrale Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ und der spektrale Absorptionsgrad $\alpha(\lambda)$ durch die

Quotienten der reflektierten $\Phi_{\lambda,\rho}$, transmittierten $\Phi_{\lambda,\tau}$ bzw. absorbierten spektralen Strahlungsleistung $\Phi_{\lambda,\alpha}$ und der einfallenden Strahlungsleistung $\Phi_{\lambda,\text{in}}$ definiert. Aus der Integration über das betrachtete Wellenlängenintervall ergeben sich die entsprechenden strahlungsphysikalischen Kennzahlen - hier im Falle der StrahlungsReflektionsgrad ρ_e :

$$\rho_e = \frac{\Phi_{e\rho}}{\Phi_e} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\lambda} \cdot \rho(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\lambda} \cdot d\lambda} \quad \text{Gl. 3-14}$$

Bei der Betrachtung von photobiologischen Wirkungen kann man eine allgemeine Kennzahl (hier im Falle des UV-Erythems) wie folgt angeben:

$$\rho_{er} = \frac{\Phi_{er\rho}}{\Phi_{er}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\lambda} \cdot \rho(\lambda) \cdot s_{rel,er}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\lambda} \cdot s_{rel,er}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad \text{Gl. 3-15}$$

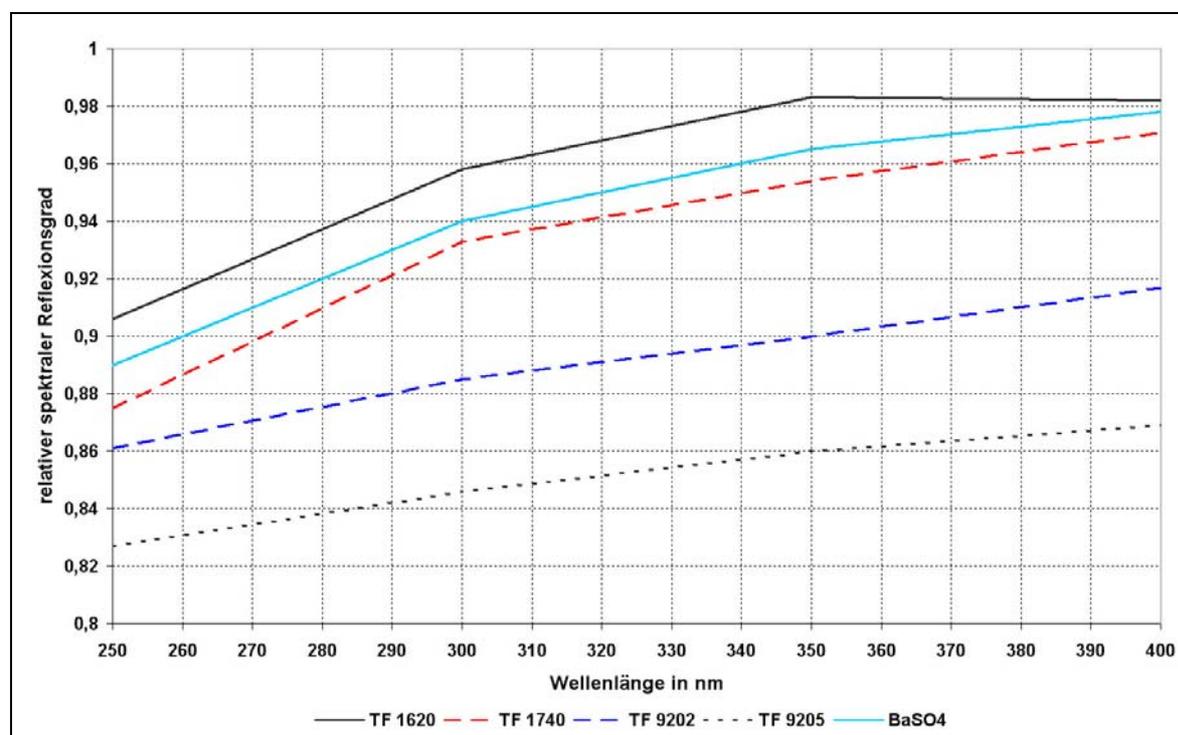


Abb. 3-16: Spektraler Reflexionsgrad verschiedener Reflektionsnormale

Zur Messung dieser spektralen Größen werden Bestrahlungseinheiten für den jeweiligen Spektralbereich sowie Reflektionsnormale mit bekanntem spektralen Reflektionsgrad benötigt. Im sichtbaren Spektralbereich dient hierzu gepresstes BaSO₄-Pulver. Im infraroten Bereich des Spektrums wird Schwefelpulver als Referenzmaterial benutzt. Im UV eignet sich wegen hohem Reflektionsvermögen gepresstes PTFE(Polytetrafluorethylen)-Pulver. Die spektralen Reflektionsgrade von einigen Teflon-Materialien und BaSO₄ sind in Abb. 3-16 dargestellt [72], [148].

Tabelle 3-5: Messempfänger des Spektralradiometers

Spektralbereich	Wellenlängenbereich in nm	Empfänger
UV/ VIS	190 - 700	SEV
UV/ VIS	190 - 1100	Si-Photoelement
VIS/ IR-A	700 - 1700	Ge-Photoelement
IR-A/ IR-B	800 - 2100	InGaAS-Photoelement
IR-A/ IR-B	1000 - 2700	PbS-Photoelement

Für die Messungen der spektralen Kennzahlen der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Materialien wurde ein Zweistrahl-Spektralradiometer (Fa. Bruins Instruments, Typ. Omega 20) eingesetzt. Das Meßsystem besteht aus einem Spektralzerleger mit integriertem Bestrahlungseinheit und Auswerteelektronik. Zur Aufnahme des Photostromes erfolgt in Abhängigkeit vom Wellenlängenbereich mittels verschiedener photoelektrischer Empfänger (siehe Tabelle 3-5).

Für die Messung des spektralen Reflektionsgrades, der diffusen und direkten Reflektions- sowie des Transmissionsgrades werden jeweils verschiedene Probenkammern benutzt. Der nutzbare Messbereich liegt zwischen 190 nm und 2700 nm, wobei im UV und VIS die Größe der minimalen Halbwertsbreite $\Delta\lambda_{H,\min}$ 0,1 nm (weitere mögliche Wellenlängenabstände 0,2 nm, 0,5 nm und 1 nm) im IR-A 0,2 nm (0,4 nm, 1 nm und 2 nm), im IR-B 0,4 nm (0,8 nm, 2 nm und 4 nm) beträgt. Die Spektralzerlegung erfolgt mit Hilfe eines Konkavgitters (Cherny-Turner-Anordnung) mit 600 Linien/mm. Die Breiten des Austritts- und Eintrittspaltes (b_{sa} und b_{se}) sind jeweils zwischen 0,1 mm und 4,0 mm variierbar. Die Lineardispersion des Monochromators beträgt im UV/ VIS 3,2 nm/ mm, im IR-A 6,4 nm/ mm und im IR-B 12,8 nm/ mm. Für die Wellenlängenreproduzierbarkeit des Kennzahlenspektralradiometers gilt eine Messunsicherheit von 0,1 nm und die Absolutgröße der Messwerte hat eine relative Messunsicherheit von 0,1 %.

4. Gerätetechnik

4.1 Komponenten

4.1.1 Strahlungsquellen

Für die optimierte Anpassung von Bestrahlungsgeräten an die Wirkungsfunktion der beabsichtigten Anwendung spielt neben den spektralen Materialkennzahlen von verwendeten Reflektor- und Filtermaterialien die spektrale Verteilungsfunktion der eingesetzten Licht- und Strahlungsquellen die entscheidende Rolle. Für den Einsatz in der Licht- und Phototherapie wird eine Vielzahl von Strahlungsquellen von verschiedenen Herstellern angeboten, die zumeist als Gasentladungslampen ausgeführt sind. Neben verschiedenen elektrischen Wirkleistung und geometrischen Abmessungen werden Strahlungs- und Lichtquellen mit unterschiedlichsten Spektralanteilen im UV, IR und VIS angeboten. Durch spektralradiometrische Vergleichsmessungen dieser Strahlungsquellen mit anschließenden numerischen Auswerteverfahren ist es möglich, Kombinationen von Strahlungsquellen, Filter- und Reflektormaterialien für die bekannten photobiologischen Wirkungen zu bestimmen.

Tabelle 4-1: Strahlungsquellen für Anwendungen in der Photo- und Lichttherapie

<i>Anwendung</i>		<i>Strahlertyp</i>	<i>Ausführung</i>
UV-Bestrahlungsgeräte	UV-A1	Halogen-Metaldampflampen	HIT
	UV-A	Leuchtstofflampen	TL/ 10
	UV-A/ UV-B	Leuchtstofflampen, Halogen-Metaldampflampen	TL/ 05,08, 09 HIT
	UV-B-Breitband	Leuchtstofflampen, HIT	TL/ 12
	UV-B-Schmalband	Leuchtstofflampen	HIT, TL10
	PUVA (<u>P</u> soralen plus <u>UV-A</u>)	Leuchtstofflampen	TL/ 10
	Heimsolarien	Kompaktleuchtstofflampen Halogen-Metaldampflampen	-
Lichttherapiegeräte		Kompaktleuchtstofflampen	-
IR-Bestrahlungsgeräte		IR-Reflektorlampen IR-Quarzrohrstrahler Halogenglühlampen	-

In UV-Bestrahlungsgeräten werden zumeist röhrenförmige Niederdruckentladungsstrahler (Leuchtstofflampen) oder Hochdruckentladungsstrahler (Halogen-Metaldampflampen) eingesetzt. Während in den medizinischen Geräten je nach der Höhe der gewünschten Bestrahlungsstärke auf der Anwendungsebene Strahlungsquellen dieser beiden Gruppen benutzt werden, sind kommerzielle Bestrahlungsgeräte (Solarien) teilweise mit Niederdrucklampen für die Körperbräunung und Hochdruckentladungslampen für den Gesichtsbereich bestückt. Lichttherapiegeräte werden üblicherweise Niederdruckentladungslampen mit diffusen transmittierenden Filtermaterialien ausgeführt, die keine oder nur geringe Strahlungsanteile im UV besitzen.

4.1.1.1 Niederdruckentladungsstrahler/ Leuchtstofflampen

Die bei Bestrahlungsgeräten zum Einsatz kommenden *Niederdruckentladungslampen* sind zumeist Hg-Niederdruckentladungslampen mit Leuchtstoffen. Bei den Leuchtstofflampen wird der Lumineszenzeffekt ausgenutzt, wobei es bei einem zuvor energetisch angeregten Stoff zur Photonenemissionen kommt.

Tabelle 4-2: Übersicht der üblichen Leuchtstoffe für UV und VIS nach /71/

Leuchtstoff/ Aktivator	λ_{\max} (Em.) in nm	Absorption bei 254 nm in %	Halbwertsbreite in nm	Spektralbereich der Anwendung
SrAl ₁₂ O ₁₉ / Ce	310	85	34	UV-B
(Gd,La)B ₃ O ₆ / Bi	311	-	-	UV-B
BaSi ₂ / Pb	350	85	38	UV-A
(Sr,Zn)MgSi ₂ O ₇ / Pb	365	88	70	UV-A
SrB ₄ O ₇ / Eu	370	95	20	UV-A
(Ba, Sr, Ca) ₂ O ₄ / Eu	560	90	475	VIS
Ca ₅ /(PO ₄) ₃ (F,Cl)/ Sb, Mg	585	90	390	VIS
(Ce,Gd,Tb)MgB ₅ O ₁₀ / Mn	630	90	270	VIS

Leuchtstoffe werden als Kristallstrukturen bestehend aus 1 - 10 μm großen Partikeln in die Innenwände von Entladungsröhren aufgetragen. Bei den üblichen Temperaturen befinden sich alle Elektronen des Leuchtstoffes im Valenzband. Als Aktivatoren des Leuchtstoffes werden Ionen benutzt, die durch direkte Anregung (Photonenabsorption) mit dem Leuchtstoffgitter wechselwirken. Hierbei werden die Elektronen des Gitters auf ein unter-

halb ihres Leitfähigkeitsbandes liegendes Anregungsniveau angehoben und emittieren beim Rückfall in den Grundzustand ein Strahlungsquant. Wegen Wechselwirkungen mit dem Kristallgitter ist die Frequenz ν_e der emittierten Strahlung kleiner als diejenige der absorbierten Strahlung ν_α . Damit wird die Wellenlänge der durch den Leuchtstoff emittierten Strahlung größer als die der absorbierten Photonen. Kürzerwellige Strahlung kann durch Leuchtstoffe emittiert werden, wenn der angeregte Zustand durch Absorption von mehr als zwei Strahlungsquanten oder einem Strahlungsquant mit zusätzlicher thermischer Anregung erfolgt. Die Energiedifferenz

$$\Delta E = h(\nu_\alpha - \nu_e) \quad \text{Gl. 4-1}$$

verbleibt als thermische Energie im Gitter. Durch die verwendeten Leuchtstoffe bzw. Mischungen von Leuchtstoffen können die Spektren der Hg-Niederdruckentladungslampen an die gewünschte Anwendung angepasst werden. Eine Übersicht über Leuchtstoffe für UV und VIS ist in Tabelle 4-2 zusammengestellt.

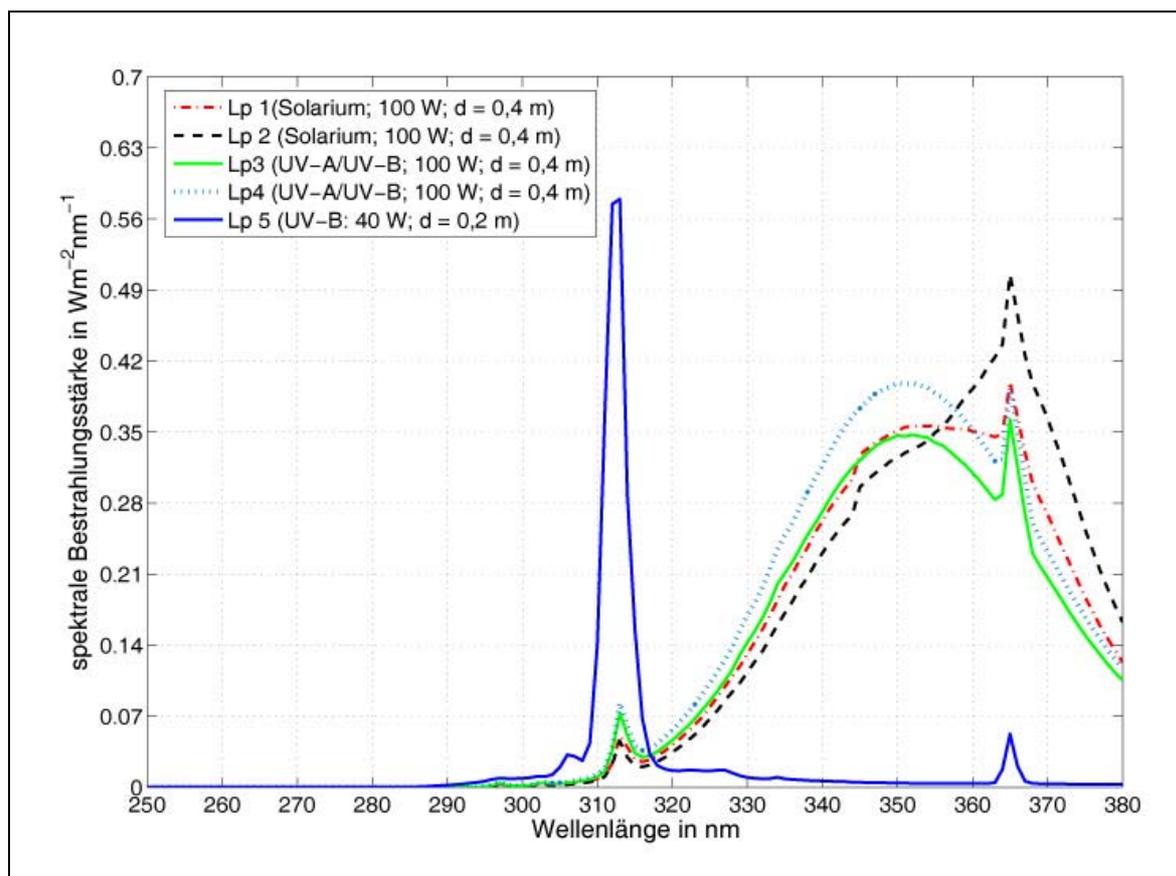


Abb. 4-1: Spektrale Bestrahlungsstärke, die von Leuchtstofflampen für UV-A/ UV-B in Ebenen mit den jeweils angegebenen Abständen erzeugt wird

Im Gegensatz zu den 80er Jahren, als in Solarien Leuchtstofflampen mit Leuchtstoff-Aktivator-Kombination $\text{SrB}_4\text{O}_7/\text{Eu}$ weit verbreitet waren, wird seit den 90er Jahren ein

höherer UV-B-Anteil angestrebt und zunehmend der Leuchtstoff BaSi_2/Pb mit Verbindung $\text{SrAl}_{12}\text{O}_{19}/\text{Ce}$ eingesetzt. Für therapeutische Anwendungen im UV-B erweist sich der Leuchtstoff $(\text{Gd}, \text{La})\text{B}_3\text{O}_6/\text{Bi}$ als geeignet. In Abb. 4-1 sind beispielhaft Leuchtstofflampen für mit Anwendungen im UV-A und UV-B dargestellt.

Für die Lichttherapie eignen sich besonders Leuchtstofflampen, die im kürzerwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums Strahlung emittieren, weil hier die relative Wirksamkeit der Melatoninsuppression am höchsten ist. In Abb. 4-2 sind beispielhaft spektrale Bestrahlungsstärke einiger Leuchtstofflampen dargestellt, die als Lichtquellen in Lichttherapiegeräten zum Einsatz kommen.

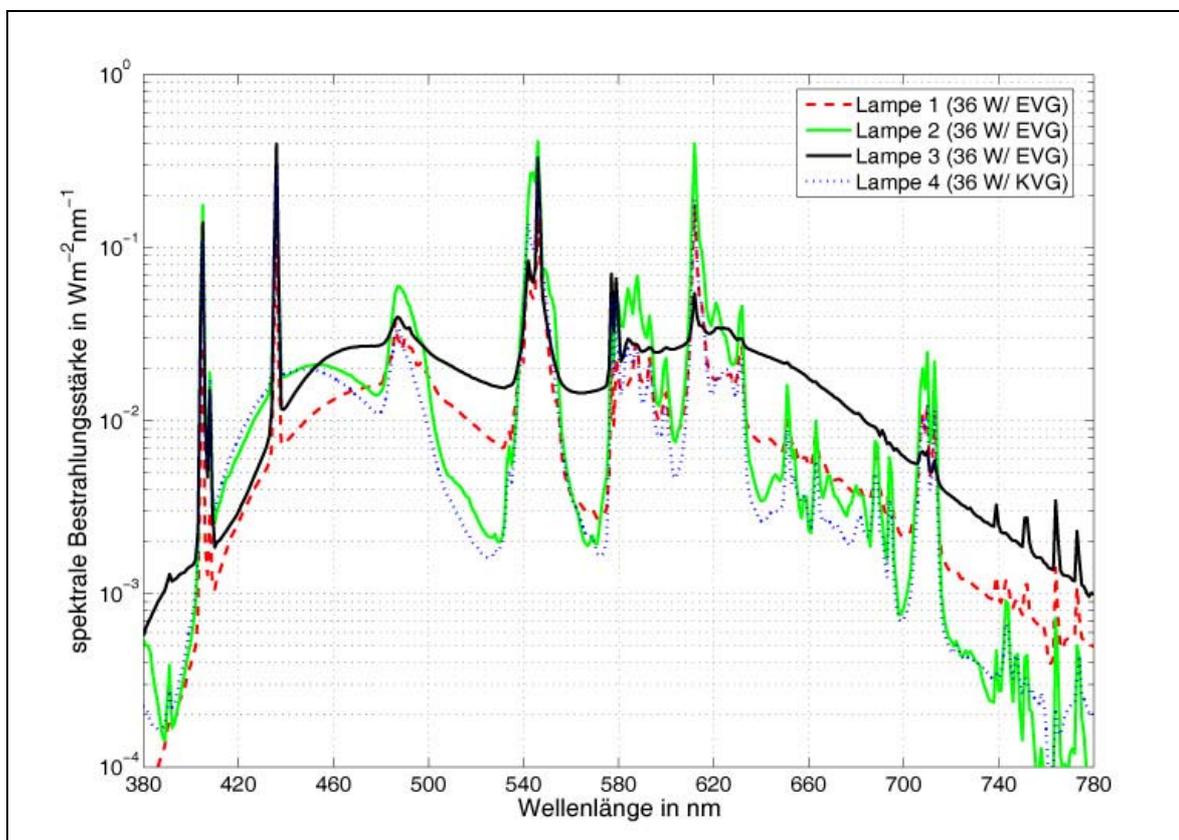


Abb. 4-2: Spektrale Bestrahlungsstärken von Leuchtstofflampen für Lichttherapiegeräte auf einer Ebene im Abstand von $d=0,4\text{ m}$

Aktuell sind Tendenzen in der Lichttherapiegerätetechnik zu beobachten, bei denen gezielt Lampen mit höheren Strahlungsanteilen im blauen und roten Spektralbereich zum Einsatz kommen. Die spektrale Bestrahlungsstärke solcher Lampen ist beispielhaft in Abb. 4-3 dargestellt.

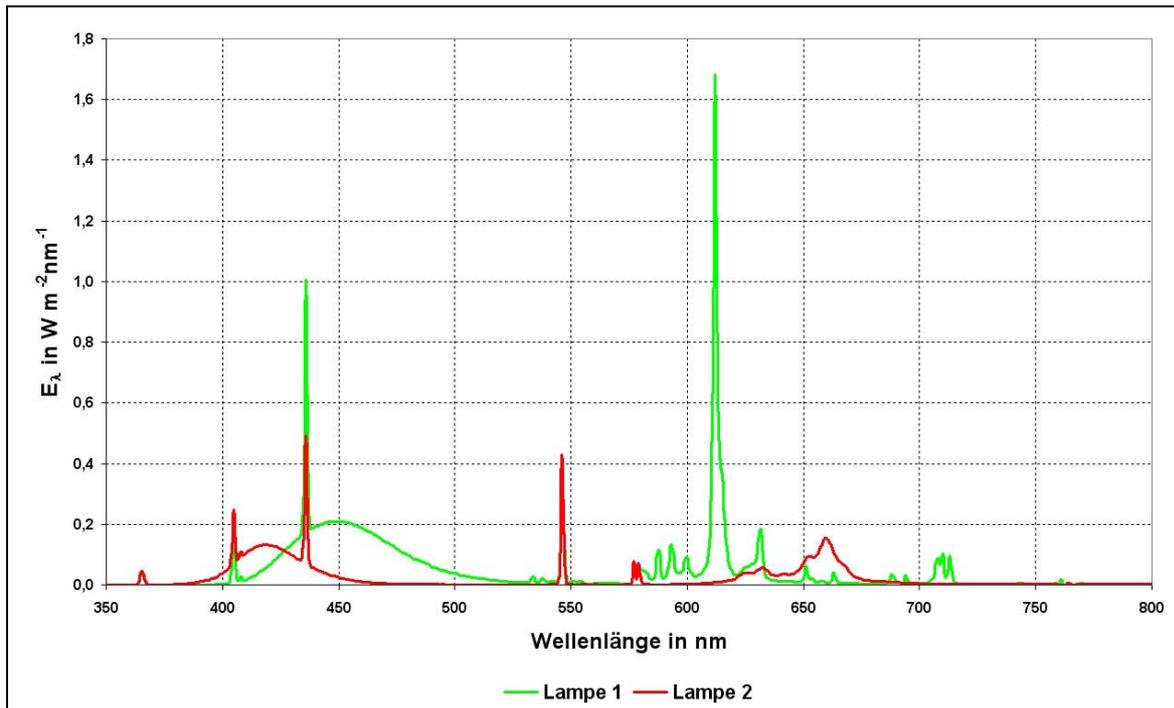


Abb. 4-3: Spektrale Bestrahlungsstärke von zwei Leuchtstofflampen mit höherem Blau-Anteil für Lichttherapie in einer Nutzebene im Abstand von $d = 0,4 \text{ m}$

4.1.1.2 Hochdruckentladungsstrahler/ Halogen-Metaldampflampen

Steigert man in einer Quecksilberentladung den Druck und den Strom, dann schlägt die Entladungsform von einem diffusen, das ganze Entladungsrohr ausfüllenden Plasma in eine kontrahierte Hochdruckbogenentladung um. In Hochdruckentladungen werden Linien erzeugt, die Kombinationen zwischen den höheren Termen entsprechen. Der Druckbereich dieser Entladung liegt bei etwa 1 bar bis zu 40 bar. Die Zahl der Stöße der Elektronen mit den Gasatomen erhöht sich durch die hohe Gasdichte im Entladungskanal stark. Zugleich können die angeregten Gasatome die aufgenommene Energie nicht mehr ungehindert abgeben, sondern stehen unter dem Einfluss ihrer Nachbarn oder weiterer Stöße. Dadurch strahlen die angeregten Atome nicht mehr nur mit den für sie typischen Frequenzen, sondern aufgrund von Druck- und Dopplerverbreiterung in breiten Frequenzbändern. Die Emission der Resonanzlinien wird im Gegensatz zur Niederdruckentladung in kalten Randzonen reabsorbiert, dass sie die Entladung kaum noch verlassen kann. Zugleich steigt der Anteil der Ausstrahlung im sichtbaren Bereich.

Halogen-Metaldampflampen stellen eine Weiterentwicklung von Hg-Hochdruckentladungslampen dar. Bei diesen Lampen wird das Emissionsspektrum der Entladung dadurch erweitert, dass durch die Zugabe verschiedener Metallhalogenide zu dem System der Quecksilberdampf-Entladungslampen die Spektren der entsprechenden Metalle durch

die Entladung erzeugt werden /142/. Als Füllkomponenten werden gewöhnlich Halogenide von Natrium, Scandium, Indium, Thallium, Cäsium, Zinn, und der seltenen Erden Dysprosium, Holmium, Thulium usw. gewählt /133/. Neben der Erzeugung eines Viellinienspektrums wird durch Zugabe von Halogeniden der Halogen-Wolfram-Kreisprozess ermöglicht, der die Schwärzung der Brennerwand verhindert /119/.

In der Phototherapie spielen Halogen-Metaldampflampen besonders wegen ihrer kleinen Strahlervolumen und hohen Leistungsbereich (400 W und 4.000 W), die die Erzeugung großer Bestrahlungsstärken erlauben, eine wichtige Rolle. Zur Zündung dieser Strahlungsquellen werden Spannungen von bis zu 5 kV benötigt, die von Zündgeräten geliefert werden. Die Stromzuführung wird wahlweise durch Stiftsockel oder bei Notwendigkeit einer Heisswiederzündung durch Soffittenausführung zweiseitig ausgelegt. Zur Strombegrenzung werden gewöhnlich induktive Vorschaltgeräte, zur Verhinderung von induktiven Lasten Kompensationskondensatoren benutzt.

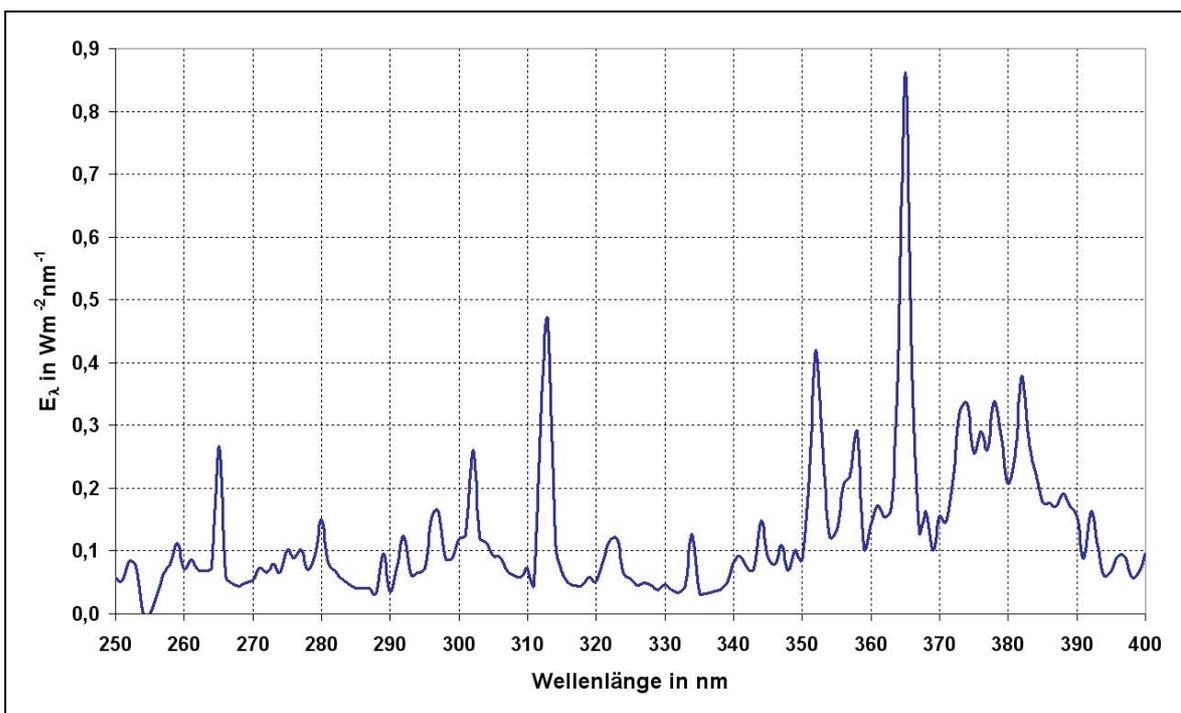


Abb. 4-4: Spektrale Bestrahlungsstärke sowie erythem- und Vitamin D₃-wirksame Bestrahlungsstärke einer Halogen-Metaldampflampe (150 W)

In Abb. 4-4 ist die spektrale Bestrahlungsstärke einer Halogen-Metaldampflampe ($P = 150 \text{ W}$, $d = 0,5 \text{ m}$) dargestellt.

Als Nachteil erweist sich bei Halogen-Metaldampflampen, dass eine Dimmung dieser Lampen zum gegenwärtigen Zeitpunkt technisch nicht realisiert ist, ohne das Lampenspektrum zu beeinflussen und ohne die Lampenlebensdauer wesentlich negativ zu beeinflussen. Der Einfluss der Variation der Lampenleistung wurde an einer Halogen-Metaldampflampe ($P = 150 \text{ W}$) untersucht. Dabei wurde die Lampennennspannung (230 V) variiert. Damit konnte neben dem Einfluss der Dimmung auch der des Boosters auf die spektrale Verteilung der Bestrahlungsstärke der Halogen-Metaldampflampe untersucht werden.

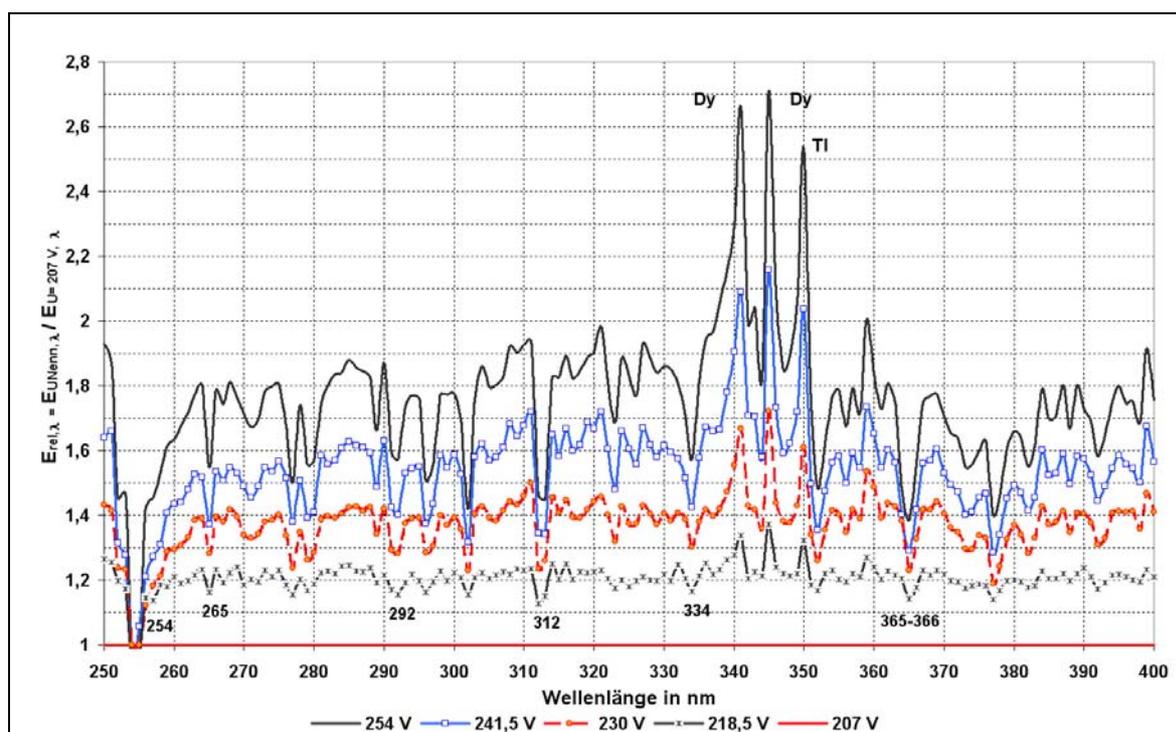


Abb. 4-5: Relative spektrale Bestrahlungsstärken einer Halogen-Metaldampflampe bezogen auf Werte bei einer Betriebsspannung von 207 V

Die relativen spektralen Bestrahlungsstärkewerte, die mit den spektralen Bestrahlungsstärkewerten für -10 % (207 V) gewichtet wurden, sind in Abb. 4-5 aufgetragen. Es wird deutlich, dass bei der Resonanzlinie des Quecksilbers wegen der Selbstumkehr durch die Steigerung der Betriebsspannung bzw. der Lampenleistung kein Anstieg der der Bestrahlungsstärke erfolgt. Bei den übrigen Emissionslinien des Quecksilbers fällt die Erhöhung der spektralen Bestrahlungsstärke geringer aus als bei den Spektralanteilen der seltenen Erden und der Metallhalogenide. Folglich sind Verschiebungen der farbtechnischen Parameter (x , y , T_{cp} , R_a) durch die Variation Lampenleistung zu erwarten. Die Farbdrift verstärkt sich im Laufe der Lebensdauer der Lampen /142/.

Wie im Falle der noch näher zu erläuternde Bestrahlungskabine zur Vitamin D₃-Photosynthese kann man jedoch durch den Einsatz von Lampen kleinerer Leistung, die je nach gewünschter Bestrahlung zu- oder abgeschaltet werden, eine Variation der Gesamtleistung von Bestrahlungsgeräten (Beleuchtungsanlagen) mit Halogen-Metaldampflampen ohne Veränderung der Lampenleistung erreichen.

4.1.1.3 IR-Strahler

Als künstliche Strahlungsquellen im nahen IR werden Glühlampen mit Wendeltemperaturen von ca. 2800 K eingesetzt. Die einfachste Ausführung stellen Pressglasglühlampen dar, bei denen die spektrale Bestrahlungsstärke ihren Maximalwert bei einer Wellenlänge von etwa 1000 nm erreicht. Diese Strahlungsquellen werden zur Behandlung von rheumatischen Beschwerden, Neuralgien und in der Sportphysiotherapie eingesetzt. Als IR-Strahlungsquellen ausgeführte Halogenglühlampen (Wolframbandlampen) besitzen Wendeltemperaturen zwischen 2800 K und 3200 K. Je nach Anwendung werden bei diesen Strahlungsquellen Kaltlichtspiegel (IR-Filterung) oder Aluminiumreflektoren (IR-Reflektion) zur spektralen Aussonderung der Strahlung eingesetzt. Als Kolbenmaterial eignet sich Quarzglas, das gute Transmissionseigenschaften bis zu einer Wellenlänge von ca. 3,5 μm vorweist. Die Bestrahlungsstärken dieser Lampen liegen im Wellenlängenbereich von 100 Wm^{-2} - 300 Wm^{-2} .

Neben Wolfram werden auch andere Metalle bzw. zumeist ihre Oxide als Strahlungsquellen im IR benutzt. Bei entsprechend leitfähigen Materialien wie Eisen, Chrom und Aluminium erfolgt die Aufheizung dieser Metalle direkt. Anderenfalls werden die Metalle zu Rohren geformt, in die ein Nickel-Chrom-Heizdraht eingebracht ist. Die infrarote Strahlung erreicht bei diesen Strahlungsquellen ihren Maximalwert je nach verwendetem Material bei Wellenlängen zwischen 2,8 μm - 4,3 μm . Für die Bestrahlung größerer Flächen wie in IR-Saunen werden stabförmig ausgelegte Quarzrohrstrahler benutzt. Die Aufheizung dieser Strahler erfolgt durch einen Chromnickel- oder Aluminiumstahlheizleitermaterial, das in Quarzsand eingelassen ist. Die Widerstandsdrähte solcher Strahler können bis auf 1000 °C in Luftumgebung erhitzt werden, ohne dass sie durchoxidieren. Das Emissionsspektrum von Quarzrohrstrahlern erstreckt sich von etwa 1 μm bis über 10 μm . Als Widerstandsmaterial kann statt Chromnickeldraht auch zu Stäben gepresstes Siliziumkarbid verwendet werden, wodurch die Heiztemperatur bis auf 1600 °C erhöht werden kann. Zur spektralen Anpassung der Strahlung an die photobiologische Anwendung werden Kaltlichtspiegel und IR-Reflektoren zumeist aus Aluminiummaterialien eingesetzt /107/.

4.1.2 Lampenbetrieb, Einbrennzeiten, Alterung von Lampen

Die Höhe der abgegebenen Strahlungsleistung von Lampen verändert sich im Laufe des Einbrennvorgangs und ihrer Lebensdauer. Für die Zuverlässigkeit von Dosis-Wirkungs-Relationen in der Photomedizin sind genaue Kenntnisse über Einbrenn- und Lebensdauerverhalten erforderlich. Die Lebensdauereigenschaften von Glühlampen werden u. a. durch die Abtragung des Glühmaterials und der damit verbundenen Schwärzung des Lampenkolbens bestimmt. Beim Betrieb von Gasentladungslampen kann es zur Veränderungen der Höhe und Spektraleigenschaften der emittierten Strahlung durch Diffusionsprozesse der Füllungskomponenten, Abtragung der Elektroden- oder Brennermaterialien in Abhängigkeit von Schalthäufigkeit, elektrische Betriebsbedingungen oder durch Veränderung der Brennlage kommen. Die Herstellerangaben der Mindestlebensdauer von Strahlern beziehen sich auf definierte Betriebsbedingungen und werden in Brenndauer-versuchen mit festem Schaltrhythmus (z. B. 11 h an, 1 h aus) und beim Betrieb mit Nennleistung festgestellt.

Für Lichtmessungen an Glühlampen wird durch DIN 5032 Teil 2 /31/ eine Alterungszeit von 1 % der Nennlebensdauer und mindestens 1 h und eine Einbrennzeit von 1 bis 15 min bei Einstellung der Nennspannung vorgeschlagen. Für Leuchtstofflampen werden an gleicher Stelle eine Einbrennzeit von 15 min. und eine Alterung von 100 h, für Halogen-Metaldampflampen Einbrennzeiten zwischen 10 bis 30 min. empfohlen. In DIN 5050 Teil 1 werden für Messungen zur Kennzeichnung von Solarien und Heimsonnen eine Einbrennzeit von mindestens 0,5 h und die Alterung von neuen Bestrahlungsgeräten unter Nennbetriebsbedingungen von 50 h vorgeschlagen. Beim Einsatz von Entladungsquellen in Bestrahlungsgeräten ist es empfehlenswert, durch regelmäßige Messungen der erzeugten Bestrahlungsstärke das Alterungsverhalten zu kontrollieren. Zur Verhinderung von Ungleichmäßigkeiten der Bestrahlungsstärke über die strahlende Fläche sollten alle Strahlungsquellen gleichzeitig ausgetauscht werden.

Das Einbrennverhalten von diesen Strahlungsquellen hängt von der Geschwindigkeit der Ionisierungsprozesse der Füllkomponenten ab. Für eine Leuchtstofflampe, die in Solarien eingesetzt wird ist das spektrale Anlaufverhalten in Abb. 4-6 dargestellt. Besonders bei medizinischen Bestrahlungsgeräten ist darauf zu achten, die Behandlung nur nach der Einbrennzeit der Strahlungsquellen zu beginnen. Eine Kontrolle der Einbrenndauer und auch des Alterungsverhalten können zuverlässig mit Hilfe von integralen Empfängern (UV-Meter, Luxmeter) erfolgen.

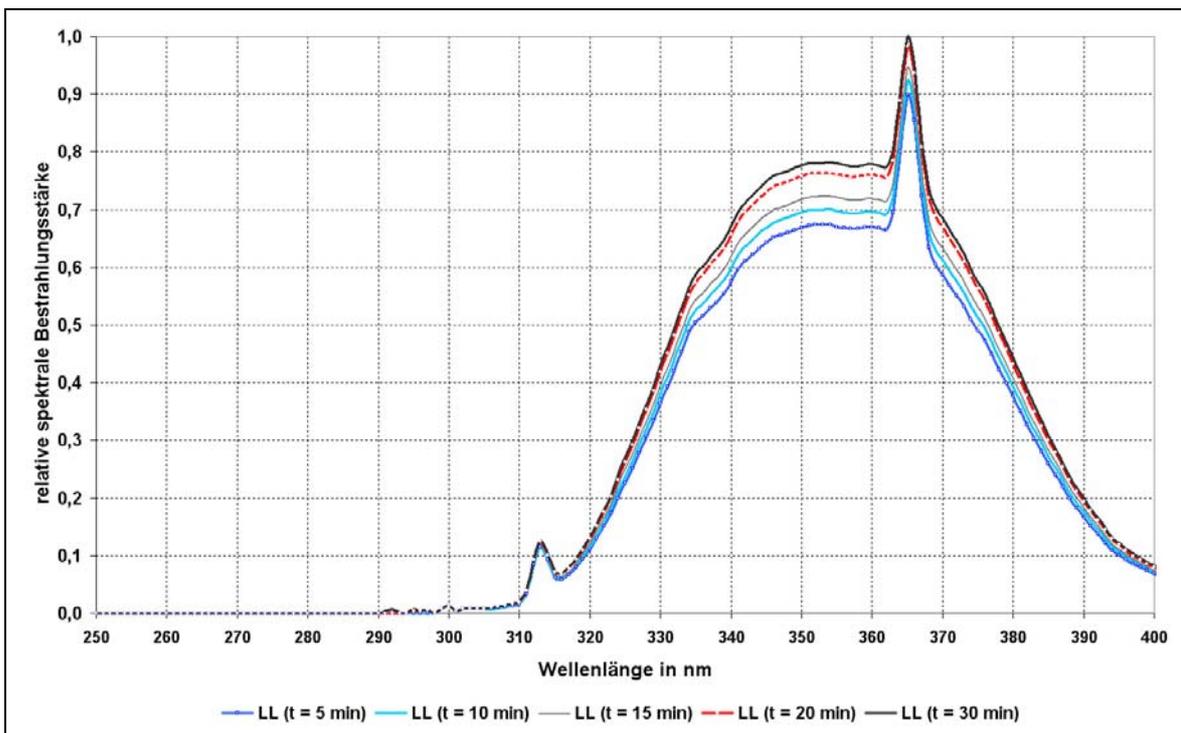


Abb. 4-6: Anlaufverhalten einer Leuchtstofflampe ($P = 100 \text{ W}$) für Solarien

4.1.3 Materialien

4.1.3.1 Filtermaterialien

Die materialspezifischen Kennzahlen von Filtern hängen von einer Reihe von Einflussgrößen ab: hierzu zählen Filter- und Schichtdicke sowie Oberflächenzustand (sauber, trocken, glatt, strukturiert) der benutzten Materialien. Bei der Berechnung der spektralen und örtlichen Strahlungsverteilungen sind daneben die Eigenschaften der benutzten Strahlungsquellen wie die spektrale Strahlungsverteilung der benutzten Strahlungsquelle, der Polarisationszustand und Art des Strahlungseinfalls zu berücksichtigen.

Allgemein kann man Filtermaterialien in Langpass-, Kurzpass- und Bandpassfilter unterteilen. Der Bereich hoher spektraler Transmission ist bei Kurzpassfiltern im kurzwelligen Bereich der optischen Strahlung, wohingegen das Material im langwelligen Spektrum (der Sperrbereich) durch seine Reflektions-, Absorptions- und Streueigenschaften kaum oder keine Strahlungsanteile durchlässt. Bei Langpassfiltern verhalten sich Sperr- und Passbereich umgekehrt. Bandpassfilter besitzen nur in einem begrenzten Bereich des Spektrums Durchlasscharakter und sperren in den übrigen Spektralgebieten. Die spektrale Durchlässigkeit von Filtern werden durch den spektralen Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ und den Reintransmissionsgrad $\tau_i(\lambda)$ beschrieben. Beim spektralen Reintransmissionsgrad werden die

Verluste durch Reflektionen nicht mitberücksichtigt. Diese können durch den Reflektionsgrad angegeben werden, für den gilt:

$$P(\lambda) = \frac{\tau(\lambda)}{\tau_i(\lambda)} \quad \text{Gl. 4-2}$$

Für den senkrechten Lichteinfall und unter der Annahme homogener Absorption lässt sich nach dem Gesetz von Bouguer und Lambert für zwei Absorptionsfilter gleicher Zusammensetzung die notwendige Schichtdicke d_1 für einen gewünschten Transmissionsgrad berechnen, falls der Transmissionsgrad für eine Schichtdicke d_2 bekannt ist:

$$d_1 = d_2 \cdot \frac{\lg(\tau_{d_1}(\lambda)) - \lg(P(\lambda))}{\lg(\tau_{d_2}(\lambda))} \quad \text{Gl. 4-3}$$

Als eine weitere Kenngröße zur Beschreibung von Filtermaterialien gilt die Kantenwellenlänge λ_c , bei der nach DIN /37/ der Wert des Reintransmissionsgrades $\tau_i(\lambda)$ zwischen dem Durchlass- und Sperrbereich die Hälfte des Maximalwertes beträgt. Die Veränderung des Wertes des Reintransmissionsgrades $\tau_i(\lambda)$ im Bereich der Kantenwellenlänge wird durch die Steilheit S -in % pro nm- angegeben.

Für die selektive Aussonderung von Spektralanteilen werden in der Bestrahlungsgerätetechnik vor allem Gläser und Kunststoffe benutzt. Die Filtergläser, die im betrachteten Spektralbereich zwischen UV-C und IR-A zum Einsatz kommen, basieren gewöhnlich auf Oxid-Verbindungen (Siliziumoxid, Bortrioxid, Germaniumdioxid u.a.) und Silikat- oder Phosphatverbindungen. Im IR-B werden Chalkogenid und im IR-C Arsensulfid als Grundmaterial für Glasverbindungen benutzt. Gläser mit unterschiedlichen Eigenschaften erhält man durch die Variation der eingesetzten Oxide, die die Anordnung des Silizium und des Sauerstoffs innerhalb der Verbindung bestimmen. Fensterglas besteht aus der Mischung von Quarzsand (SiO_2), Soda (Na_2CO_3) und Kalk (CaCO_3); Quarz besteht aus trigonal angeordnetem Siliziumoxid. Unzureichende Ausdehnungskoeffizienten sowie schlechte Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Gläser können aufgrund örtlich unterschiedlicher IR-Absorption zur Biegung oder Brüchen von Glasfiltern führen. Dabei können Temperaturunterschiede zwischen der zum Strahler zu- oder abgewandten Seite aber auch zwischen der Mitte und Rand der Gläser auftreten. Die thermische Stabilität der Glasfilter wird durch das Herstellungsverfahren wesentlich bestimmt.

Bei der Glasherstellung liegt oberhalb der Temperatur T_s eine Schmelze mit thermodynamischem Gleichgewicht vor. Im Abkühlungsprozess kommt es ab einer bestimmten von

der Zusammensetzung des Materials abhängigen Transformationstemperatur T_g zur Kristallisation, die bei kleinen Abkühlgeschwindigkeiten wiederum zu einem Zustand thermischen Gleichgewichts führt (siehe Abb. 4-7).

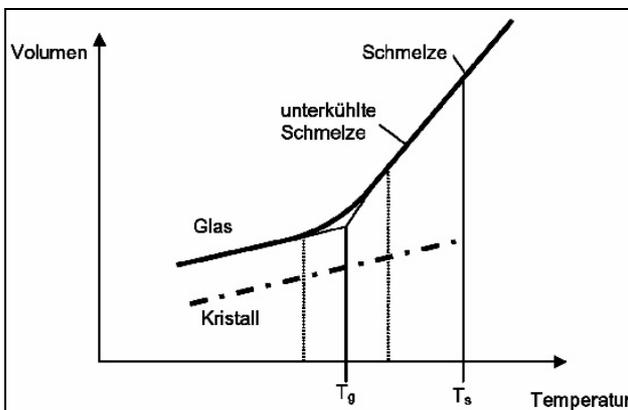


Abb. 4-7: Volumen-Temperaturverhalten von Glas und Keramik nach /45/

Verläuft doch der Abkühlprozess zeitlich schnell, wird die Schmelze unterkühlt und der Schmelzprozess lässt sich zu tiefern Temperaturen hin verlängern. Als Folge dieses Härtingsprozesses entsteht auf der Glasoberfläche gleichmäßige Druckspannung und im Inneren eine diese kompensierende Zugspannung. Ein derart verarbeitetes Glasmaterial besitzt eine höhere Biegefestigkeit, da eine äußerliche Zugbelastung erst oberhalb nach der Kompensation der eingepprägten Oberflächendruckspannung wirksam wird. In Abb. 4-8 sind beispielhaft die spektralen Absorptionseigenschaften einiger Glasfilter dargestellt.

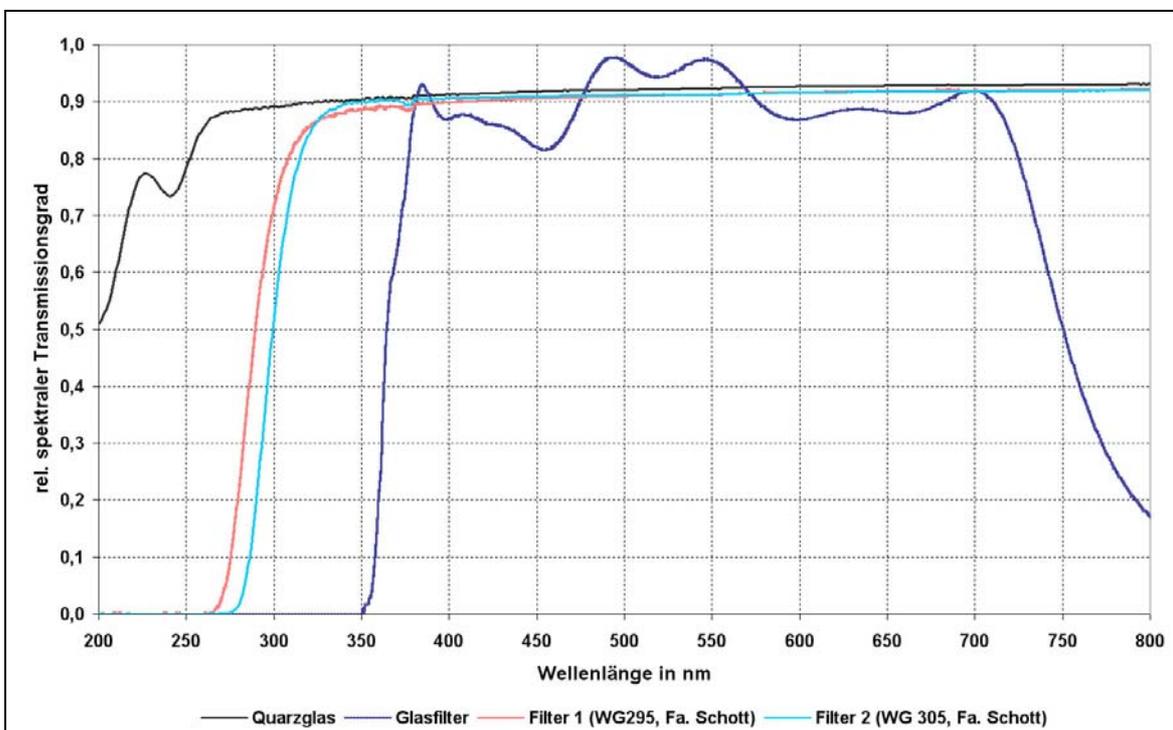


Abb. 4-8: Transmissionseigenschaften von Glasfiltern

Kunststoffe sind im Gegensatz zu Glasfiltern mechanisch beständiger und in der Verarbeitung vorteilhafter. Thermoplaste wie Plexiglas (PMMA) und Makrolon (PC) werden als Abdeckungen für Leuchten eingesetzt. Diese Stoffe vergilben und verspröden jedoch unter UV-Exposition [134]. Dahingegen zeichnet sich Polyvinylchlorid (PVC) als ein amorpher, chemisch beständiger und physiologisch unbedenklicher Kunststoff aus, der zudem durch je nach Verarbeitung auch als UV-Filter weiten Einsatz findet. Zumeist werden Modifikationen von PVC in Leuchtstoffsystemen wie z. B. bei Solarien zum Berührungsschutz und UV-Filterung und als Material für Liegeflächen oder Solarienhimmel benutzt. In medizinischen UV-Bestrahlungsgeräten wie Bestrahlungskabinen und Teilkörperbestrahlungsgeräten sowie in Heimsolarien mit Leuchtstofflampensystemen werden zur spektralen Anpassung der Geräte an die gewünschte Wirkungsfunktion die gewünschten Spektren neben der Wahl der Leuchtstoffe der eingesetzten Lampen (Strahler) auch durch die spektrale Filterung mit Kunststoffen erzielt.

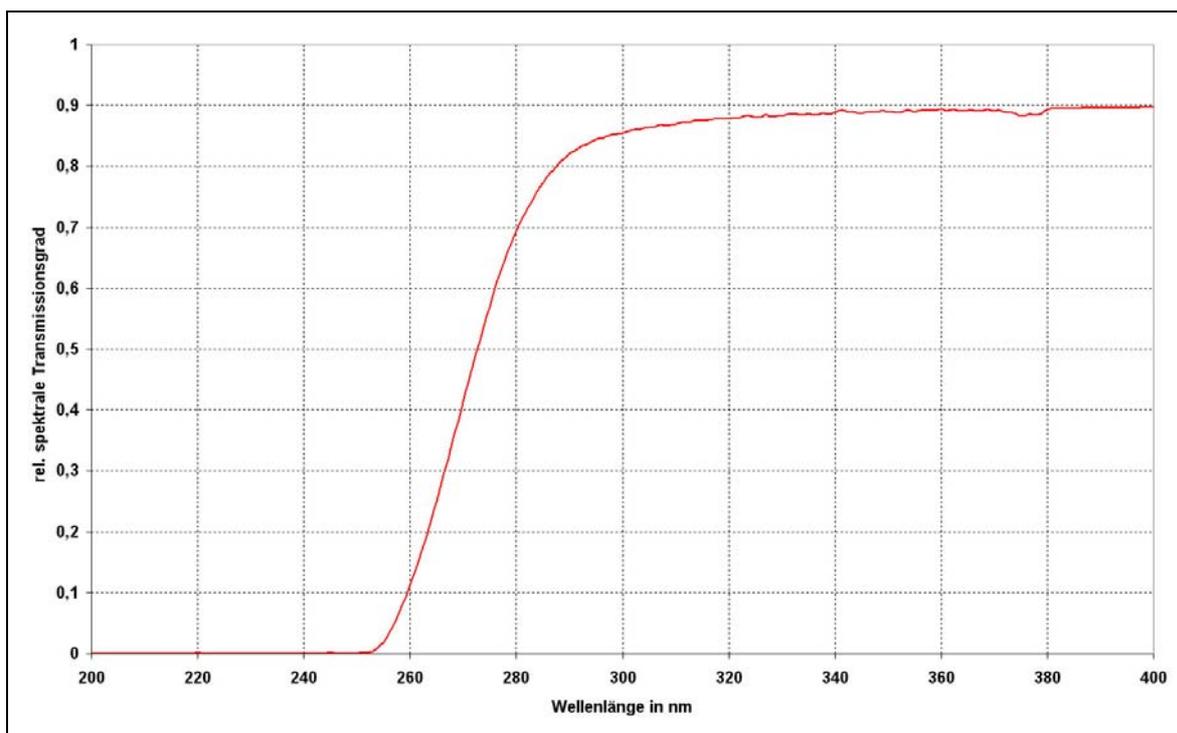


Abb. 4-9: Kunststofffilter eines UV-Sonnensimulators zur Vitamin D₃-Photosynthese

Bei Lichttherapiegeräten werden Kunststofffilter zur spektralen Aussonderung der unerwünschten Strahlungsanteile im UV und als streuende Materialien zur Vermeidung hoher Leuchtdichten eingesetzt (Abb. 4-10).

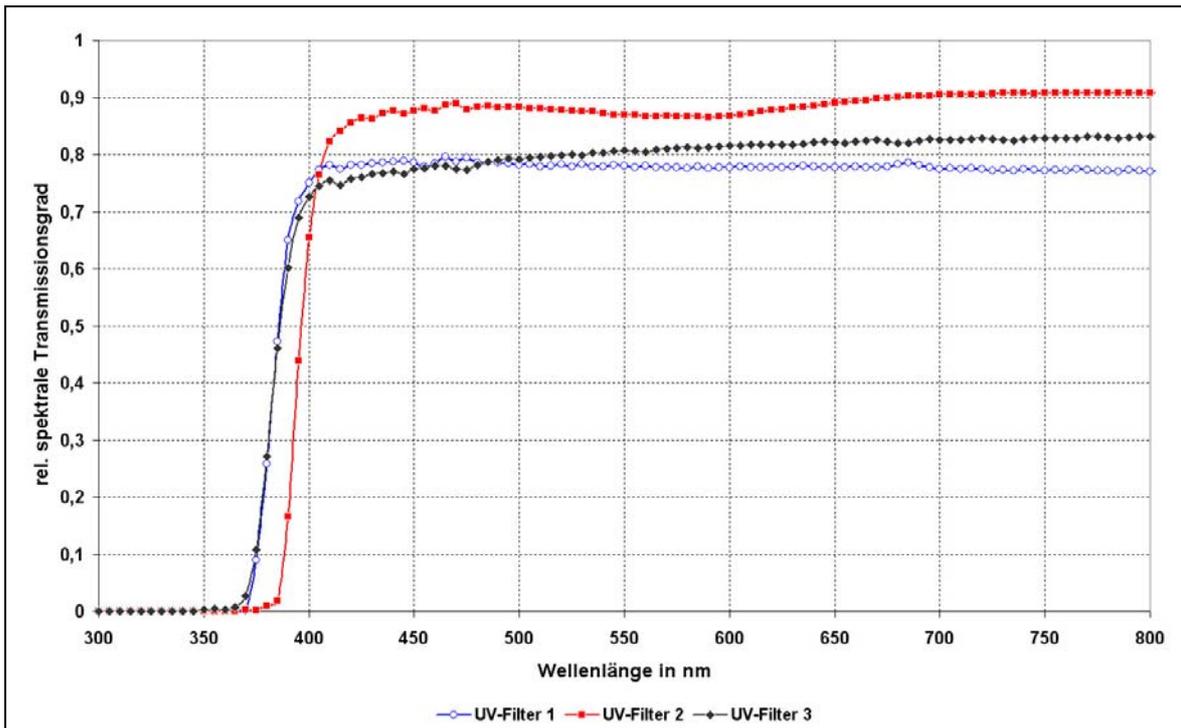


Abb. 4-10: Spektrale Eigenschaften einiger Kunststofffilter von Lichttherapiegeräten

Optische Filter können auch durch Aufbringen von solchen dünnen dielektrischen Interferenzschichten auf Trägermaterialien hergestellt werden. Die Überlagerung von an der Ober – und Unterseite von dünnen Schichten reflektierter optischer Strahlung führt zu Interferenzerscheinungen, falls die Brechzahlen der Schichten sich voneinander unterscheiden. Die spektralen Materialeigenschaften von solchen **beschichteten Gläsern** hängen neben den Brechzahlen, Anzahl und der Dicke der auf das Trägermaterial aufgetragenen Schichten auch vom Einfallswinkel der Strahlung ε_2 ab. Die Wahl des Trägermaterials wird durch den Reinheitsgrad, den Alkaliengehalt, die Eigenfluoreszenz sowie die dielektrischen Eigenschaften bestimmt. Neben Glaskeramiken, Quarz- und Floatgläsern werden hauptsächlich Borosilikate als Plansubstrate oder in Röhrenform zur Beschichtung herangezogen.

Zur Aufbringung des dielektrischen den Herstellungsverfahren werden Vakuum-Aufdampf-Verfahren, Kathodenzerstäuben (Sputtern) und Sol-Gel-Beschichtungsverfahren herangezogen. Beim Vakuum-Aufdampf-Verfahren wird das Beschichtungsmaterial im Vakuum erhitzt bis der erreichte Dampfdruck die gewünschte Aufdampfrate ergibt. Beim Kathodenzerstäuben wird durch eine elektrische Entladung von dem als Kathode fungierenden Material abgetragen und auf das zu beschichtende Material (Anode) aufgetragen. Beim Sol-Gel-Verfahren werden flüssige Metallverbindungen auf der Glasoberfläche nie-

dergeschlagen und anschließend in einem Temperaturprozess in fest haftende Metalloxi-
doberflächenfilme umgewandelt.

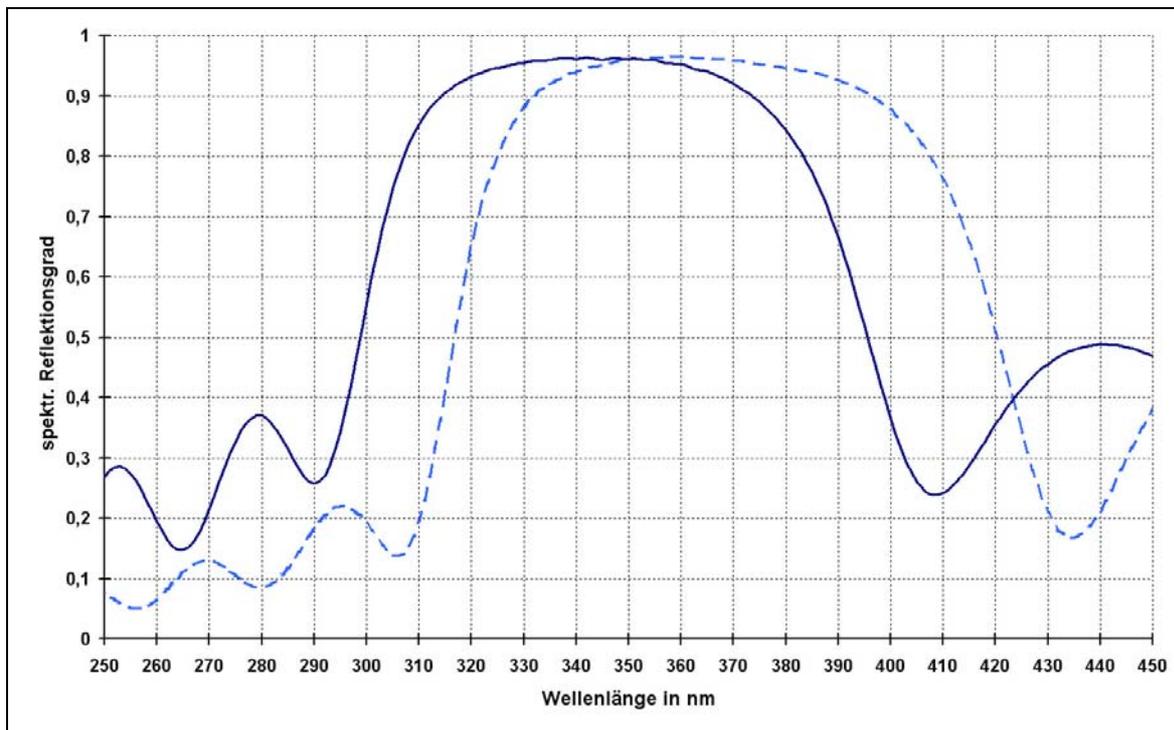


Abb. 4-11: Spektraler Reflektionsgrad von 2 beschichteten Gläsern (UV-Spiegel)

Beschichtete Gläser kommen in der Phototherapie-technik vor allem als Wärmeschutz-
und UV-Filter zum Einsatz. Sie zeichnen sich durch ihr geringeres Absorptionsvermögen
und hohe thermische Beständigkeit (Transformationstemperatur: $\approx 500\text{ °C}$) aus.

Im Gegensatz zu beschichteten Gläsern werden bei **Flüssigkeitsfiltern** die Absorptions-
vermögen von Lösungsmitteln zur Filterung von optischer Strahlung herangezogen. Auf-
grund geringer Strahlungsabsorption im UV und VIS (siehe Abb. 4-12) und großer Wär-
mekapazität wird als Lösungsmittel zumeist Wasser benutzt. Zudem eignet sich Wasser
zur Lösung von vielen organischen und anorganischen Verbindungen. Nach dem Gesetz
von Bouguer und Lambert lässt sich für eine Lösung mit der Stoffmengenkonzentration c
in mol/l und dem molaren dekadischen Absorptionskoeffizienten $\kappa(\lambda)$ der dekadischer
Absorptionsmaß $a(\lambda)$ angeben:

$$a(\lambda) = \kappa(\lambda) \cdot c \quad \text{Gl. 4-4}$$

Damit folgt für den Reintransmissionsgrad $\tau_i(\lambda)$ einer Lösung mit der Schichtdicke d nach
/26/:

$$\tau_i(\lambda) = 10^{-a(\lambda) \cdot d} \quad \text{Gl. 4-5}$$

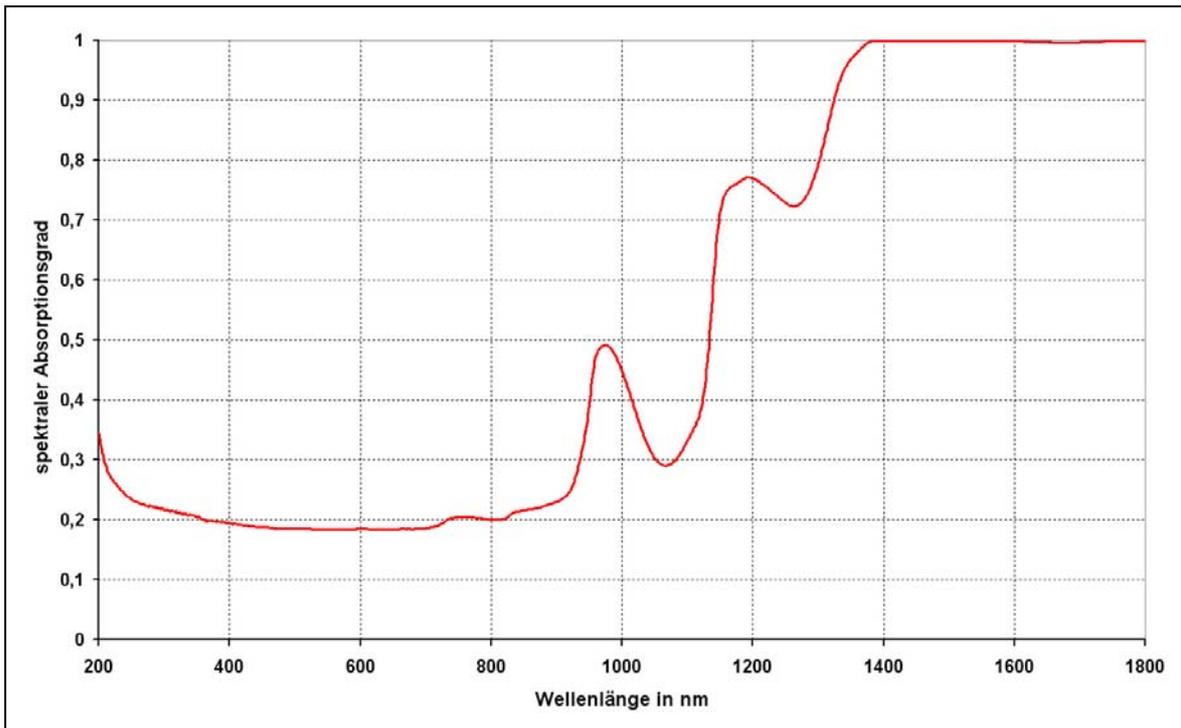


Abb. 4-12: Spektraler Absorptionsgrad vom destillierten Wasser

Die Absorptioncharakteristik von Flüssigkeitsfiltern hängt bei sehr kleinen Konzentrationen der Lösung ausschließlich von der Schichtdicke und der Stoffmengenkonzentration ab. Bei höheren Konzentrationen entstehen durch Wechselwirkungsmechanismen in der Lösung Abweichungen von der Beziehung nach Gl. 4-5. Aufgrund der Lage der Absorptionsbanden des Wassers werden Flüssigkeitsfilter mit Wasser zur Filterung der Strahlungsanteile im IR-B und IR-C bzw. zur Erzeugung gewünschter Strahlungsanteile in IR-Bestrahlungsquellen benutzt. Als technische Ausführung kommen Wasserfilter als Küvetten in Röhrenform zum Einsatz. Bei höheren absorbierten Strahlungsleistungen werden geschlossene Wasserkreisläufe mit Kühlelementen zur Abführung der Wärme benutzt.

4.1.3.2 Reflektormaterialien

Reflektormaterialien in der Leuchten- und Bestrahlungsgerätetechnik beeinflussen die Licht- bzw. Strahlungsrichtung, um eine gewünschte Licht- und Strahlungsverteilung in der Anwendungsebene zu erzeugen. Die spektralen Eigenschaften der benutzten Reflektormaterialien können außerdem zum Zwecke der spektralen Aussonderung von Strahlungsanteilen benutzt werden (z. B. IR-Filtrierung mit Kaltlichtreflektoren). Bei der Planung und Berechnung von Reflektorkonstruktionen sind neben Kenntnissen der technischen Optik auch spektrale und örtliche Verteilungsfunktionen der eingesetzten Strahlungsquellen erforderlich.

Beim Einsatz von Leuchtstofflampen in Leuchten und Bestrahlungsgeräten werden rinnenförmige, je nach gewünschter Strahlungsleistungsverteilungskurve gerichtet oder gemischt reflektierende Reflektormaterialien benutzt. Zumeist sind diese externen Reflektoren mit einer Öffnung zur Wärmeabfuhr versehen. Die Strahlungsrichtung wird durch die geometrische Form des Reflektors bestimmt. Bei mehrlampigen Geräteausführungen kann die Bestrahlungsstärke, die pro Lampe in der Anwendungsebene erzeugt wird, durch die Verringerung der Reflektoröffnungen und der damit verbundenen Strahlungsabsorption gesteigert werden. Eine weitere Erhöhung der Strahlungsausbeute in der Nutzebene wird durch die innen- oder außenseitige Beschlämmung der Lampenkolben mit einer reflektierenden Schicht erreicht. Beim Einsatz solcher Leuchtstofflampen kann der Bauabstand zwischen den einzelnen Strahlern verringert und damit die thermischen Betriebsbedingungen verbessert werden.

Als Reflektormaterialien für Hochdruckentladungslampen in Bestrahlungsgeräten eignen sich streuende Oberflächen. Die gestreute Reflektion kann durch Feinstrukturierungen von Blechen erreicht werden. Zu den Strukturformen zählen gewalzte, mattierte, gebürstete Oberflächen. Die Lichtlenkung wird durch die Form des Reflektors (parabolisch, elliptisch, hyperbolisch, kreisförmig oder Mischformen) und den Ort der Aufbringung der Strahlungsquellen bestimmt.

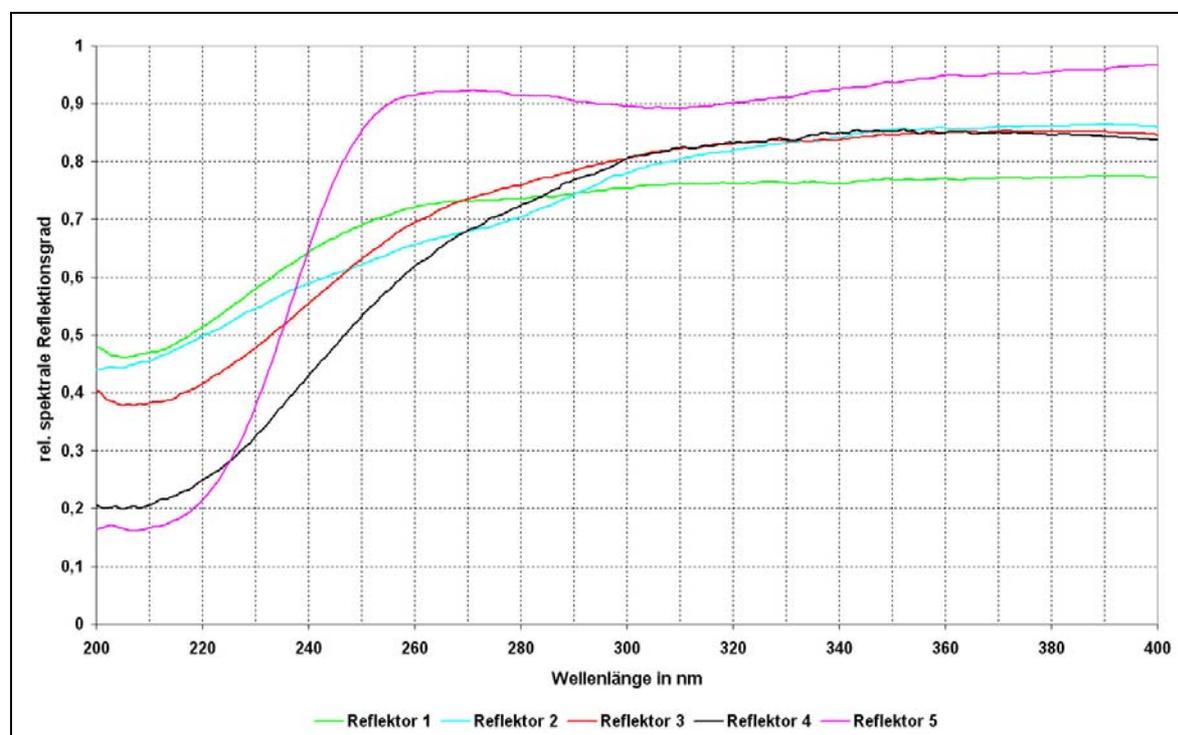


Abb. 4-13: Aluminiumreflektoren für Anwendungen im UV

Bei Anwendungen im UV sind Strahlungsanteile im VIS wegen möglicher Blendungwirkungen und im IR wegen thermischer Belastung unerwünscht. Als Wandverkleidung von Bestrahlungskabinen zeigen sich diffus reflektierende Oberflächen besonders geeignet, weil dadurch neben der Verringerung der Blendungserscheinungen durch die bessere räumliche Verteilung der Strahlung auch die Wirksamkeit der Bestrahlung gesteigert werden kann. Zudem muss die Abhängigkeit der Reflektion vom Strahlungseinfallswinkel (Interferenzeigenschaften) mitbetrachtet werden, da hierdurch die Strahlungsausbeute in der Nutzebene unnötig verschlechtert werden kann.

Als Reflektormaterial wird wegen seinen guten Reflektionseigenschaften und der relativ einfachen Verarbeitung Aluminium bevorzugt. Als Nachteile erweisen sich die mechanische Unstabilität und die Korrosionsanfälligkeit dieses Materials. Um diese Nachteile zu beheben wird daher in industrieller Verarbeitung auf ein Aluminiumgrundmaterial eine zweite Schicht bestehend aus Reinaluminium (99,99 %) aufgedampft und anschließend im Säurebad eine Oxydschicht von ca. 1,5 µm Schichtdicke erzeugt. Durch weitere elektrochemische und mechanische Prozesse kann die Oberflächenstruktur und Spektralcharakteristik des Aluminiums angepasst werden. Die spektralen Reflektionseigenschaften einiger Aluminiummaterialien, die hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz beim UV-Sonnensimulator zur Vitamin D₃-Photosynthese untersucht wurden, sind in Abb. 4-13 dargestellt.

4.2 Sonnensimulator zur Vitamin D₃-Photosynthese

Die Untersuchungen von Grothmann /55/ haben gezeigt, dass unter Berücksichtigung der Grenzwerte und Wirkungsspektren des Strahlenschutzes das geeignetste Spektrum zur Vitamin D₃-Photosynthese das terrestrische Sonnenspektrum ist. Bis zur Erzeugung eines UV-Erythems ist die Vitamin D₃-Photosynthese bei Solareinstrahlung optimal. Herkömmliche UV-Bestrahlungskabinen mit Leuchtstofflampensystemen sind dagegen als Bestrahlungsgeräte zur Vitamin D₃-Photosynthese nur beschränkt einsetzbar; wegen fehlender spektraler Anteile in dem interessierenden Bereich des UV-B sind zu lange Bestrahlungszeiten im Laufe einer Bestrahlungsserie erforderlich. Bei Halogen-Metaldampflampensystemen ergeben sich die oben aufgezählten Nachteile bezüglich der Homogenität der Bestrahlung auf der Anwendungsebene sowie bei der Anpassung der emittierten Strahlung an den jeweiligen Nutzer durch Regulierung der Lampenleistung. Um diese in vorhandenen Bestrahlungsgeräten vorzufindenden Nachteile zu minimieren wurde im Rahmen dieser Arbeit eine UV-Bestrahlungskabine zur Vitamin D₃-Photosynthese entworfen und fertig gestellt, die spektral und materialtechnisch weitgehend an diese Anwendung angepasst ist.

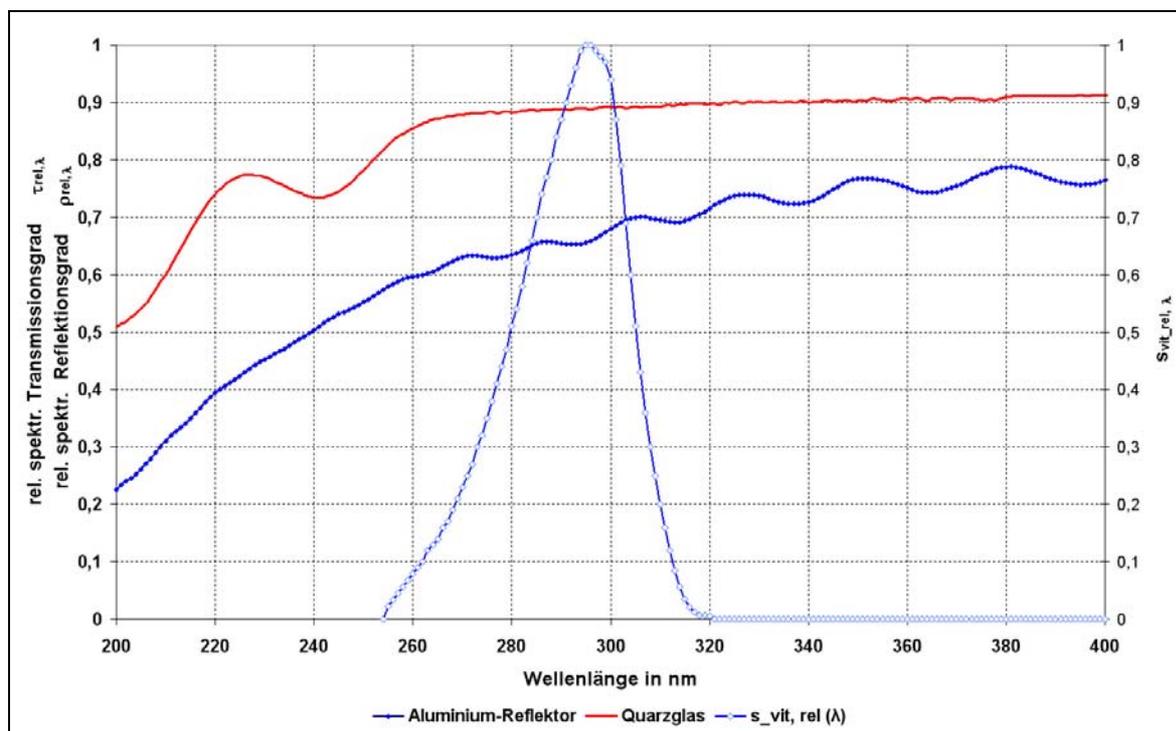


Abb. 4-14: Spektrale Materialeigenschaften der UV-Kabinenkomponenten

Die realisierte UV-Bestrahlungskabine besitzt eine Bauhöhe von 2 m und ist symmetrisch auf einer sechseckigen Grundfläche aufgebaut. Die Entfernung zwischen zwei gegenü-

berliegenden Seitenteilen beträgt jeweils 1,2 m. Die Innenfläche der Kabine ist mit einem speziellen, diffus reflektierenden Aluminiummaterial belegt. Die Reflektionseigenschaften des Aluminiummaterials sind spektral angepasst und im interessierenden Spektralbereich hoch (siehe Abb. 4-14). Aufgrund der diffusen Reflektion der Wände und des symmetrischen Aufbaus der Kabine werden die Patienten im Gegensatz zu kommerziellen Ausführungen von allen Seiten gleichmäßig bestrahlt. Zudem werden durch Schatter, die vor den UV-Strahlungsquellen angebracht sind, eine Direktbestrahlung der Patienten und somit die Belastung durch hohe Leuchtdichten sowie die Gefährdung einer Augenschädigung minimiert.

Neben den spektralen Eigenschaften des Reflektormaterials werden zur Steigerung der Effektivität eines Bestrahlungsgerätes Filtermaterialien benötigt, deren Transmissionseigenschaften im Spektrum der Anwendung hohe Werte aufweisen. Zur Filterung der optischen Strahlung und zum Schutz der Anwender vor eventueller Zerstörung der eingesetzten Lampen wurden Quarzglasfilter eingesetzt, deren spektrale Transmissionseigenschaften in Abb. 4-14 dargestellt sind. Es wird deutlich, dass die wirksamen Strahlungsanteile zur Vitamin D₃-Synthese über das gesamte Wirkungsspektrum mit nahezu 90 % durchgelassen werden und die Transmission im UV-C abnimmt.

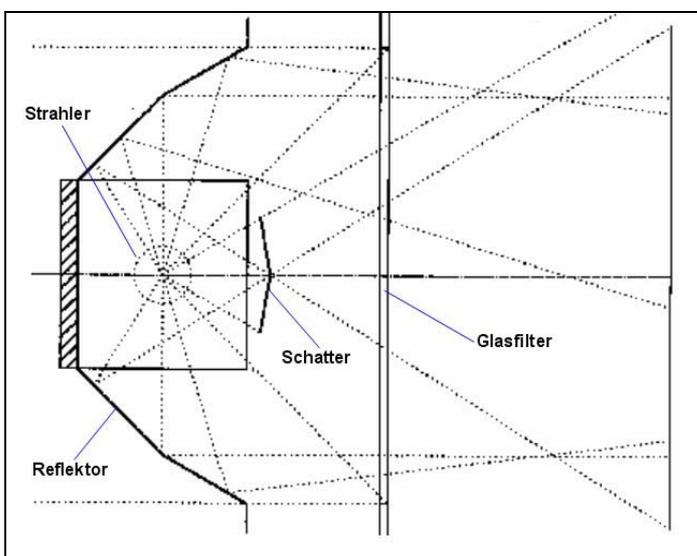


Abb. 4-15: Leuchtenkonstruktion für die UV-Bestrahlungskabine

Die Benutzung von Abluftkanälen empfiehlt sich nach /55/ bei großen Verlustleistungen ($P_{\text{ges}} > 10 \text{ kW}$). Bei einer Gesamtwirkleistung der Anlage von ca. 2,5 kW wurde hiervon abgesehen und zur Ableitung der entstehenden Wärme die Strahler an nach oben offenen Säulen angebracht. Am Fußende der drei Säulen wurden zur verbesserten Ableitung der Abwärme Kompaktventilatoren angebracht. Die konventionellen Vorschaltgeräte zur

Strombegrenzung, Zündgeräte sowie zur Blindleistungskompensation notwendigen Kondensatoren wurden an den Strahlersäulen installiert, womit die thermische Belastung des Kabineninnenraums minimiert wurde. Die Wirkung der Lüfter zur Wärmeabfuhr wurde anhand von Temperaturmessungen an verschiedenen Messpunkten an der Leuchtenkonstruktion untersucht. In Abb. 4-16 ist die zeitliche Veränderung der Temperatur über einen Zeitraum von 30 min. für den Betrieb mit und ohne Lüfter aufgetragen. Die Messwerte wurden dabei an einem Punkt zwischen dem Schatter und dem Strahler aufgenommen. Es wird deutlich, dass sich durch den Einsatz des Ventilators die Temperatur am Messpunkt um ca. 40 ° C reduziert, und sich das thermische Gleichgewicht nach ca. 5 min. (ohne Lüfter nach 15 min.) stationär einstellt.

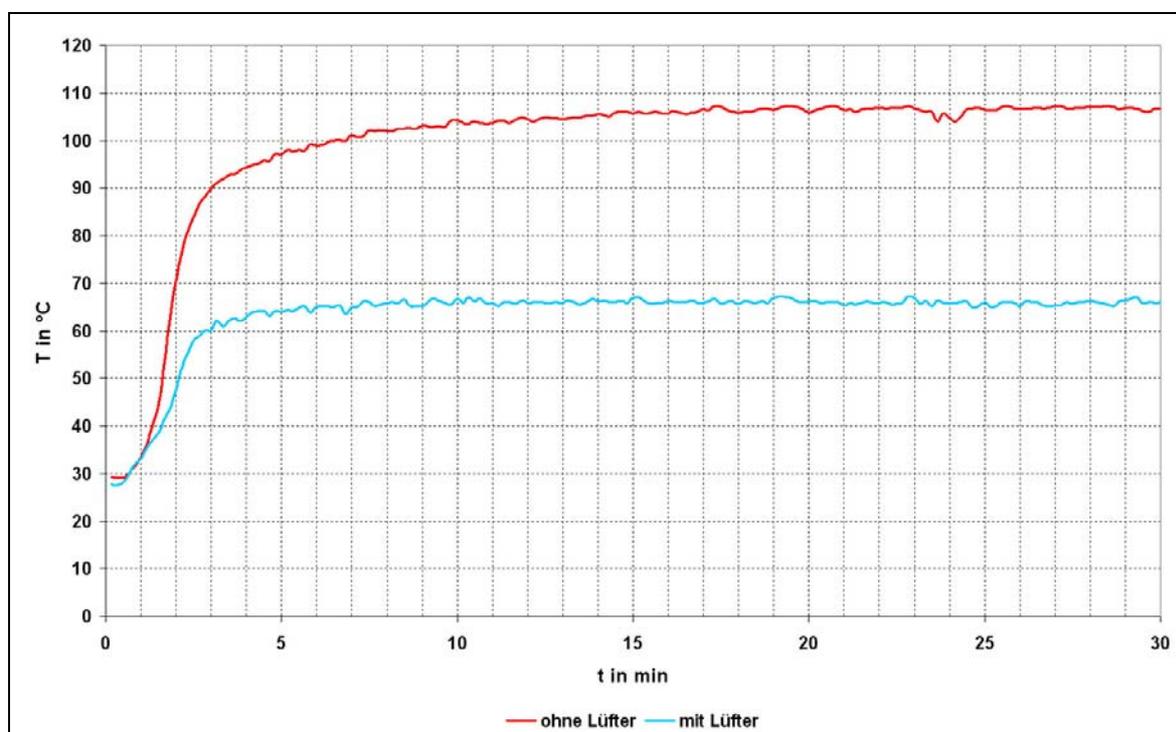


Abb. 4-16: Zeitlicher Temperaturverlauf an einem Strahler mit und ohne Lüfterbetrieb

Um eine wirksame Vitamin D₃-Photosynthese zu erzielen, ist Strahlung in einem bestimmten, eng begrenzten *Spektralbereich* des UV notwendig. Für die Auswahl der Strahler ist daher neben der elektrischen Leistung auch die spektrale Zusammensetzung der Strahlung ausschlaggebend. Das Verhältnis der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke mit der Vitamin D₃-wirksamen Bestrahlungsstärke ist für die Effektivität der Kabine von wesentlicher Bedeutung. Abb. 4-17 zeigt die spektrale Bestrahlungsstärke der eingesetzten Strahler auf einer Nutzebene im Abstand von 0,5 m in Abhängigkeit von der Wellenlänge sowie die dabei erzielten wirksamen spektralen Bestrahlungsstärken für das UV-Erythem und die Vitamin D₃-Photosynthese. Im Spektralbereich zwischen 298 nm - 322 nm ist die Vi-

tamin D₃-Wirksamkeit größer als die Erythemwirksamkeit. Dadurch liegt in diesem auch als „Therapiefenster“ bezeichneten Spektralbereich der Wert der Vitamin D₃-wirksamen Bestrahlungsstärke E_{Vd} über dem der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke E_{er} .

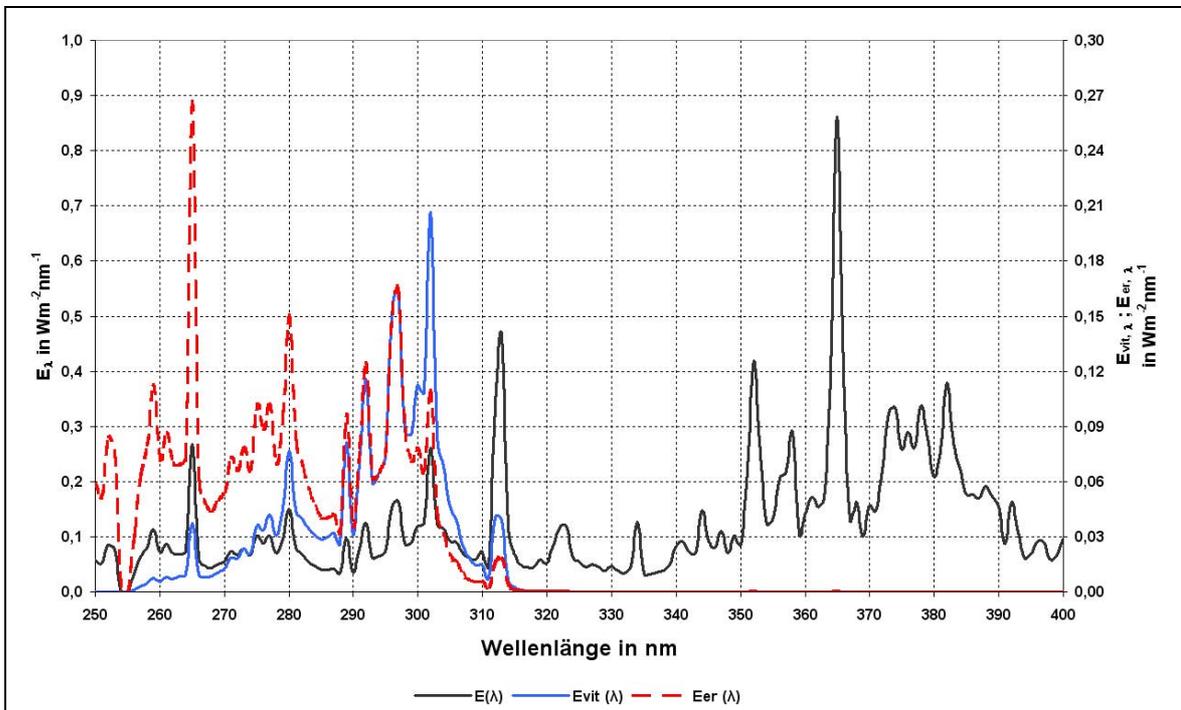


Abb. 4-17: Spektrale Bestrahlungsstärke und die erythem- und Vitamin D₃-wirksame Bestrahlungsstärke einer Strahlungsquelle in der Nutzebene bei $d = 0,5$ m

Anhand von spektralradiometrischen Messungen und numerischer Ermittlung der nötigen Bewertungsgrößen wurde die Anzahl von Strahlern auf 12 festgelegt. Bei der Festlegung der Strahleranzahl wurde die Minimierung der Bestrahlungszeiten berücksichtigt. Durch die Verwendung von einer größeren Anzahl von Strahlungsquellen und somit der Vergrößerung des Strahlungsfeldes (Installationshöhen: 0,5 m; 0,87 m; 1,23 m und 1,60 m) sowie der symmetrischen Anordnung der 3 Strahlersäulen konnte eine Verbesserung der Gleichmäßigkeit des Strahlungsfeldes auf der Anwendungsebene verwirklicht werden. Für drei verschiedene Messhöhen wurde (Kniehöhe: $h = 0,5$ m; Bauchhöhe: $h = 1,0$ m; Brusthöhe: $h = 1,5$ m) im geometrischen Mittelpunkt der Kabine und senkrecht zur Kabinenwand die spektralen Bestrahlungsstärkewerte aufgenommen. Diese Messungen wurden jeweils an Seitenteilen mit und ohne Strahleranbringung durchgeführt.

Die auf verschiedene Messhöhen und senkrecht zu Kabinenwänden mit bzw. ohne Strahlerinstallation aufgenommenen spektralen Bestrahlungsstärkewerte sind in Abb. 4-18 dargestellt. In Tabelle 4-3 sind die aus diesen Messwerten ermittelten Bewertungsgrößen zusammengefasst.

Optimierte Gerätetechniken für UV- und Lichttherapie

Tabelle 4-3: Bestrahlungsstärke in den Spektralbereichen UV-C (250 nm - 280 nm), UV-B (280 nm - 315 nm), UV-A (315 nm - 400 nm) sowie photobiologische Bewertungsgrößen im Mittelpunkt der Kabine für verschiedene Messhöhen und die angegebene Empfänger ausgerichtung

	h= 0,5 m (Reflektorseitig)	h= 1 m (Reflektorseitig)	h= 1,5 m Reflektorseitig)	h= 0,5 m (Lampenseitig)	h= 1 m (Lampenseitig)	h= 1,5 m (Lampenseitig)
E_{UV-A} (315 nm-400 nm) in W/m²	8,43	5,97	3,47	20,04	32,46	40,06
E_{UV-B} (280 nm-315 nm) in W/m²	2,09	1,54	0,85	4,90	8,27	11,36
E_{UV-C} (250 nm - 280 nm) in W/m²	9,5E-01	6,8E-01	3,7E-01	2,3E+00	3,8E+00	5,4E+00
E_{UVges} (250 nm - 400 nm) in W/m²	11,36	8,08	4,63	26,99	44,11	56,10
E_{Erythem} (250 nm - 320 nm) in W/m²	1,96	1,41	0,77	4,67	7,83	10,90
E_{Erythem} (320 nm - 400 nm) in W/m²	4,77E-03	3,37E-03	1,91E-03	1,16E-02	1,86E-02	2,32E-02
E_{Erythem} (250 nm - 400 nm) in W/m²	1,96	1,41	0,78	4,68	7,85	10,92
t_{erythem} in s	128	177	323	53	32	23
E_{Haut} (250 nm - 400 nm) in W/m²	1,34	0,97	0,53	3,21	5,39	7,54
t_{Haut} in s	22	31	57	9	6	4
E_{Auge} (250 nm - 400 nm) in W/m²	1,36	0,99	0,54	3,27	5,48	7,65
t_{Auge} in s	22	30	55	9	5	4
t_{Auge} in s	22	30	55	9	5	4
f_{SE}	6,5	4,7	2,6	15,6	26,2	36,3
E_{vd-D3} (250 nm - 400 nm) in W/m²	1,36	0,98	0,54	3,25	5,39	7,40

Bei der Variation der Höhe der ausgemessenen Nutzebenen zeigt sich, dass die Bestrahlungsstärken in Richtung der lampenseitigen Kabinenwände bei einer Höhe von 1,5 m maximal werden, wobei auf 1 m noch 81 % bzw. in einer Höhe von 0,5 m ca. 50 % dieser Strahlung gemessen werden. Die relativ niedrigen Werte auf 0,5 m Höhe resultieren daher, dass genau auf dieser Messhöhe die durch den Messempfänger erfasste Strahlung durch den Schatter begrenzt wird. Eine umgekehrte Verteilungscharakteristik ergibt sich für Kabinenwände ohne Strahleranbringung, bei denen die Strahlung auf der Nutzfläche in Kniehöhe maximal wird; die Bestrahlungsstärke auf der Nutzfläche in Bauchhöhe beträgt 41 % bzw. in Brusthöhe 71 % dieses Wertes.

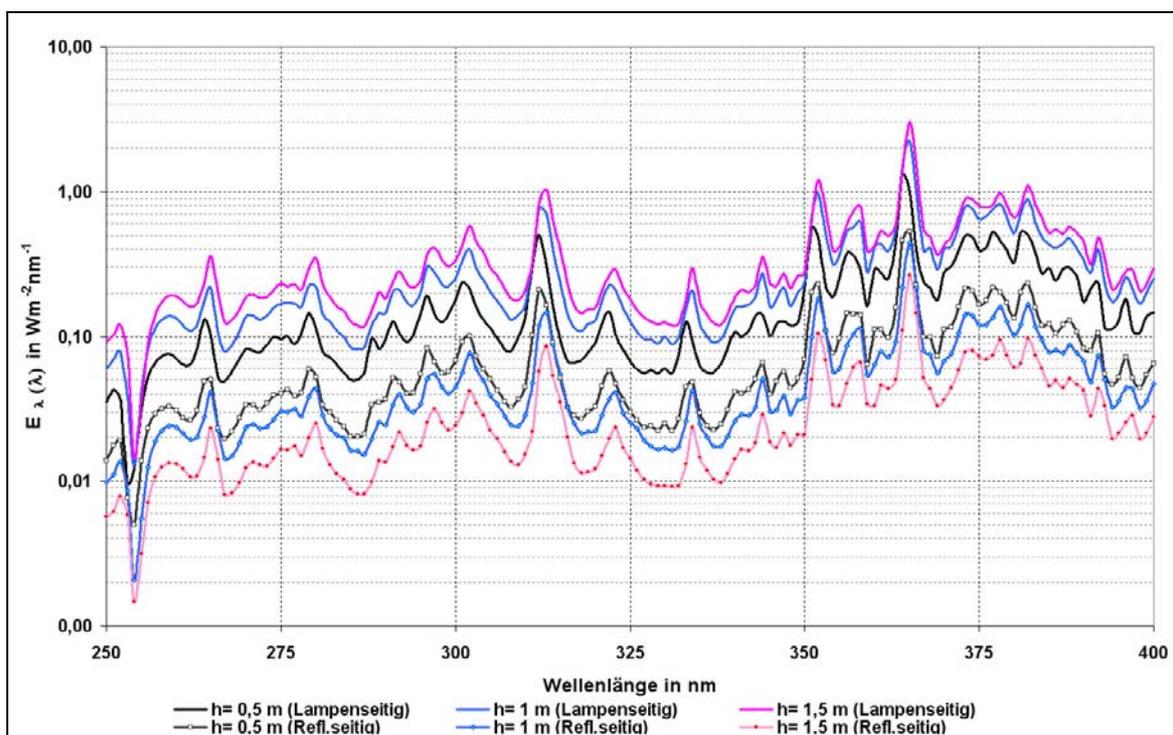


Abb. 4-18: Spektrale Bestrahlungsstärken der UV-Bestrahlungskabine im geom. Mittelpunkt in verschiedenen Höhen ($h = 0,5 \text{ m}$; 1 m ; $1,5 \text{ m}$) und in Richtung der Seiten mit und ohne Strahler

Bei Halogen-Metaldampflampen verändert sich bei Variation der Lampenleistung die spektrale Zusammensetzung der Strahlung infolge der Verschiebung der cold-spot-Temperatur. Des Weiteren wird die Lebensdauer der Strahler durch die hohe Beanspruchung der Elektroden bei geringen Leistungen negativ beeinflusst. Auch durch oben aufgeführte Methoden durch Zuschaltung von zusätzlichen Induktivitäten lässt sich die Gesamtstrahlungsleistung variieren. Aufgrund negativer Einflüsse auf die Lampen, ist diese Methode jedoch nur beschränkt einsetzbar. Einen Lösungsansatz zur Variation der emittierten Gesamtbestrahlungsstärke auf der Anwendungsebene bildet die Zu- und Abschaltung von einzelnen Strahlern unter Beibehaltung der Betriebsnennbedingungen. Für die

Realisierung von relativ kleinen Variationsstufen werden zum einen UV-Strahlungsquellen mit möglichst kleinen Lampenleistungen benötigt, zum anderen muss eine Anordnung zum Schalten von einzelnen Strahlern und/ oder Strahlergruppen vorhanden sein. Bei der vorliegenden UV-Bestrahlungskabine wurden nach eingehender Marktrecherche Halogen-Metaldampflampen mit geeigneter Spektralverteilung und einer Lampenwirkleistung von 150 W für den Einsatz als UV-Strahlungsquellen gewählt.

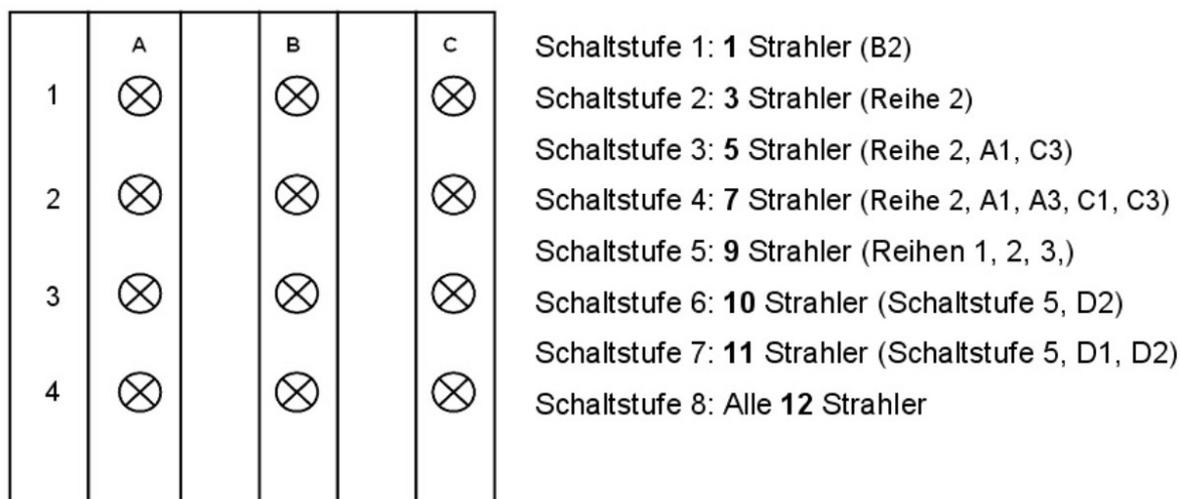


Abb. 4-19: Schaltzuordnung der UV-Bestrahlungskabine

Durch einen im Rahmen der vorliegenden Arbeit realisierten, elektronischen Schalter wurden die 12 Strahlungsquellen in 8 Strahlergruppen aufgeteilt, die durch eine Handbedienung anwählbar sind (Abb. 4-19). Die ersten 3 Stufen eignen sich für verschiedene Testbestrahlungen an Proben. Es wurde bei allen Schaltstufen versucht, die Strahlungsquellen räumlich gleichmäßig zu verteilen. Ab Schaltstufe 5 wird der Corpus des Patienten gleichmäßig von allen Seiten bestrahlt. Die höheren Schaltstufen erlauben mit einer Steigerung der Anzahl der sich in Betrieb befindenden Strahler um jeweils 1 die Anpassung der Strahlungsleistung an die gewünschte Dosis bzw. den Hauttyp, ohne die Bestrahlungszeit in weiten Bereichen zu verändern. Beim Betrieb der UV-Bestrahlungskabine bei Schalterstufen 4 bis 8 wurden auf einer Nutzfläche im geometrischen Mittelpunkt und einer Höhe von 1 m sowie jeweils senkrecht zum Mittelpunkt der strahlerseitigen bzw. reflektorseitigen Kabinenwände die spektralen Bestrahlungsstärken aufgenommen. Die Integralwerte der Bestrahlungsstärken im UV (250 nm – 400 nm) E_{UV} , die erythemwirksamen Bestrahlungsstärken E_{er} sowie die Vitamin D₃-wirksamen Bestrahlungsstärken E_{vd} für die einzelnen Messungen sind in Abb. 4-20 und Abb. 4-21 vergleichend dargestellt.

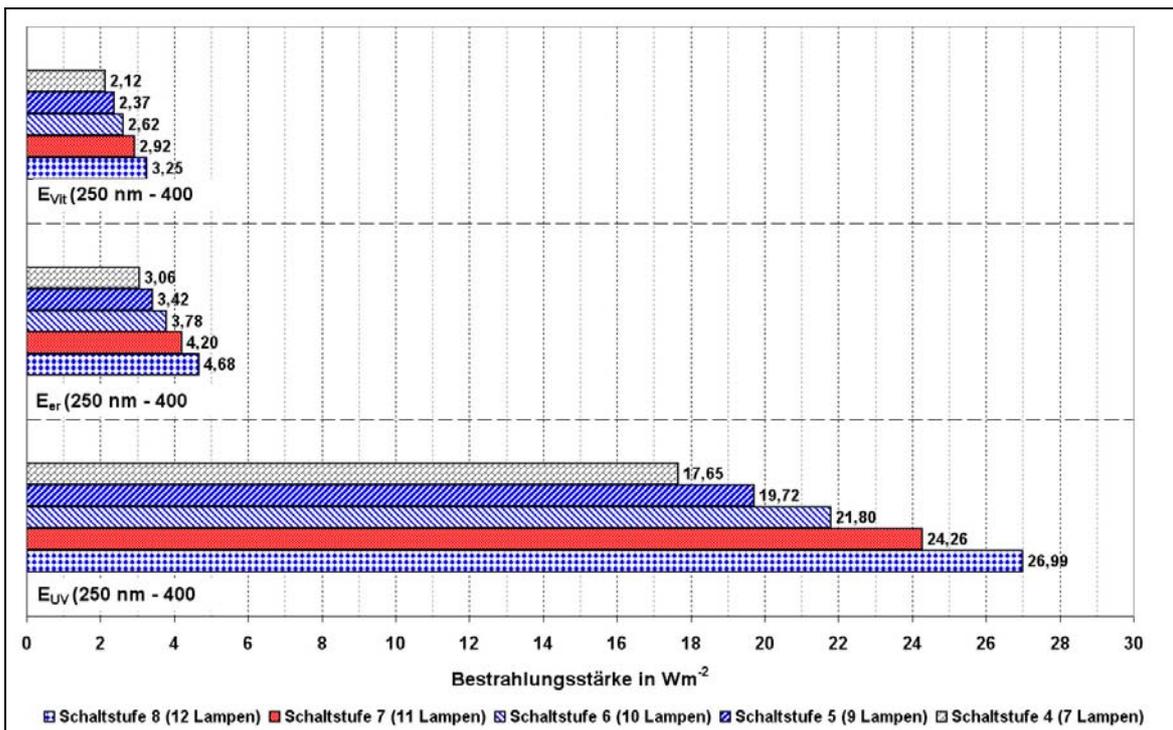


Abb. 4-20: Bestrahlungsstärken verschiedener Schaltstufen im geometrischen Mittelpunkt der Kabine und in einer Höhe $h = 1$ m senkrecht zu Strahlensäulen

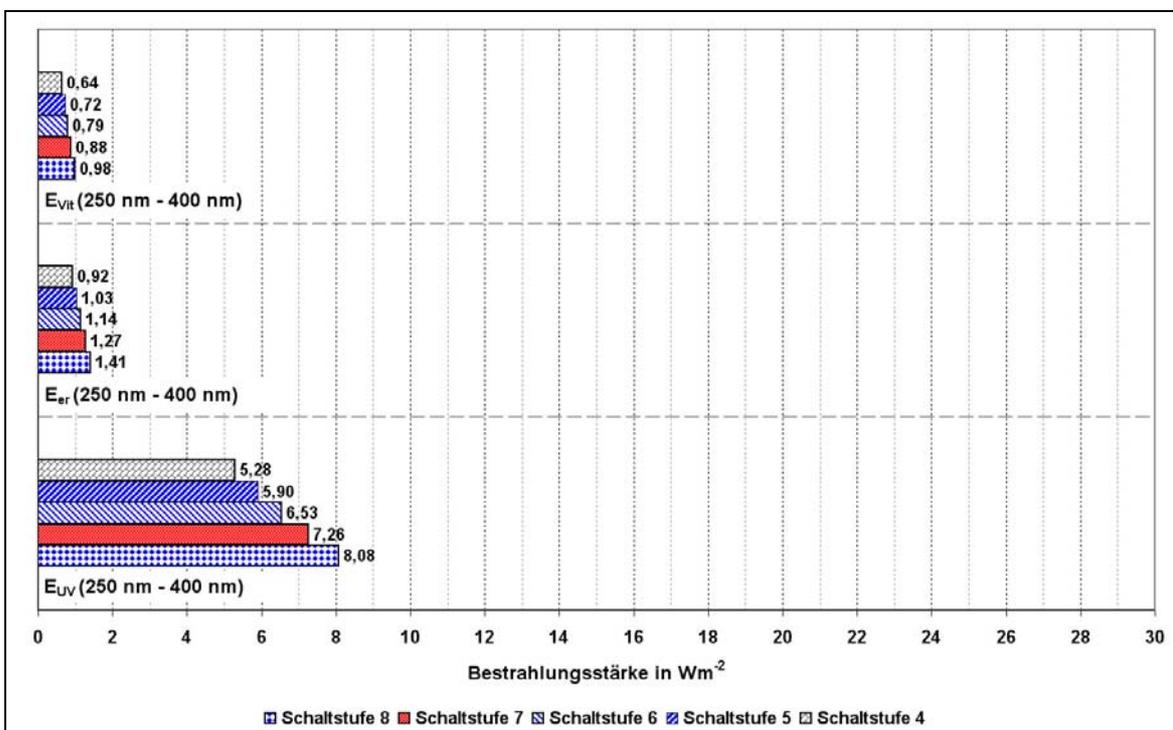


Abb. 4-21: Bestrahlungsstärken verschiedener Schaltstufen im geometrischen Mittelpunkt der Kabine und in einer Höhe $h = 1$ m senkrecht zu Reflektorseitenwänden

Die Schwellenzeiten für das UV-Erythem (Hauttyp II) sind in Tabelle 4-4 zusammengestellt. Es wird deutlich, dass durch die Erhöhung der Lampenanzahl von 7 (Schalterstufe IV) auf 12 (Schalterstufe VIII) die erythem- und Vitamin D₃-wirksame Bestrahlungsstärke um 35 % ansteigt.

Tabelle 4-4: Vergleich der Schwellenbestrahlungszeiten für das UV-Erythem $t_{s,er}$ in s für verschiedene Schaltstufen

	Schaltstufe IV	Schaltstufe V	Schaltstufe VI	Schaltstufe VII	Schaltstufe VIII
Kabinenwand mit Strahler	49 (100 %)	44 (90 %)	39 (79 %)	35 (71 %)	32 (65 %)
Kabinenwand ohne Strahler	271 (100 %)	242 (89 %)	219 (81 %)	197 (73 %)	177 (65 %)

Für den klinischen Einsatz spielt die einfache und eindeutige Bedienbarkeit von Bestrahlungsgeräten durch das Personal eine wichtige Rolle. Zu diesem Zweck wurde ein Bedienerpult mit einem Regelknopf zur Wahl der Schalterstellung, mit optischer Anzeige der Anzahl der betriebenen Strahler sowie eines Wahlknopfes zur Zeitsteuerung (0s, 60 s, 120 s, 180 s, 240 s, Dauerbetrieb) fertig gestellt. Zur Berücksichtigung des Lebensdauerverhaltens der eingesetzten Strahlungsquellen dient ein Betriebsstundenzähler.

In einem weiteren Optimierungsschritt wurde eine spezielle Software für die vorliegende UV-Bestrahlungskabine entwickelt. Wahlweise kann das Bestrahlungsgerät über die Bedieneinheit oder durch den Anschluss über eine serielle Schnittstelle am PC gesteuert werden. Das Bedienerprogramm ermöglicht eine weitgehende Anpassung der Bestrahlung an die zu behandelnde Person. Durch die Eingabe der persönlichen Daten (u.a. Hauttypen), der vorgesehenen Anfangsdosis, der Anzahl vorgesehener Bestrahlungen und der Steigerungsrate der Dosis wird durch das Programm für den jeweiligen Patienten ein Bestrahlungsplan entworfen. Der Patient wird anhand seines Namens oder der durch das Programm zugewiesenen Patientennummer identifiziert und die jeweilige Bestrahlungssitzung bestimmt. Die Steuerung der zu applizierenden Strahlung wird durch die automatische Wahl der Strahleranzahl und der Bestrahlungsdauer gewährleistet, wobei durch die Variation der UV-Strahlungsquellenanzahl die Behandlungszeiten innerhalb einer Bestrahlungsserie nur geringfügig verändert werden müssen. Weiterhin wird durch die Protokollierung und Dokumentation des Bestrahlungsablaufes die einfache Verwaltung der Bestrahlungsdaten für die Patienten ermöglicht.

4.3 Untersuchungen an UV-Bestrahlungsgeräten

Bestrahlungsgeräte zur UV-Therapie können nach ihren geometrischen Ausführungsformen (Kabinen, Liegen, Teilkörperbestrahlungsgeräte u. a) oder nach den benutzten Strahlungsquellen (Leuchtstofflampen, Hochdruckentladungslampen, Höchstdruckentladungslampen) unterteilt werden. Daneben werden sie in der medizinischen Phototherapie im UV gewöhnlich nach der spektralen Bandbreite der eingesetzten Strahlung gekennzeichnet. In Tabelle 4-5 sind die unterschiedlichen Anwendungen der UV-Phototherapie mit ihren jeweiligen Spektralbereichen zusammengestellt.

Tabelle 4-5: UV-Phototherapie für unterschiedliche Anwendungen

Therapie	Spektralbereich in nm	Anwendungsbeispiele
UV-A1	340 - 400	atopische Dermatitis, Neurodermitis
UV-A	320 - 400	Neurodermitis
UV-A/ UV-B	280 - 400	entzündliche Hauterkrankungen, Psoriasis, Neurodermitis
UV-B-Breitband	280 - 320	Photodermatosen, Vitamin D ₃ - Photosynthese, Psoriasis
UV-B-Schmalband	311 - 313	Photodermatosen, Vitamin D ₃ - Photosynthese, Psoriasis
PUVA (<u>P</u> сорalen plus <u>U</u> V- <u>A</u>)	320 - 400	Photodermatosen, Neurodermitis, chronische Ekzeme, Mastozytosen

Eine effektive Gestaltung der Phototherapie setzt grundlegende Kenntnisse über den Zusammenhang zwischen der photobiologisch wirksamen Bestrahlung und den in Kapitel 2.4 beschriebenen möglichen Reaktionen voraus. Bei der Bestrahlungsplanung wird die Bestrahlungszeit für die erste Exposition und die zeitliche Steigerung bzw. Steigerungsrate der Bestrahlung festgelegt. Ohne Kenntnis der Schwellenbestrahlung beginnt man die Bestrahlungsserie mit relativ geringen Expositionszeiten ($t < t_{s,er}$). Durch Testbestrahlungen können mögliche allergische Reaktionen ermittelt werden. Zur Optimierung der UV-Bestrahlung sowie zur Minimierung der Strahlenrisiken ist es jedoch ratsam, vor Bestrahlungsbeginn durch die Ermittlung der Hauttypen die Therapie an die Patienten bzw. die bestrahlten Personen anzupassen. Zu Beginn einer Bestrahlungstherapie wird gewöhnlich eine UV-Dosis von 0,5 MED gewählt. Als Steigerung zwischen zwei Einzelexpositionen sind i. a. etwa 0,1 MED üblich. Da jedoch auch bei der Ausbildung der Pigmentierung individuelle Unterschiede bestehen, können besonders bei längeren Bestrahlungsserien die jeweiligen Expositionszeiten individuell festgelegt werden. Sofern eine hohe Bestrah-

lung therapeutisch erforderlich ist und die Schwellenbestrahlung bzw. die Schwellenzeit in der Voruntersuchung bestimmt wurden, kann am Anfang bereits mit Bestrahlungszeiten knapp unterhalb der Schwellenzeit begonnen werden. Durch eine Verlängerung der Bestrahlungszeit ist es möglich, trotz der sog. „Licht-Schwiele“ über eine Bestrahlungsserie und einer einsetzenden Pigmentierung hinweg eine gleich bleibend hohe Wirksamkeit beizubehalten.

Die exakte Festlegung der Expositionszeit hängt oft auch von den Vorwahl- und Schaltmöglichkeiten am Gerät ab. Elektronische Schaltuhren lassen sich in der Regel genauer einstellen. Weiterhin sind bei einzelnen therapeutischen Geräten Schaltuhren vorzufinden, die durch die Wahl der zu verabreichenden Dosis gesteuert werden. Die zugehörige Bestrahlungszeit wird dabei durch radiometrische Messungen im Vorfeld ermittelt. Bei solchen Geräten muss man unbedingt die zeitliche Veränderung der Bestrahlungsstärke durch die Alterung der Strahlungsquellen und die hauttypenabhängigen Schwellendosen beachten. Sollten nach einer Einzelexposition erste Anzeichen für ein Erythem (Spannen der Haut oder Juckreiz) auftreten, sollte die Bestrahlungszeit nicht gesteigert werden. Bei heftigen Reaktionen muss die Bestrahlungszeit verringert oder die Applikation zeitlich verschoben werden. Bei lokalen Hautreizungen hilft ein Abdecken der entsprechenden Hautpartien mit einem Tuch. Grundsätzlich sind Bestrahlungszeiten und auftretende Reaktionen in einem Protokoll festzugeschrieben. Anhand dieser Aufzeichnungen kann später eine Auswertung der Bestrahlungsserie erfolgen.

Abweichend von der obigen Einteilung werden im Folgenden die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten bzw. konstruierten Bestrahlungsgeräte durch ihre Bauform (Kabinen, Teilkörperbestrahlungsgeräte, Solariengeräte) gegliedert erläutert. Die beschriebenen UV-Bestrahlungsgeräte sind beispielhaft und decken das gesamte Spektrum der Phototherapie deshalb nicht gänzlich ab.

4.3.1 UV-Bestrahlungskabinen mit Halogen-Metaldampflampensystemen

Als Bestrahlungskabinen werden Ganzkörpergeräte bezeichnet, in denen auf der Haut von stehenden oder sitzenden Personen durch Exposition mit optischer Strahlung aus einer oder mehreren Richtungen eine photomedizinische oder kosmetische Wirkung erzielt wird. Als wesentlicher Vorteil bei diesen Geräten gilt ihre hohe zeitliche Effektivität in Folge der Maximierung der applizierten Hautfläche bei der Bestrahlung. Im Gegensatz zu als Liegen ausgeführten UV-Ganzkörpergeräten können bei den Bestrahlungskabinen sowohl Leuchtstofflampen als auch Hochdruckentladungslampen (Halogen-Metaldampflampen)

als Strahlungsquellen benutzt werden. Dadurch ist der Einsatzbereich von Bestrahlungskabinen für Anwendungen in der Photomedizin und zu kosmetischen Zwecken weitgehend frei wählbar. Durch die Möglichkeit, eine höhere Anzahl Bestrahlungsquellen einzusetzen, werden bei diesen Geräten die Zeiten zum Erreichen einer gewünschten Wirkung minimiert. Die Grundfläche von UV-Bestrahlungskabinen ist i. A. symmetrisch (kreisförmig, rechteckig, quadratisch, sechskantig etc.) angeordnet, jedoch werden auch andere Bauformen (z. B. elliptisch) gewählt. Die Anordnung der Strahlungsquellen in UV-Bestrahlungskabinen wird durch die Lampenart bestimmt.

Als Strahlungsquellen in UV-Bestrahlungsgeräten finden herkömmlich Halogen-Metall-dampflampen Anwendung, falls in begrenzten Abmessungen der Nutzfläche höhere Bestrahlungsstärken erzeugt werden müssen. Durch die Tatsache, dass die Lampenleistungen relativ hoch ($P_L \geq 400 \text{ W}$) und das Strahlervolumen bei diesen Strahlern klein ist, ist die Erzeugung eines gleichmäßigen Strahlungsfeldes im Kabineninnenraum erschwert. In der Praxis werden bei diesen Halogen-Metall-dampflampensystemen mehrere Strahlungsquellen auf einer Säule untergebracht und die gleichmäßige Bestrahlung über die Körperfläche z. B. durch die gleichmäßige Rotation des Patienten auf Drehstühlen oder Podesten erreicht. Bei Behandlung von älteren oder erkrankten Personen erweist sich diese Lösung als problematisch, weil die Behandlungszeiten am Ende einer Bestrahlungsserie relativ lang werden können.

Eine solche Kabine wird z. Zt. im KFH-Dialysezentrum Berlin-Moabit zur Behandlung von nierenkranken Patienten eingesetzt. Die Bestrahlungskabine ist auf einer viereckigen Grundfläche aufgebaut. Drei Halogen-Metall-dampflampen mit jeweils einer Lampenwirkleistung von 450 W sind auf einer Säule installiert. Für solche einseitig positionierten Bestrahlungsanordnungen kann man die örtliche Verteilung der wirksamen Bestrahlungsstärke z. B. durch die Messung der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke auf der Mantelfläche eines Zylinders nach /55/ beschreiben:

$$E_{er,zyl} = f_{zyl} \cdot E_{er,\perp} \quad \text{Gl. 4-6}$$

$$f_{zyl} = \frac{1}{2\pi \cdot E_{er,\perp}} \int_{\varphi=0}^{360} E_{er}(\varphi) \cdot d\varphi \quad \text{Gl. 4-7}$$

Dabei ist $E_{er,\perp}$ die erythemwirksame Bestrahlungsstärke bei senkrechter Ausrichtung auf die Strahlungsquelle. Die erythemwirksame Bestrahlungsstärke $E_{er}(\varphi)$ in Abhängigkeit vom Drehwinkel φ erreicht in der Praxis auf der Strahlerebene seinen Maximalwert. Durch

den Raumfaktor für die zylindrische Nutzfläche f_{zyl} kann die Effektivität der Kabinenanordnung beschrieben werden. Für die oben beschriebene Bestrahlungskabine zur Vitamin D₃-Photosynthese sind die absoluten Werte der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke auf der zylindrischen Nutzfläche in Abb. 4-22 dargestellt. Dabei wurden die relativen, integralen Bestrahlungsstärkewerte für verschiedene Azimutwinkel auf einer Höhe von 1,5 m aufgenommen. Die Absolutwerte der Bestrahlungsstärke wurden durch eine spektrale Anschlussmessung bei einem Azimutwinkel von $\varphi = 270^\circ$ ermittelt, bei dem die Empfängerfläche senkrecht zur Strahlungsausstrittsfläche steht.

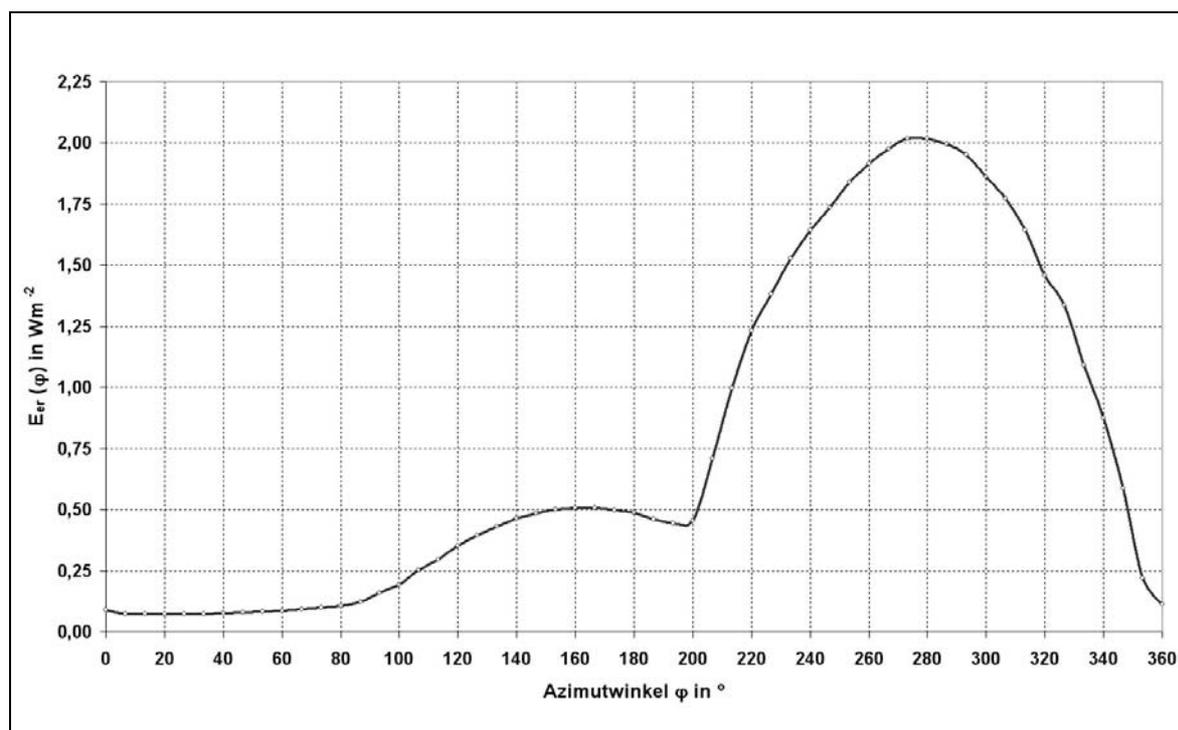


Abb. 4-22: Erythemwirksame Bestrahlungsstärke auf der zylindrischen Nutzfläche

Eine Leistungsvariation wird bei der bestehenden Anlage durch den Einsatz zusätzlicher Induktivitäten in den Zuleitungen der einzelnen Strahler und damit erzwungenen Spannungsabfall ermöglicht. Auf einer Höhe $h = 0,95$ m wurden für beide Betriebsarten die spektralen Bestrahlungsstärken aufgenommen, die in einem Abstand $d = 0,8$ m von der Strahlungsausstrittsfläche erzeugt werden (siehe Abb. 4-23). Die photobiologischen und spektralradiometrischen Bewertungsgrößen für das Bestrahlungsgerät sind in Tabelle 2-1 zusammengefasst. Es wird deutlich, dass durch die Reduzierung der in den Halogen-Metaldampflampen umgesetzten elektrischen Leistung beim Halblastbetrieb sich die UV-A-Bestrahlungsstärke um ca. 53 %, aber die UV-B-Bestrahlungsstärke um ca. 24 % und die Vitamin D₃-wirksame Bestrahlungsstärke um 29 % verringert wird.

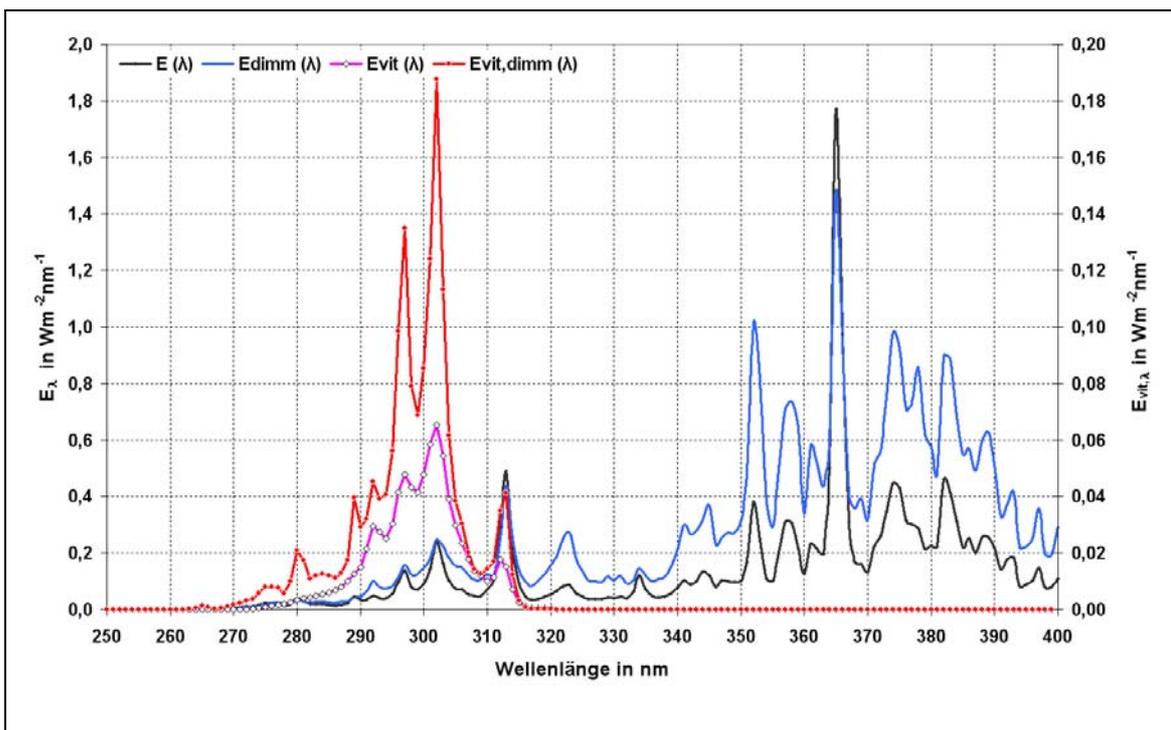


Abb. 4-23: Spektrale und Vitamin D₃-wirksame Bestrahlungsstärken einer UV-Bestrahlungskabine

Tabelle 4-6: Bewertungsgrößen einer UV-Bestrahlungskabine

Bewertungsgröße	P_W	$P_W / 2$
E_{UV-A} (315 nm-400 nm) in Wm^{-2}	34,69	16,38
E_{UV-B} (280 nm-315 nm) in Wm^{-2}	4,21	3,19
E_{UV-C} (250 nm - 280 nm) in Wm^{-2}	0,21	0,24
E_{UVges} (250 nm - 400 nm) in Wm^{-2}	38,95	19,68
$E_{Erythem}$ (250 nm - 320 nm) in Wm^{-2}	2,00	1,49
$E_{Erythem}$ (320 nm - 400 nm) in Wm^{-2}	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$
$E_{Erythem}$ (250 nm - 400 nm) in Wm^{-2}	2,02	1,50
$t_{erythem}$ in min	2,06	2,77
E_{Haut} (250 nm - 400 nm) Wm^{-2}	1,14	0,89
t_{Haut} in min	0,44	0,56
E_{Auge} (250 nm - 400 nm) in Wm^{-2}	1,24	0,94
t_{Auge} in min	0,40	0,53
E_{vd} (250 nm - 400 nm) in Wm^{-2}	2,34	1,67
f_{SE}	6,8	5,0

Diese spektral unterschiedlichen Auswirkungen der Leistungsreduzierung beruhen auf die Veränderung der Strahlungsfunktion von Halogen-Metaldampflampen bei der Variation der Lampenspannung. Bei geringeren Lampenleistungen nimmt die Wandtemperatur an der kältesten Stelle des Entladungsgefäßes (Colt-Spot-Temperatur) ab, wodurch der Dampfdruck im Entladungsgefäß verringert wird. Die Anregung der Füllstoffe hängt von den jeweiligen Dampfdichten ab, wobei die Verbindungen der Seltenen Erden, die die geringsten Dampfdichten vorweisen, bei Lampenspannungen unter Nennbetriebsbedingungen in die Gasphase übergehen. Bei abnehmender Lampenleistung nimmt i. A. die emittierte Strahlungsleistung im längerwelligen Spektrum deutlicher ab. Die Charakteristik der Spektralverschiebung in Folge der Variation der Lampenleistung hängt allerdings von den Spektraleigenschaften der benutzten Füllkomponenten ab /142/.

4.3.2 UV-Bestrahlungskabinen mit *Leuchtstofflampensystemen*

Bei UV-Bestrahlungskabinen mit *Leuchtstofflampensystemen* werden die Strahlungsquellen gewöhnlich in senkrechter Brennlage und über die gesamte Kabineninnenfläche homogen verteilt positioniert. Die spektrale Verteilung der Nutzstrahlung wird dabei in erster Linie durch die Transmissionseigenschaften des Lampenaußenkolbens (Leuchtstoffe) und ggf. die der Filtermaterialien bestimmt. Bei gegebener Symmetrie der Kabinenbauform und homogener Strahlstärkeverteilung der eingesetzten Quellen wird in solchen Kabinen eine gleichmäßige Verteilung der Bestrahlungsstärke über die Körperfläche von Patienten erzielt. Zur Strombegrenzung von Leuchtstofflampen werden konventionelle Vorschaltgeräte (KVGs) und Glimmzünder verwendet, die in der Kabinenwandverkleidung untergebracht sind.

An drei UV-Bestrahlungskabinen, die mit Strahlungsquellen für verschiedene spektrale Verteilungsfunktionen bestückt sind, wurden spektralradiometrische Untersuchungen vorgenommen. Die Kabinen sind auf einer kreisförmigen Grundfläche mit $d = 0,85 \text{ m}$ (Abstand zwischen 2 gegenüberliegenden Strahlungsflächen) aufgebaut und weisen jeweils eine Bauhöhe von $1,95 \text{ m}$ auf. In 3 Gruppen sind je Kabine 48 Leuchtstofflampen mit $P = 140 \text{ W}$ in senkrechter Brennlage angeordnet. Zur Strombegrenzung werden konventionelle Vorschaltgeräte benutzt. Die Abwärme wird durch eine Abluftanlage weitergeleitet.

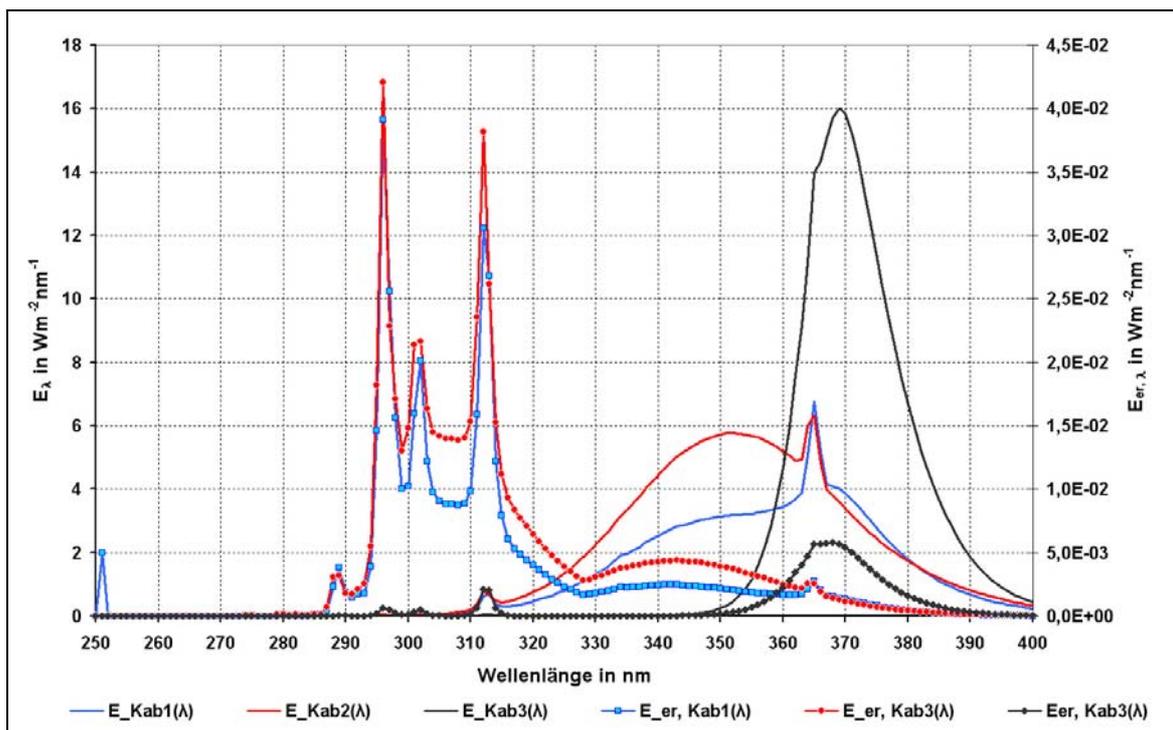


Abb. 4-24: Spektrale Bestrahlungsstärke und erythemwirksame Bestrahlungsstärke von 3 UV-Bestrahlungskabinen auf einer Nutzebene in $d = 0,25 \text{ m}$

Tabelle 4-7: Photobiologische Bewertungsgrößen für 3 UV-Bestrahlungskabinen mit Leuchtstofflampen

	UV- Bestrahlungs- kabine 1	UV- Bestrahlungs- kabine 2	UV- Bestrahlungs- kabine 3
E_{UV-A} (315 nm-400 nm) in W/m^2	179,3	249,2	298,4
E_{UV-B} (280 nm-315 nm) in W/m^2	3,04	3,42	0,14
E_{UV-C} (250 nm - 280 nm) in W/m^2	$8,0 \cdot 10^{-1}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$7,0 \cdot 10^{-5}$
E_{UVges} (250 nm - 400 nm) in W/m^2	182,8	252,1	298,6
$E_{Erythem}$ (250 nm - 320 nm) in	1,14	0,35	$9,2 \cdot 10^{-3}$
$E_{Erythem}$ (320 nm - 400 nm) in W/m^2	0,15	0,22	0,10
$E_{Erythem}$ (250 nm - 400 nm) in W/m^2	1,28	0,56	0,11
$t_{erythem}$ in min	3,25	7,41	38,07
E_{Haut} (250 nm - 400 nm) in W/m^2	0,58	0,17	0,03
t_{Haut} in min	0,86	2,87	16,86
E_{Auge} (250 nm - 400 nm) in W/m^2	1,08	0,87	0,90
t_{Auge} in min	0,46	0,57	0,56
f_{SE}	4,3	1,9	0,4
E_{vd} (250 nm - 400 nm) in W/m^2	0,64	0,65	0,02

Die spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$ sowie die spektralen erythemwirksamen Bestrahlungsstärke $E_{er}(\lambda)$ für eine Nutzebene auf 1 m Höhe und einem Abstand zwischen der Empfängerfläche und der Strahlungsausstrittsfläche von $d = 0,25$ m sind in Abb. 4-24 dargestellt. Die spektralen und photobiologischen Bewertungsgrößen sind in Tabelle 4-7 zu sehen. Die Kabinen 1 und 2 werden mit 1,6 % bzw. 1,4 % UV-B Anteil für Anwendungen im UV-A/ UV-B eingesetzt, wohingegen die Kabine 3 für UV-A1-Phototherapie (siehe 4.3.3) vorgesehen ist. Im Vergleich zur Bestrahlungskabine 2 wird auf der betrachteten Nutzebene durch die Bestrahlungskabine 1 eine mehr als doppelt so hohe erythemwirksame Bestrahlungsstärke erzeugt, während die Wirksamkeit der beiden Geräte zur Vitamin D₃-Photosynthese wegen geringeren UV-A-Anteilen des ersten Gerätes gleich groß ist.

4.3.3 UV-A1-Bestrahlungsgeräte

Ein wichtiges Anwendungsgebiet der UV-A1-Phototherapie ist die Behandlung der akut-exazerbierten, schweren atopischen Dermatitis (atopisches Ekzem, *Neurodermitis*). Als weitere Indikationen für mögliche UV-A1-Bestrahlungen werden Morphea, Urticaria pigmentosa, akrale Sklerodermie und disseminiertes Granuloma anulare genannt /42/, /125/. Die Therapie erfolgt gewöhnlich in 10 - 15 Sitzungen umfassenden Zyklen, wobei die Anzahl der wöchentlichen Bestrahlungen 3 - 4 beträgt. Zu der UV-A1-Phototherapie liegt eine Empfehlung der Qualitätssicherungs-Kommission der DDG (Deutsche Dermatologische Gesellschaft) vor /43/. Hier werden Gesamtbestrahlungsdauern (Vorder- und Rückseite des Patienten) von nicht mehr als 45 bis 60 Minuten vorgeschlagen. Nach DDG werden die Geräte UV-A1-Phototherapie in drei Gruppen eingeteilt:

- niedrigdosiert (10 - 20 Jcm⁻²)
- mitteldosiert (30 - 50 Jcm⁻²)
- hochdosiert (130 Jcm⁻²)

Zur UV-A1-Therapie werden gewöhnlich Ganzkörperbestrahlungsgeräte eingesetzt. Bei diesen Geräten darf aufgrund des Schutzes der Patienten vor schädigender UV-Strahlung die Bestrahlungsdauer die Schwellenbestrahlungszeit zum Erreichen einer MED für den Hauttyp II nicht übersteigen. In der Praxis wird dies durch Filterung der Strahlung im Wellenlängenbereich $\lambda < 340$ nm realisiert. Die erythemwirksame Bestrahlungsstärke in diesem Spektralbereich darf 5 % der durch das Gerät gesamt-emittierten erythemwirksamen Bestrahlungsstärke nicht übersteigen. Weiterhin darf keine Bestrahlungsstärke im UV-B und UV-C ($\lambda < 320$ nm) vorliegen. Der Grenzwert ist durch die Messunsicherheit mit klei-

ner als $1 \cdot 10^{-5} \text{ Wm}^{-2}$ festgelegt. Für die atopische Dermatitis als Hauptanwendung der UV-A1-Phototherapie ist zum Zeitpunkt dieser Arbeit die spektrale Wirkungsfunktion nicht definiert. Aus diesem Grunde wird zum Vergleich der UV-A1-Bestrahlungsgeräte als wirksame Bestrahlungsgröße die Bestrahlung H_{UV-A} herangezogen /27/. Da jedoch dieser Wert bei Leuchtstoff- und Halogen-Metaldampflampensystemen sich in weiten Bereichen unterscheiden kann, wird in /55/ zur Vergleichbarkeit die suberythematöse UV-A-Dosis vorgeschlagen:

$$H_{UV-A,MED} = E_{UV-A} \cdot \frac{H_{s,er}}{E_{er}} = \int_{315nm}^{400nm} E_{\lambda}(\lambda) d\lambda \cdot \frac{1MED}{\int E_{\lambda}(\lambda) \cdot s_{er}(\lambda) d\lambda} \quad \text{Gl. 4-8}$$

Als Strahlungsquellen kommen bei UV-A1-Geräten Halogen-Metaldampflampen mit höheren Wirkleistungen im kW-Bereich in Frage, die auch im IR höhere Strahlungsleistungen aufweisen, die durch Schwarzglasfilter (UG-Gläser) absorbiert werden. Zur Absorption der kurzwelligen Anteile im Viellinienspektrum der Halogen-Metaldampfstrahler werden Breitband-Interferenzfilter eingesetzt. Durch die Filterung sowie durch die in den zur Strombegrenzung eingesetzten konventionellen Vorschaltgeräten kann z. T. erhebliche Wärmebelastung entstehen. Aus der Praxis ist bekannt, dass die Effektivität der UV-A1-Phototherapie durch das Schwitzen der Patienten erheblich verschlechtert wird. Daher werden bei solchen Geräten zur Abführung dieser Wärmeentwicklung aufwendige Lüftungssysteme mit Zu- und Abluft benutzt. Zur Begrenzung der thermischen Belastung der behandelten Personen wird ein Wert der IR-Bestrahlungsstärke ($\lambda > 800 \text{ nm}$) empfohlen, der 5 % der Gesamtbestrahlungsstärke nicht überschreiten darf. In der praktischen Ausführung werden UV-A1-Bestrahlungsgeräte mit Halogen-Metaldampflampen als Ganzkörperliegen ausgeführt, wobei die aus mehreren UV-Quellen bestehende Strahleranordnung oberhalb der Liegefläche angebracht wird. Um eine Ganzkörperbestrahlung zu erreichen, wird die behandelte Person nach der Hälfte der vorgesehenen Bestrahlungsdauer akustisch aufgefordert, sich zu wenden.

Zwei solche Geräte wurden spektralradiometrisch untersucht. Bei diesen Geräten wurden zur Bestrahlung jeweils 5 Halogen-Metaldampflampen mit einer Gesamtwirkleistung von 25 KW eingesetzt. Der Patient wird bei diesen Geräten ausschließlich aus der Richtung der Deckenfläche bestrahlt. Am Ort der maximalen Bestrahlungsstärke auf der Nutzebene wurde die spektralen Werte der Bestrahlungsstärke beider Geräte auf einer Höhe von 0,2 m über der Nutzfläche aufgenommen und in Abb. 4-25 aufgetragen. Die Geräte 1 und 2 sind baugleich und mit Halogen-Metaldampflampen bestückt. Die spektrale Bestrahlungsstärke des Gerätes 3 mit Leuchtstofflampensystem wurde im geometrischen Mittel-

punkt der Bestrahlungskabine auf einer Höhe von 0,85 m aufgenommen. Die relevanten Bewertungsgrößen sind in Tabelle 4-8 zusammengefasst.

Tabelle 4-8: Bewertungsgrößen für verschiedene UV-A1-Bestrahlungsgeräte

	Gerät 1 (HIT)	Gerät 2 (HIT)	Gerät 3 (LL)
E_{UV-A} (315 nm-400 nm) in W/m²	388	386	298
E_(λ < 320 nm) in W/m²	< 10 ⁻⁵	< 10 ⁻⁵	1,5·10 ⁻¹
E_{UV-C} (250 nm - 280 nm) in W/m²	< 10 ⁻⁵	< 10 ⁻⁵	7,0·10 ⁻⁵
E_{UVges} (250 nm - 400 nm) in W/m²	388	386	299
E_{Erythem} (250 nm - 340 nm) in W/m²	4,7·10 ⁻⁴	1,2·10 ⁻³	1,1·10 ⁻²
E_{Erythem} (250 nm - 400 nm) in W/m²	0,11	0,12	0,11
E_{Erythem} (320 nm - 400 nm) in W/m²	4,73·10 ⁻⁴	1,20·10 ⁻³	1,1·10 ⁻²
UV-B+UV-C-Anteil an UV-Gesamtstrahlung in %	0,4	1,0	9,9
t_{erythem} in min	36	36	38
E_{Haut} (250 nm - 400 nm) in W/m²	0,03	0,03	0,03
t_{Haut} in min	16	16	17
E_{Auge} (250 nm - 400 nm) in W/m²	1,2	1,2	0,9
t_{Auge} in min	0,4	0,4	0,6
H_{UV-A, MED} in Jcm⁻²	88	80	68

Die UV-C-Strahlung kann bei diesen Geräten etwa 8 Größenordnungen kleiner als die UV-A-Strahlung sein und ist deshalb nur mit hochempfindlichen Geräten kleinster Streustrahlung zu erfassen. Abb. 4-25 zeigt das Ergebnis der Messung an 2 Therapiegeräten gleicher Bauart. Bei Gerät 2 wird der Grenzwert der UV-C-Strahlung nicht überschritten. Bei Gerät 1 wird ein merklich größerer UV-C-Strahlungsanteil nachgewiesen. Es handelt sich dabei nicht um Streustrahlung. Da keine Absorptionskante zu erkennen ist, lässt sich das Vorhandensein dieser unerwünschten Strahlungsanteile nur durch sog. pin-holes im Filtersystem des Bestrahlungsgerätes begründen.

Die ungewöhnlich hohe UV-A1-Bestrahlungsstärke, die in der Nutzfläche vorliegt, ist gegenüber der Referenzsonne mit $E_{UV-A-1, ref} = 50,4 \text{ Wm}^{-2}$ um den Faktor 8 größer. Die verwendeten Spektralradiometer dürfen deshalb einen maximalen Linearitätsfehler von 1 % über 4 Größenordnungen nicht überschreiten. Hinsichtlich der bei Patienten absorbierten Dosis und der möglichen Schädwirkungen durch langwellige UV-A-Strahlung bei hohen Bestrahlungsstärken besteht jedoch große Unklarheit, die bei der Dosimetrie erschwerend ist.

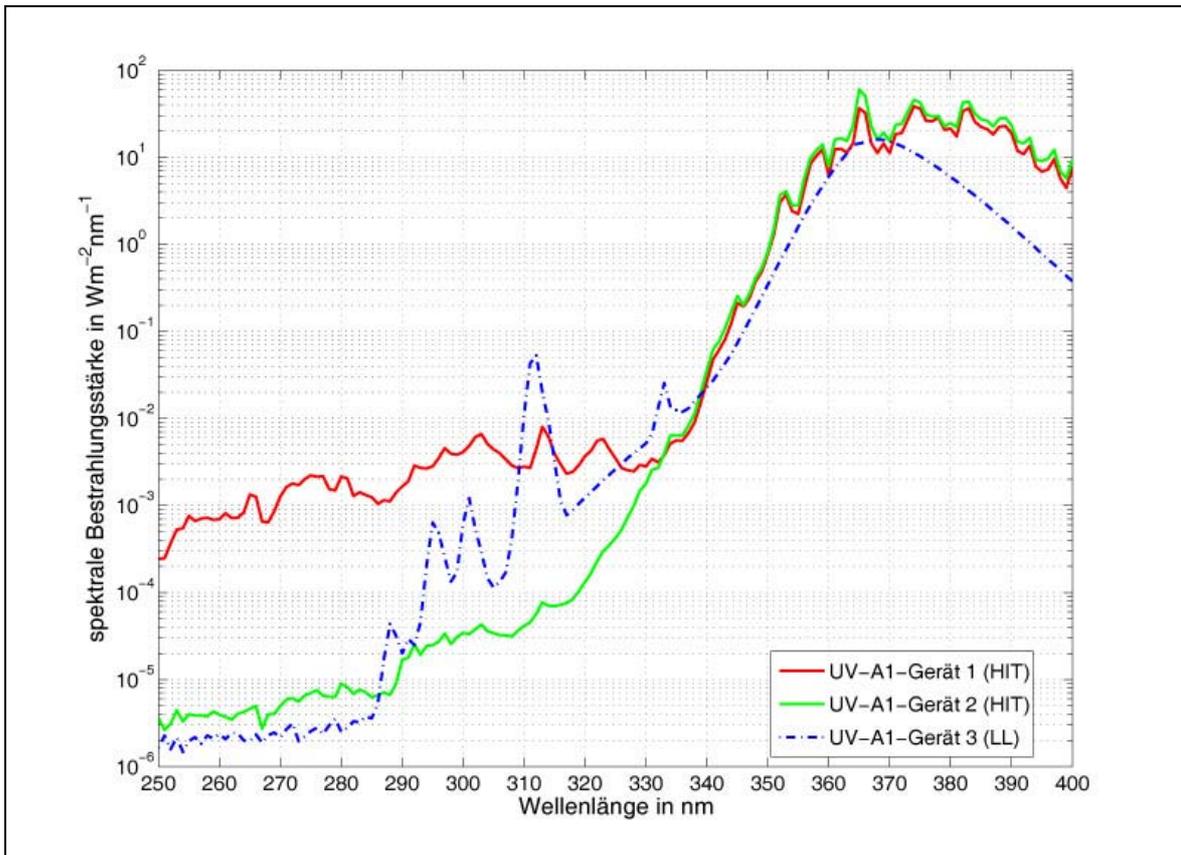


Abb. 4-25: Spektrale Bestrahlungsstärke zweier UV-A1-Ganzkörperbestrahlungsgeräte mit Halogen-Metaldampf lampen in 0,2 m Höhe von der Liegefläche und einer UV-A1-Bestrahlungskabine mit Leuchtstofflampen in $d = 0,25$ von der Strahlungsausstrittsfläche und auf einer Höhe von 0,85 m

UV-A1-Bestrahlungsgeräte mit Leuchtstofflampensystemen bieten neben dem geringen technischen Aufwand zur Filterung und Wärmeabführung als weiteren Vorteil eine homogene Bestrahlung des Patienten von allen Seiten. Als Strahlungsquellen in solchen Geräten kommen schmalbandige UV-A-Leuchtstofflampen zum Einsatz. Die Strahlungsanteile $\lambda \leq 340$ nm werden durch die Wahl geeigneter Leuchtstoffe (siehe Tabelle 4-2) sowie durch spezielle Filterlacke wirkungsvoll ausgesondert. Jedoch können bei geringer Schichtdicke der Filterlackierung die Grenzwerte für die auf der Nutzfläche erzielten Bestrahlungsstärke sowie die erythemwirksame Bestrahlungsstärke im Wellenlängenbereich $\lambda < 320$ nm durch Strahlungsanteile der Hg-Entladung bei 312 nm -313 nm überschritten werden.

Nach DIN /35/ werden die Nutzflächen von Solarien, Heimsonnen und nichttherapeutischen Bestrahlungsgeräten durch ein Gleichmäßigkeitskriterium für die wirksame Bestrahlungsstärke definiert:

$$g_2 = \frac{E_{er,min}}{E_{er,max}} \geq 0,4$$

Gl. 4-9

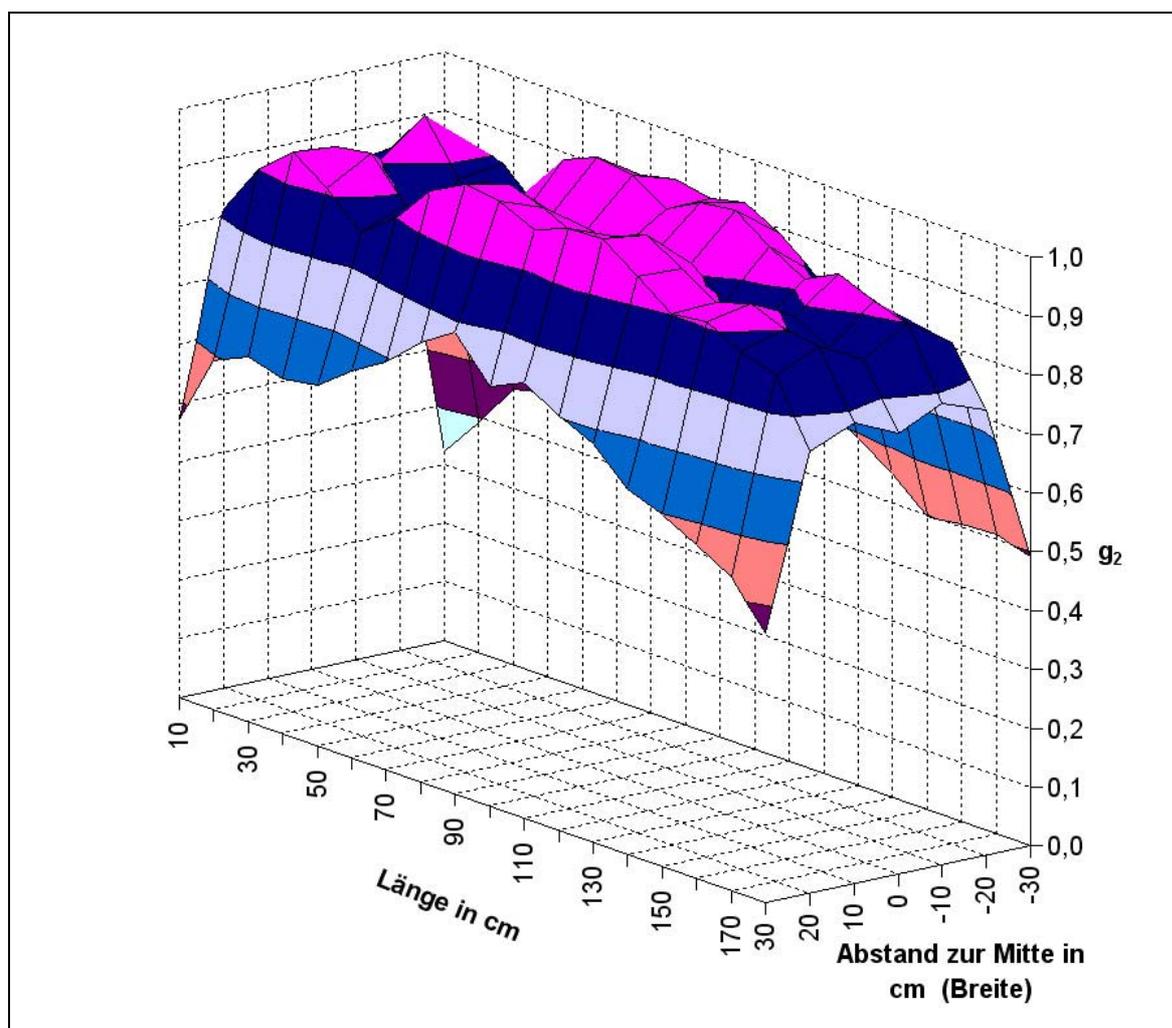


Abb. 4-26: Gleichmäßigkeit g_2 eines UV-A1-Bestrahlungsgerätes mit Halogen- Metall- dampfstrahlern über die Nutzfläche

Für die Bewertung dieser Forderung wurden bei den oben erläuterten UV-A1-Bestrahlungsgeräten mit Halogenmetall dampflampensystemen auf einem Messraster von 0,1 m x 0,1 m die erythemwirksamen Bestrahlungsstärken aufgenommen. In Abb. 4-26 ist beispielhaft die Verteilung der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke über der Liegefläche eines solchen Gerätes dargestellt. Es wird dabei deutlich dass durch die 5 Halogen- Metall dampfstrahler auf der Gesamtfläche der Liege die Gleichmäßigkeitsforderung erfüllt

wird. Wegen der sehr hohen UV-A-Strahlungsleistung und der strengen Vorgaben werden besondere Anforderungen an die UV-Messtechnik gestellt, die eine Optimierung der Bestrahlungsgeräte ermöglichen.

4.3.4 Solarien und Heimsonnen

UV-Bestrahlungsgeräte in gewerblichen Anwendungen zur nichttherapeutischen Bestrahlung für kosmetische Zwecke bzw. zur Hautbräunung (Pigmentierung) werden Solarien genannt. Diese Geräte können als Ganz- oder Teilkörpergeräte ausgelegt werden. UV-Bestrahlungsgeräte zur Erzielung von kosmetischen Wirkungen in privater Anwendung werden Heimsonnen oder -solarien genannt. Zur Messung und Bewertung von Solarien sind durch DIN 5050 Teil 1 /35/ Messvorschriften, Typeneinteilungen und Kennzeichnungsvorgaben definiert worden. In DIN 5050 Teil 2 werden Empfehlungen für Solarien und Heimsonnen gerätespezifische Hinweise gegeben. Für UV-Bestrahlungsgeräte zur Bräunung im Hausgebrauch sind durch die europäische Norm DIN EN 60 335-2-27 /40/ Sicherheitskriterien herausgegeben.

4.3.4.1 Kennzeichnung von Solarien

Die Klassifizierungsvorschriften für UV-Bestrahlungsgeräte hinsichtlich ihrer Nutzfläche nach DIN und der Typeneinteilung aufgrund der durch diese Geräte erzeugten erythemwirksamen Bestrahlungsstärken nach DIN sowie SSK sind im Kapitel 2.6 erläutert worden. Die zu allgemeinem Vergleich und Beurteilung der Sonnenähnlichkeit der künstlichen UV-Strahlungsquellen und Bestrahlungsgeräte herangezogene natürliche Globalstrahlung als UV-Referenzspektrum ist in Kapitel 2.5 beschrieben.

Die Grundlage von Bewertungen und Klassifizierungen von Solarien und Heimsonnen bilden spektralradiometrische bzw. integrale Messungen, für die in /35/ und in DIN VDE 0700 Teil 27 /130/ Anforderungen definiert worden sind. Danach ist die erythemwirksame Bestrahlungsstärke nach dem Spektralverfahren im Mittelpunkt einer Teilmessfläche, z. B. im Messpunkt im Maximum der E_{er} und die relative örtliche Verteilung von E_{er} auf der Nutzfläche mit einem Radiometer aufzunehmen. Für das spektralradiometrische Verfahren werden Messgeräte zur Aufnahme der spektralen Bestrahlungsstärke mit einer Eingangsoptik empfohlen, die die einfallende Strahlung kosinusgetreu bewerten, wobei der relative Fehler f_2 nicht mehr als 5 % betragen darf. Des Weiteren darf die Halbwertsbreite des Spektralradiometers $\Delta\lambda_H \leq 2 \text{ nm}$ nicht überschreiten. Der Durchmesser des erfassten Strahlungsfeldes D soll kleiner 50 mm sein. Nach /40/ wird für die Forderung der kosi-

ausgetretenen Bewertung keine Angabe über die Kennzahl f_2 gemacht. Hier wird für den Durchmesser des erfassten Strahlungsfeldes $D \leq 20$ mm und der Halbwertsbreite des dispersiven Systems $\Delta\lambda_H \leq 2,5$ nm vorgeschlagen. Bei beiden Normen werden keine weiteren Angaben zu den bei diesen Messungen zu benutzenden spektralradiometrischen Systemen wie spektrale Empfindlichkeit, Wellenlängenreproduzierbarkeit, -genauigkeit, nutzbarer Spektralbereich, Linearität, Streulichtunterdrückung oder Kalibriervorschriften gemacht.

Die im gewerblichen Einsatz befindlichen Solarien werden je nach Betreiber oder Hersteller teilweise frei bezeichnet. Zu solchen Beschreibungen gehören beispielsweise „Soft“, „Intensiv“, „Turbo“, „Ultraturbo“ u. v. a. Nach DIN 5050 Teil 1 sind bei der Gerätezeichnung neben der Aufschrift „Bestrahlungsgerät“ Angaben über die Normhauptnummer, den mit einem Faktor 100 multiplizierten Sonnenerthemfaktor f_{se} (siehe Gl.2-22), die Größe der Nutzfläche und den Typ des Gerätes nach Tabelle 2-3 zu machen. Demnach würde als Beispiel für ein Ganzkörperbestrahlungsgerät mit einem Sonnenerthemfaktor $f_{se} = 0,8$ und Geräte-Typ 4 die Aufschrift wie folgt lauten: „*Bestrahlungsgerät DIN 5050 – L- 80- Typ 4*“

4.3.4.2 Anwendung und Betrieb

Für den Betrieb bzw. die Benutzung von Solarien und Heimsonnen sind durch die Strahlenschutzkommission der Bundesregierung (SSK) Verhaltensempfehlungen für die Nutzer und Anforderungen an die Solarienbetreiber hinsichtlich Beratung sowie technische Merkmale der benutzten Geräte herausgegeben /122/, /123/. Hier wird u. a. eine maximale Dosis der Erstbestrahlung von 0,4 MED und für weitere Einzelbestrahlungen 1, 0 MED (Hauttyp II), 1, 4 MED (Hauttyp III) bzw. 1,8 MED (Hauttyp IV) vorgeschlagen. Für den Einsatz in Solarienbetrieben werden ausschließlich Bestrahlungsgeräte vom „Typ 0“ bis „Typ III“ nach DIN 5050 Teil 1 vorgeschlagen. Als eine weitere Forderung werden Vorrichtungen zur Zwangsabschaltung dieser Geräte bei einer Maximaldosis von $H_{max} = 3,5$ MED (875 Jm^{-2}) sowie die technische Realisierung von Dosierungsschritten von 0,2 MED (50 Jm^{-2}) empfohlen. Der Maximalwert der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke E_{er} eines gewerblichen Solariums wird auf $0,3 \text{ Wm}^{-2}$ und eines Gerätes für die Heimanwendung auf $0,1 \text{ Wm}^{-2}$ festgelegt. Das Maximum der Bestrahlungsstärke auf den Strahlungsaustrittsflächen der Solariengeräte darf nach SSK das 1,7 fache des Minimalwertes nicht unterschreiten.

Vor dem Hintergrund der steigenden Popularität von künstlicher UV-Bestrahlung zu kosmetischen Zwecken in gewerblichen Solarienbetrieben sind durch den Runden Tisch Solarien (RTS) des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) Kriterien und Bewertungsvorschriften bzgl. der spektralen und der technischen Ausstattung, ihrer Kennzeichnung, Wartung, Hygiene der Bestrahlungsgeräte in solchen Betrieben sowie der Kundenberatung und zur Schulung des betreuenden Personals festgelegt worden /13/. Diese an /35/ und /40/ stark angelegten Kriterien werden durch akkreditierte Prüfinstitute, zu denen auch das Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Berlin zählt, überprüft und bei Erfüllung dem Solarienbetrieb die Bezeichnung „Zertifiziertes Solarium“ erteilt. Bei der Zertifizierung von Solarien nach RTS sind folgende gerätespezifische Angaben auf der Basis von spektralradiometrischen Messungen zu machen:

- Anfangsbestrahlungsdauer H_a für eine erythemwirksame Bestrahlung von 100 Joule/ m² beim kürzesten der empfohlenen Bestrahlungsabstände
- Erythemwirksame Bestrahlungsstärken $E_{er, UV-A}$ im UV-A (320 nm -400 nm), $E_{er, UV-B}$ im UV-B (280 nm – 320 nm) und $E_{er, UV-C}$ im UV-C (200 nm - 280 nm)
- Schwellenbestrahlungsdauern $t_{s,er}$ des UV-Erythems für die Hauttypen II, III und IV nach /35/
- Einhaltung der Bestrahlungsgleichmäßigkeit nach /35/

Tabelle 4-9: Vergleich der Bewertungsgrößen für verschiedene Anforderungen an die Augenschutzgeräte nach /39/ und /40/

Bewertungsgröße	Ohne Augenschutz	Mit Augenschutz nach DIN EN 60335-2-27	Mit Augenschutz nach DIN EN 170 Schutzstufe 3-4	Mit Augenschutz nach DIN EN 170 Schutzstufe 3-5
$E_{UV-A(315\text{ nm}-400\text{ nm})}$ in Wm ⁻²	93,8	0,94	0,89	0,28
$E_{UV-B(280\text{ nm}-315\text{ nm})}$ in Wm ⁻²	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$
$E_{UV-C(250\text{ nm} - 280\text{ nm})}$ in Wm ⁻²	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$<10^{-5}$	$<10^{-5}$	$<10^{-5}$
$E_{Auge(250\text{ nm} - 400\text{ nm})}$ in Wm ⁻²	$2,8 \cdot 10^{-1}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$
t_{Auge} in min	2	178	187	592

Weiterhin ist die technische Ausstattung der Geräte zur Zwangsabschaltung bei einer Dosis von 875 Jm^{-2} (3,5 MED für den Hauttyp II) zur Ermöglichung von Dosierungsschritten von 50 Jm^{-2} (0,2 MED für den Hauttyp II) sowie zur Notabschaltung zu überprüfen. Bei den spektralradiometrischen Datenerhebungen wird eine Messtoleranz von $\pm 15 \%$ festgelegt.

Neben deutlicher Anbringung von Gefahrenhinweisen, Erfüllung von Hygienevorschriften und der Fachberatung von Solarienbesuchern werden Solarienbetreiber nach SSK dazu verpflichtet, dafür zu sorgen, dass während der Bestrahlung Schutzbrillen (nach DIN 170 Schutzstufen 3-3 oder 3-4 /39/) getragen werden. Bei diesen definierten Schutzgruppen des Augenschutzes werden als zulässige Transmissionsgrade der UV-Strahlung bei 313 nm 0,0003 %, bei 365 nm 0,95 % (Schutzstufe 3-4) bzw. 0,3 % (Schutzstufe 3-5) und für den Lichttransmissionsgrad ein Maximalwert von 8,5 % bzw. 3,2 % und ein Minimalwert von 3,2 % bzw. 1,2 % angegeben. In /40/ werden Transmissionseigenschaften der beim Erwerb von Heimsolarien mitzuliefernden UV-Schutzbrillen festgelegt, wobei im Wellenlängenbereich $250 \text{ nm} < \lambda \leq 320 \text{ nm}$ 0,1 %, $320 \text{ nm} < \lambda \leq 400 \text{ nm}$ 1 % und $400 \text{ nm} < \lambda \leq 550 \text{ nm}$ 5 % vorgeschlagen werden. Die Grenzwerte für den Augenschutz und die durch ein Heimsolarium auf einer Nutzebene im Abstand von $d = 0,2 \text{ m}$ erzeugte spektrale Bestrahlungsstärke sind in Abb. 4-27 dargestellt.

Zum Vergleich der verschiedenen Anforderungen nach DIN 170 und EN 60353-2-27 ist die spektrale Bestrahlungsstärke eines Heimsolariums mit den in diesen Empfehlungen angegebenen Werten des spektralen Transmissionsgrads in Abb. 4-27 vergleichend zusammengestellt. Zur Berechnung der Schwellenzeit für die schädigende Wirkung der UV-Strahlung auf Augen dient dabei die durch die Berufsgenossenschaft festgelegte Schwellendosis für die Exposition mit UV-Strahlung an einem 8-stündigen Arbeitstag /51/:

$$H_{\text{Auge}} = \int_{180 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} H_{\lambda}(\lambda) \cdot s_{\text{Auge,rel}}(\lambda) d\lambda = 30 \text{ Jm}^{-2} \quad \text{Gl. 4-10}$$

Die ermittelten Werte (siehe Tabelle 4-8) verdeutlichen, dass Augenschutzgeräte, die den in der Schutzklasse 3-5 nach DIN 170 definierten Anforderungen genügen, Bestrahlungszeiten erlauben, die jeweils um den Faktor 3 höher als die Schutzbrillen übriger Klassen.

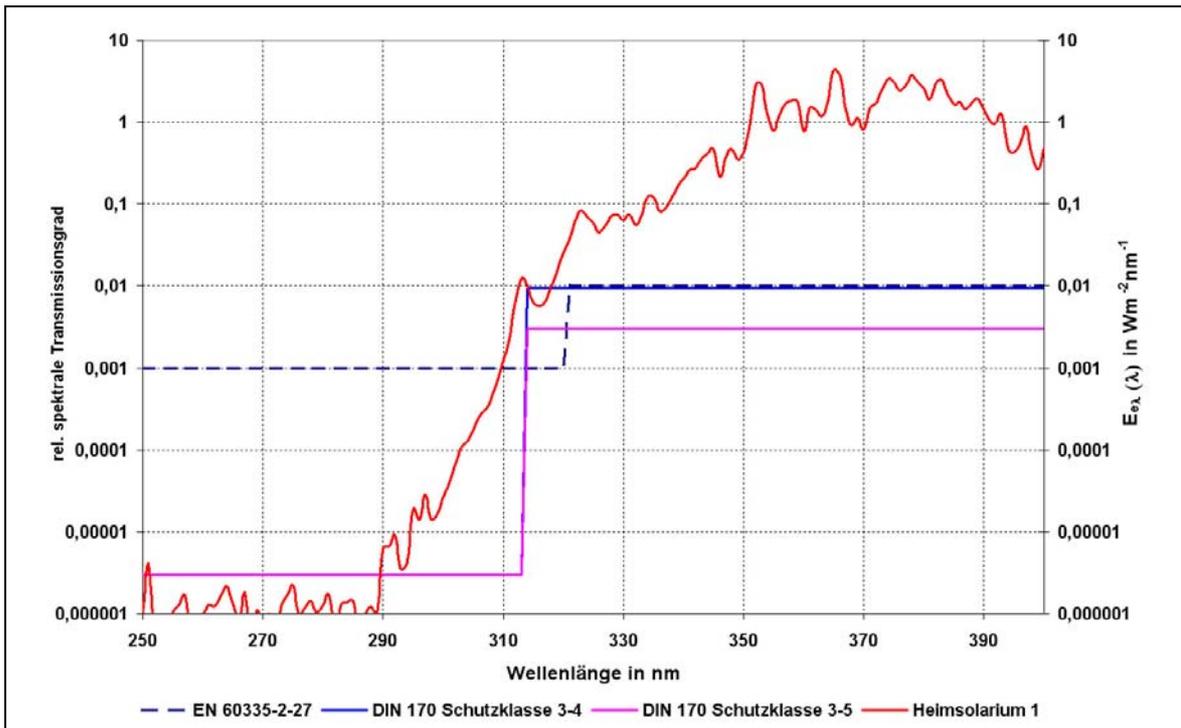


Abb. 4-27: Angeforderte spektrale Transmissionsgrade für den Augenschutzgeräte nach DIN 60353-2-27 und DIN 170 und die spektrale Bestrahlungsstärke eines Heimsolariums

4.3.4.3 Technische Ausführung von Solarien und Heimsonnen

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Solarien bestehen aus zwei Bestrahlungseinheiten, der sog. Liegenfläche und dem Deckenfluter. Als Abmessungen der Liegeflächen sind für die Längsseiten 1,8 m - 2 m und die Breite 0,8 - 1,2 m vorzufinden. Bei einigen, neueren Geräten finden sich zudem separate Bestrahlungssysteme für den Schulter- bzw. Gesichtsbereich. Als Strahlungsquellen für Liegen- und Deckensysteme werden zwecks der gleichmäßigen Bestrahlung über diese Flächen Leuchtstofflampen eingesetzt. Als Gesichtsbräuner werden Halogen-Metaldampflampen benutzt, die in ein- oder mehrfacher Ausführung in den Deckenflutern integriert sind. Als Strahlungsquellen für die Schulterbräuner kommen Leuchtstofflampen kleiner Leistung zum Einsatz. Die Anzahl der eingesetzten Lampen in den Liegeflächen bzw. den Deckenflutern wird durch den gewünschten Absolutwert der Bestrahlungsstärke auf der jeweiligen Strahlungsausstrittsfläche und die geometrische Ausführungsform bestimmt. In der Praxis werden zur Bestückung der Liegeflächen 10 bis 25 und des Solarienhimmels 10 bis über 36 Leuchtstofflampen installiert. Als gebräuchlichste elektrische Leistungsstufe für die eingesetzten Lampen kommen 100 W-Lampen vor. Allerdings werden besonders bei Solarien, in denen höhere Bestrahlungsstärken erzielt werden, Leuchtstofflampen mit Wirkleistungen von 160 W benutzt. Als Strahlungsquellen für die in die Deckenfluter integrierten Ge-

sichtsbräuner werden Halogen-Metaldampflampen mit $P_w = 400 \text{ W} / 500 \text{ W}$ eingesetzt, die gewöhnlich in 1 – 5 separaten Bestrahlungseinheiten installiert sind. Die sog. Schulterbräuner werden üblicherweise mit 25 W-Leuchtstofflampen ausgestattet.

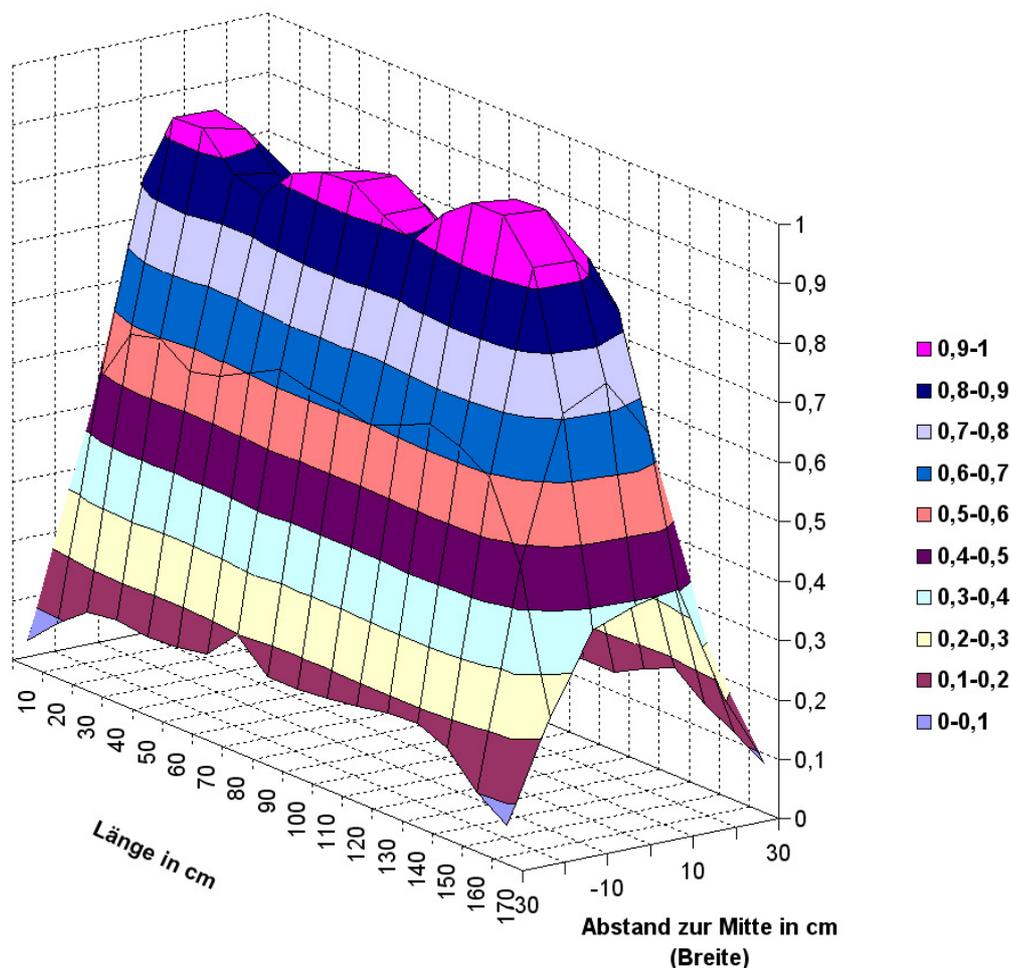


Abb. 4-28: Verteilung der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke eines Solarienhimmels über die Mantelfläche eines Halbzylinders mit dem Radius $r = 0,25 \text{ m}$

Für die Bewertung und Klassifizierung von Solariengeräten sind auf allen Nutzebenen spektralradiometrische Messungen durchzuführen. Bei diesen Messungen ist darauf zu achten, dass jeweils nur die Strahlung der auszumessenden Strahlungsausstrittsfläche bewertet wird. Gewöhnlich wird die Bestrahlungsstärke, die durch den Deckenfluter erzeugt wird, auf einer Höhe von 0,2 m - 0,3 m über der Liegefläche über eine Halbzylinderfläche aufgenommen. Diese Höhe richtet sich nach der Höhe der bestrahlten Körperpartie einer liegenden Person. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen wurde diese Höhe auf 0,25 m festgelegt. Bei der Messung der Liegefläche von Solarien werden die spektralen Daten durch einen auf dieser Fläche aufliegenden Messempfänger

aufgenommen. Der Abstand zwischen den Schulterbräunersystemen und der bestrahlten Hautpartie variiert je nach Ausführung des Gerätes und beträgt in der Praxis nur wenige Zentimeter. Die Aufnahme der Messwerte für diese Solarienkomponente erfolgt deshalb gerätespezifisch. Bei der Messung der Strahlung in der Gesichtsebene, die durch die in Solarien integrierten Gesichtsbäuner erzeugt wird, lag die Messhöhe bei 0,25 m. Als Beispiel sind in Abb. 4-29 die spektrale Bestrahlungsstärke eines Solariums auf verschiedenen Nutzebenen dargestellt. Bei diesem Gerät wurden als Strahlungsquellen für die Liegefläche 17 Leuchtstofflampen und für den Deckenfluter 27 Leuchtstofflampen mit jeweils 160 W Lampenwirkleistung eingesetzt. Zur Gesichtbräunung sind 4 Halogen-Metall dampflampen mit je 400 W und als Schulterbräuner 5 Leuchtstofflampen mit 25 W benutzt.

Die wirksamen Bestrahlungsstärken, die durch die einzelnen Module eines Solariengerätes erzeugt werden, sollten keine großen Differenzen aufweisen, damit die Vorder- und Rückseite der Benutzer nicht unterschiedlich appliziert werden. Zudem ist das Gleichmäßigkeitskriterium für die wirksame Bestrahlungsstärke für die jeweilige Nutzfläche aus Gl.4-6 zu beachten. Für die bewertende Messung der Gleichmäßigkeit der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke über die Liegefläche von Solariengeräten eignet sich ein Messraster mit einem Abstand $d \leq 0,1$ m. Für die Gleichmäßigkeitsbewertung der Bestrahlungsstärke über den Körperzylinder müssen integrale Werte der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke über die Körperfläche des Benutzers aufgenommen werden. Zu diesem Zweck wurde eine halbzyylinderförmige Dummy mit dem Durchmesser $d = 0,5$ m entworfen, wobei die Abstände zwischen den Messpunkten 0,1 m betragen. Als Beispiel ist die Verteilung der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke über den Körperzylinder eines Solariengerätes in Abhängigkeit von der Seitenlänge und der Entfernung von der Mitte der strahlenden Fläche in Abb. 4-28 aufgetragen. Bei dem hier vorgestellten Gerät beträgt die erythemwirksame Bestrahlungsstärke E_{er} der Liegefläche $0,27 \text{ Wm}^{-2}$ und liegt damit um ca. 15 % höher als die durch den Deckenfluter erzeugte erythemwirksame Bestrahlungsstärke. Daraus ergeben sich für diese Nutzflächen Schwellenbetrahlungszeiten für das UV-Erythem $t_{s,er}$ von 16 min. bzw. 18,5 min. und Sonnenerythempfaktoren f_{se} 0,9 bzw. 0,75. Für die Gesichts- und Schulterebene ergeben sich bei diesem Gerät $E_{er} = 0,19 \text{ Wm}^{-2}$ bzw. $0,21 \text{ Wm}^{-2}$ $t_{s,er} = 22$ min bzw. 20 min. $f_{se} = 0,64$ bzw. 0,7. Für die Liegefläche lässt sich dieses Gerät als DIN Typ 2 und RTS Gruppe Ic klassifizieren.

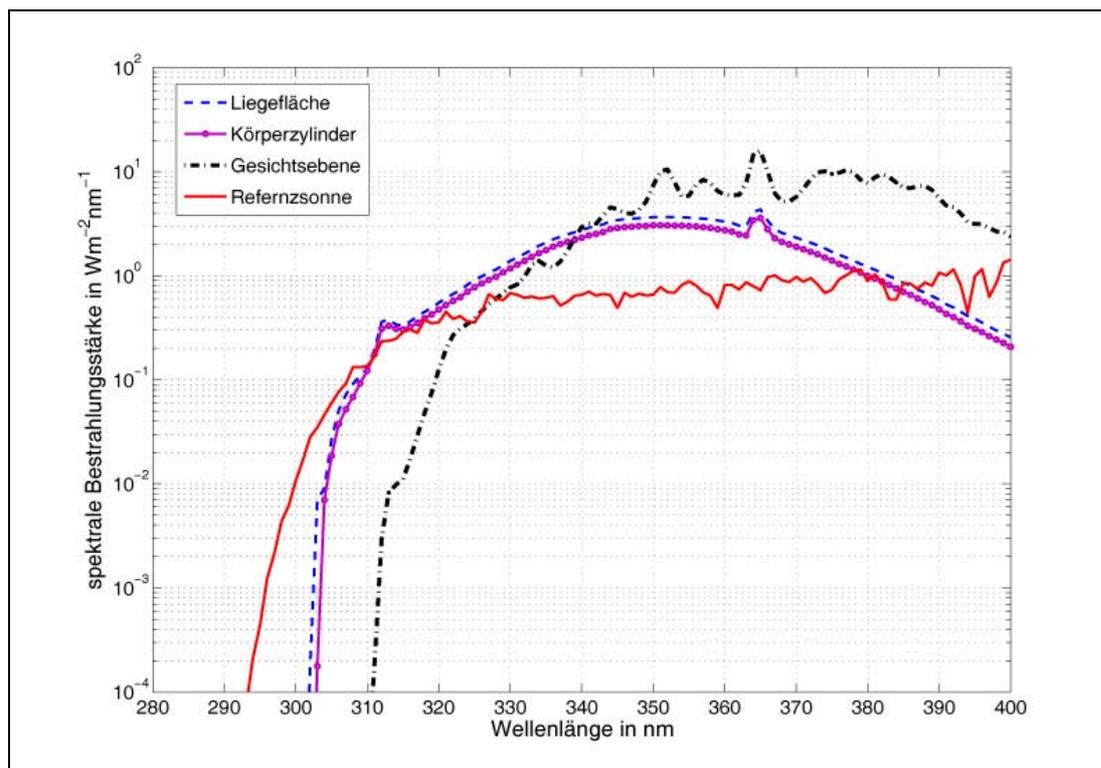


Abb. 4-29: Spektrale Bestrahlungsstärken eines Solariengerätes auf verschiedenen Nutz-
ebenen

Eine Übersicht über die durch Solariengeräte emittierten erythemwirksamen Bestrahlungsstärken $E_{er} \leq 320$ bzw. $E_{er} > 320$ sowie die Typeneinteilung nach DIN bzw. Gruppeneinteilung nach RTS bietet Abb. 4-36.

Die auf dem Markt befindlichen *Heimsolarien* werden zumeist als Gesichtsbräuner oder Teilkörperbestrahlungsgeräte ausgeführt. Als Strahlungsquellen werden bei diesen Bestrahlungsgeräten entweder horizontal Leuchtstofflampenpakete bestehend aus 4 - 6 Lampen (12,5 W/ 15 W/ 25 W) oder einzelne Halogen-Metaldampfstrahler (400 W) bevorzugt. Zur Filterung und Streuung der Strahlungsanteile werden Kunststofffilter und zur Strombegrenzung KVGs benutzt. Die geometrischen Abmessungen der Strahlungsaustrittsflächen liegen im Bereich von 0,3 m x 0,4 m bei Geräten mit Leuchtstofflampen und um 0,2 m x 0,25 m bei Halogen-Metaldampfsystemen. Zur Einstellung der Bestrahlungsdauer sind diese Geräte mit einer Zeitschaltuhr ausgestattet, die in marktüblichen Heimsolarien stufenlos bis 30 min oder 1 h einstellbar sind. Von Herstellern solcher Geräte werden gewöhnlich Informationen zu Risiken sowie Vorgaben und Empfehlungen hinsichtlich der einzuhaltenden Bestrahlungsdauern für definierte Abstände zwischen dem Gesichtsfeld und der Strahlungsaustrittsfläche als die Dosis maßgebend bestimmende Größe gemacht. Bei der Anwendung dieser Geräte stellt sich jedoch die Einstellung des

Bestrahlungsabstandes als problematisch heraus, da keine mechanischen Vorrichtungen zur Einhaltung der vorgegebenen Abstände vorhanden sind.

In Abb. 4-30 sind spektrale Bestrahlungsstärken auf der von den Herstellern empfohlenen Nutzebene einiger Heimsolariengeräte mit Leuchtstofflampensystemen dargestellt. Die durch diese Geräte auf der Anwendungsebene erzeugten erythemwirksamen Bestrahlungsstärken E_{er} liegen mit Werten zwischen $5 \cdot 10^{-3} \text{ Wm}^{-2}$ und $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ Wm}^{-2}$ deutlich unter dem von der SSK empfohlenem Grenzwert von $0,1 \text{ Wm}^{-2}$. Entsprechend ergeben sich für diese Bestrahlungsgeräte Sonnenerythempfaktoren f_{SE} zwischen 0,02 und 0,06 (SSK-Empfehlung: $f_{SE} \leq 0,33$). Bei Heimsolarien, die mit Halogen-Metaldampfampfen ausgestattet sind, liegen die erythemwirksamen Bestrahlungsstärken auf der empfohlenen Nutzebene zwischen $0,01 \text{ Wm}^{-2}$ und $0,2 \text{ Wm}^{-2}$ und die Sonnenerythempfaktoren zwischen 0,05 und 0,65. Da bei den hier untersuchten Geräten Strahler gleicher Wirkleistung benutzt wurden, resultieren die Unterschiede in E_{er} und f_{SE} neben dem in Abb. 4-31 dargestellten Spektralverhalten vor allem aus den durch die Hersteller empfohlenen Bestrahlungsabständen (0,1 m - 1 m). Schwellenbestrahlungszeiten für UV-Bestrahlungsgeräte mit Leuchtstofflampensystemen betragen 4 h bis 14 h, während diese Schwellenzeit bei Geräten mit Halogen-Metaldampfstrahlern unter einer Stunde liegen. Nach SSK soll eine automatische Abschaltung nach 1 MED erfolgen. Dieser Wert wird bei Einhaltung des empfohlenen Abstandes nicht überschritten.

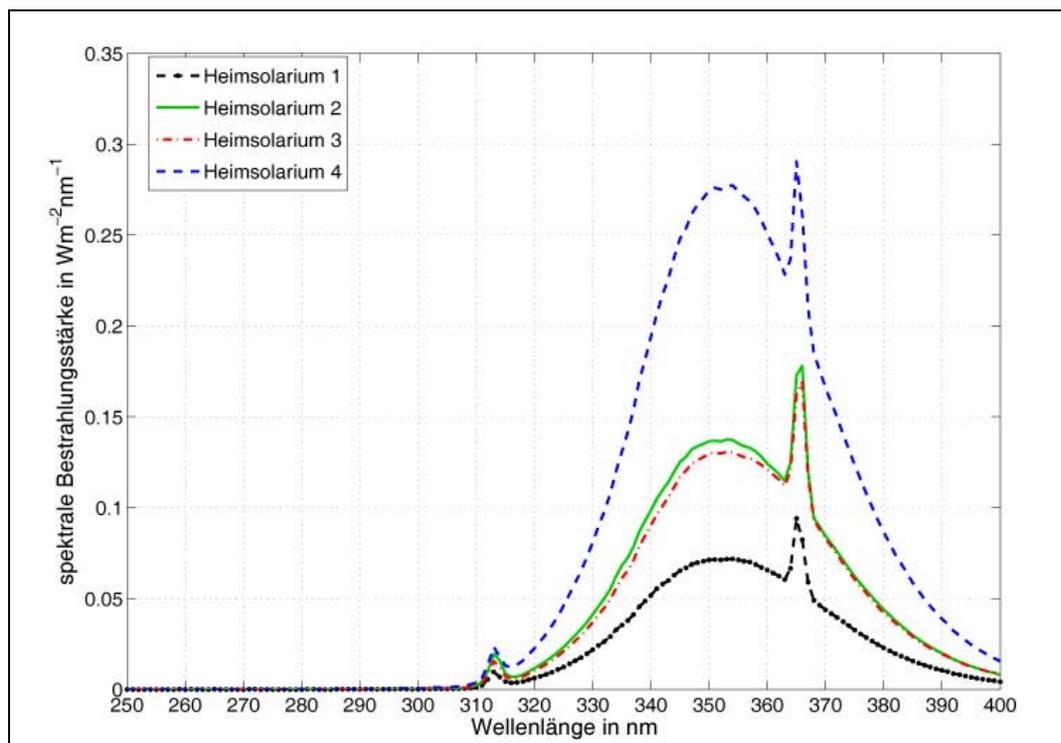


Abb. 4-30: Spektrale Bestrahlungsstärke einiger Heimsolarien mit Leuchtstofflampensystemen auf der von Herstellern empfohlenen Nutzebene

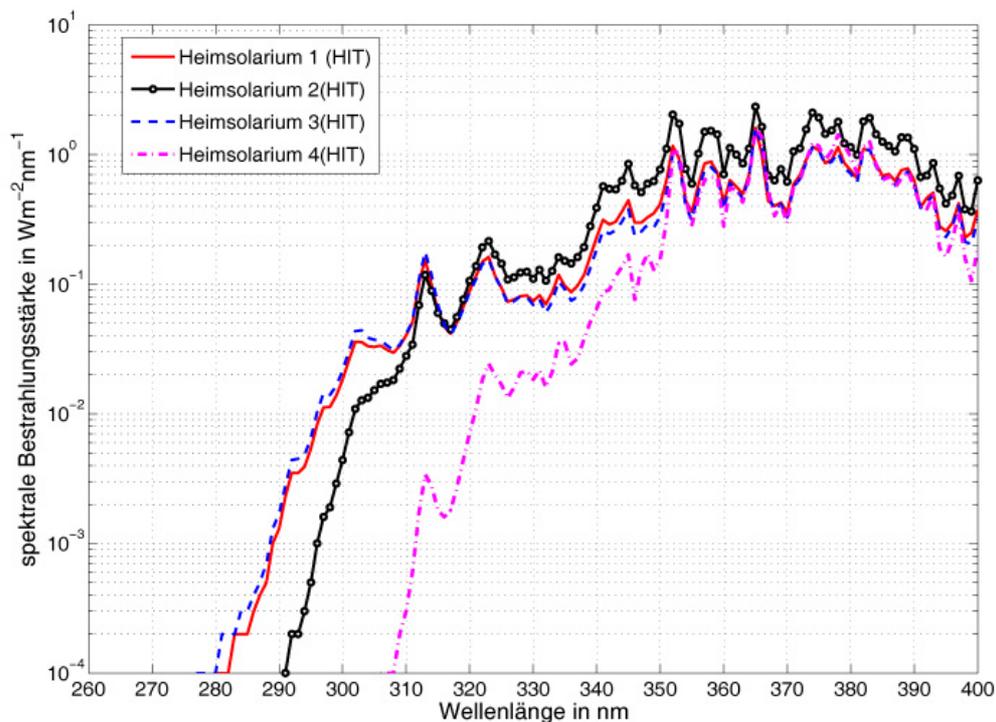


Abb. 4-31: Spektrale Bestrahlungsstärke einiger Heimsolarien mit Halogen-Metaldampflampen auf der von Herstellern empfohlenen Nutzebene

Gerätetechnik

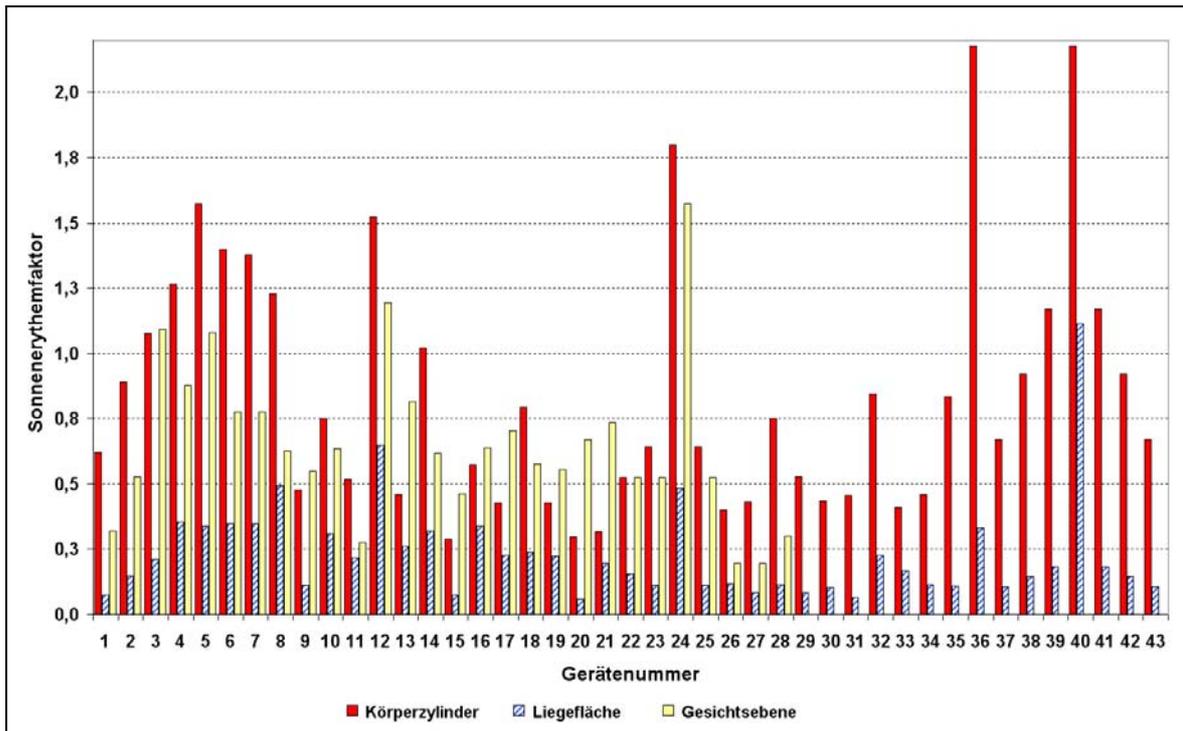


Abb. 4-32: Vergleich der Sonnenerythemfaktoren der Strahlungsausstrittsflächen von vermessenen Solariengeräten

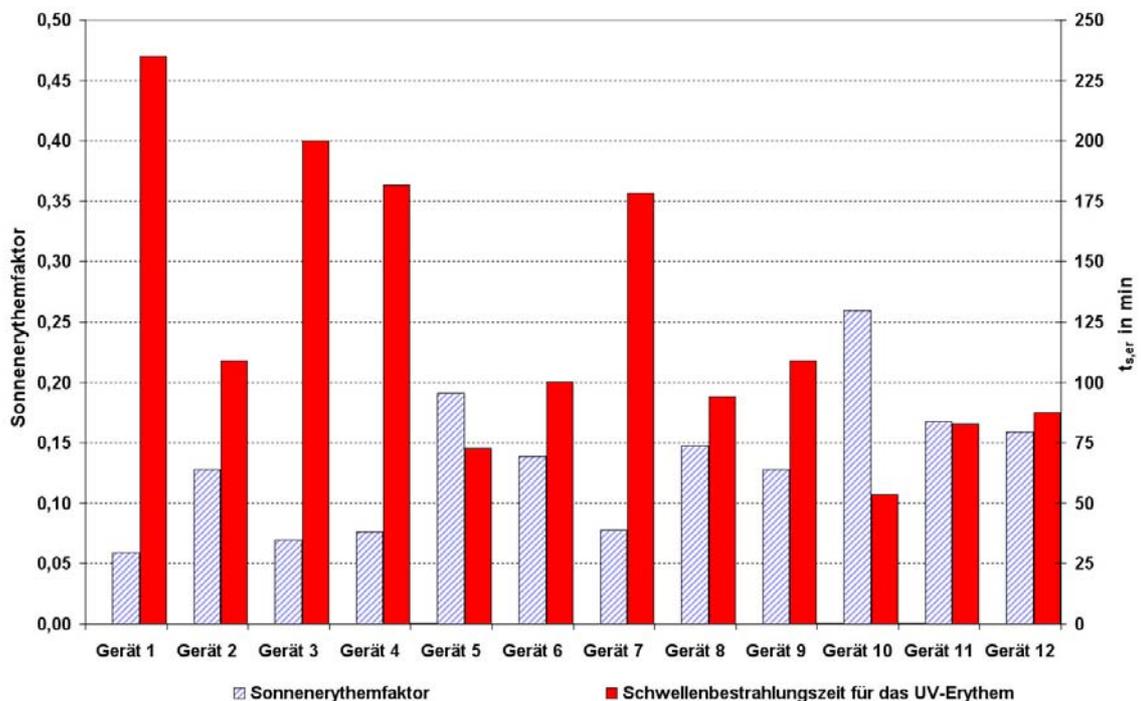


Abb. 4-33: Vergleich des Sonnenerythemfaktors und der Schwellenbestrahlungszeit für das UV-Erythem von vermessenen Heimsolarien

Zum Vergleich der Erythemwirksamkeit der vermessenen Geräte kann der Sonnenerythmefaktor f_{SE} herangezogen werden. Für die Liegeflächen bzw. Körperzylinder von Solariengeräten liegt dieser Wert in den meisten Fällen zwischen 0,5 und 1,3 (siehe Abb. 4-32). Relativ hohe Werte von ca. der doppelten Erythemwirksamkeit der Referenzsonnenstrahlung weisen 3 Deckenfluter und 2 Liegeflächen auf. Damit verbunden liegen die Schwellenbestrahlungszeiten zum Erreichen des UV-Erythems zwischen 4 min und 48 min.

Bei den Heimsolarien werden für die von den Herstellern dieser Geräte empfohlenen Bestrahlungsabstände, die zwischen 0,1 m und 1,2 m liegen, Sonnenerythmefaktoren zwischen 0,05 und 0,25 erreicht. Bei diesen Geräten liegen die entsprechenden Schwellenbestrahlungszeiten für das UV-Erythem zwischen 50 min und 240 min. In Abb. 4-33 sind diese Werte vergleichend dargestellt, wobei die Geräte 1 bis 4 mit Halogen-Metall-dampflampen und die übrigen mit Leuchtstofflampensystemen ausgestattet sind.

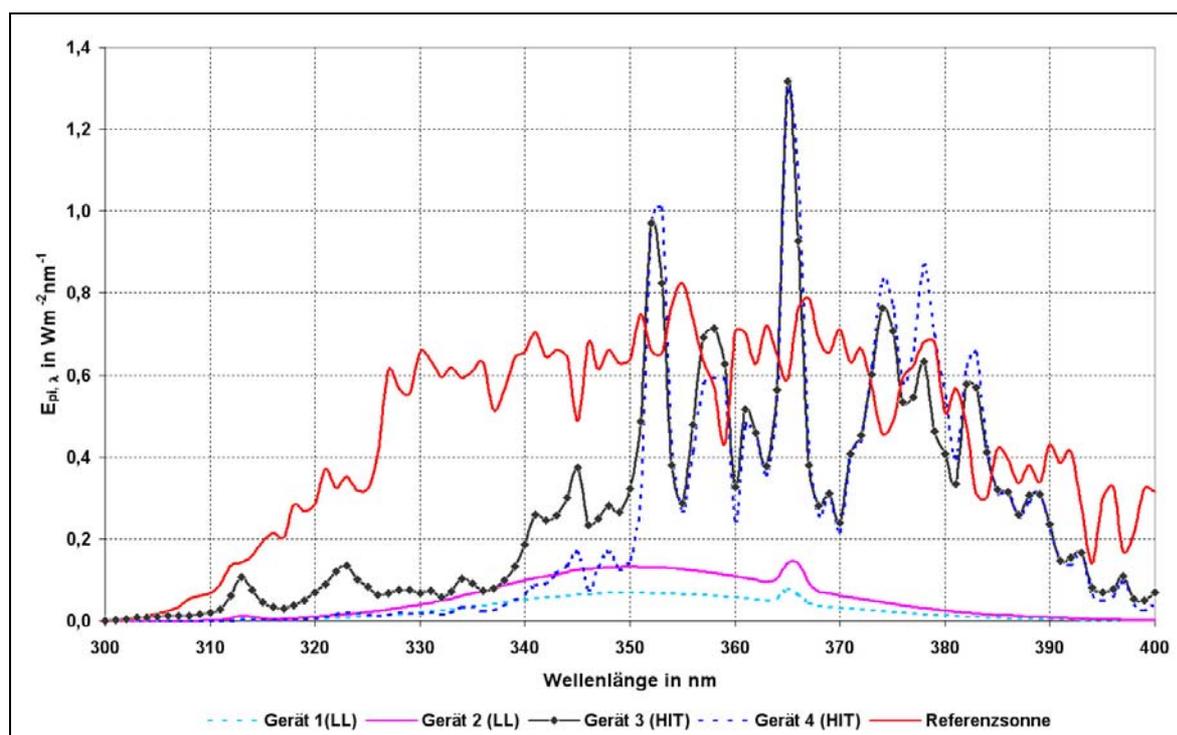


Abb. 4-34: Wirksamkeit der Sofortpigmentierung von Heimsolariengeräten mit Leuchtstoff- und Halogenmetallampflampen sowie der Referenzsonne

Die untersuchten Geräte erzeugen im Gegensatz zur Referenzsonne hohe Bestrahlungsstärken im UV-A-Bereich. Diese Strahlungsanteile sind einerseits maßgeblich an der Erythemwirksamkeit beteiligt, haben andererseits eine hohe Wirksamkeit gegenüber der UV-A-stimulierenden Effekte zur Folge. Das Verhältnis der Wirkungen zur direkten Pig-

mentierung und zur Erythemwirksamkeit bzw. zur Photokarzinogenität ist in allen Fällen größer und damit günstiger.

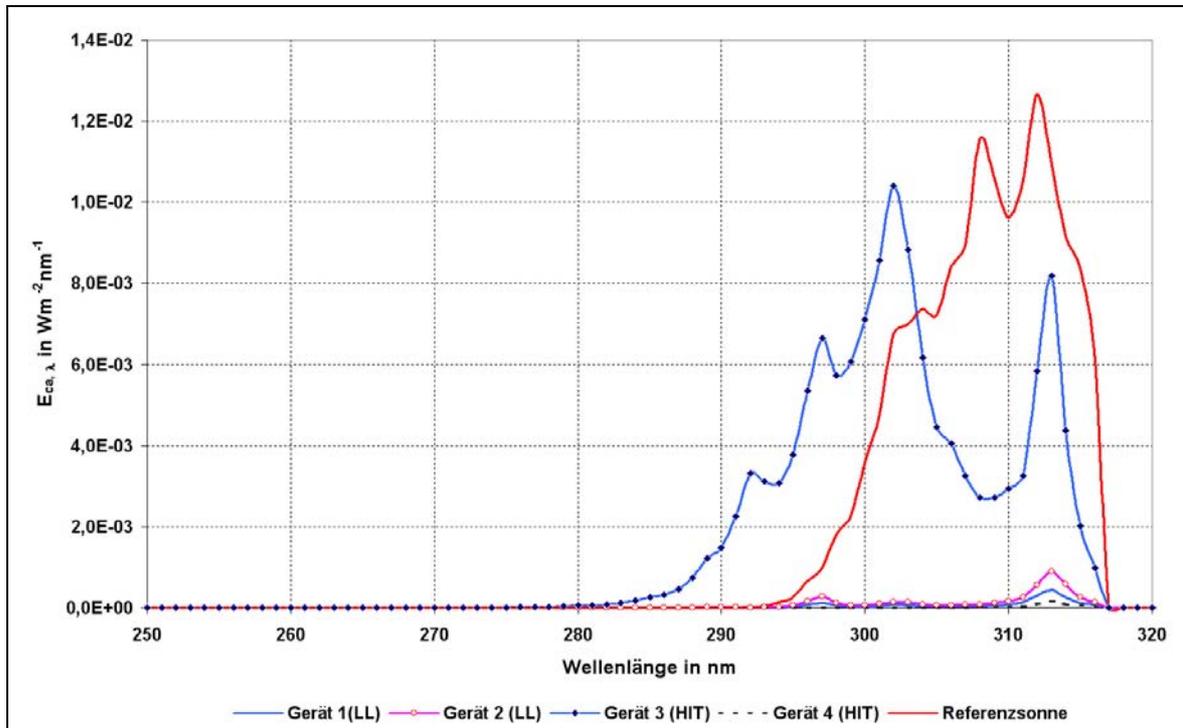
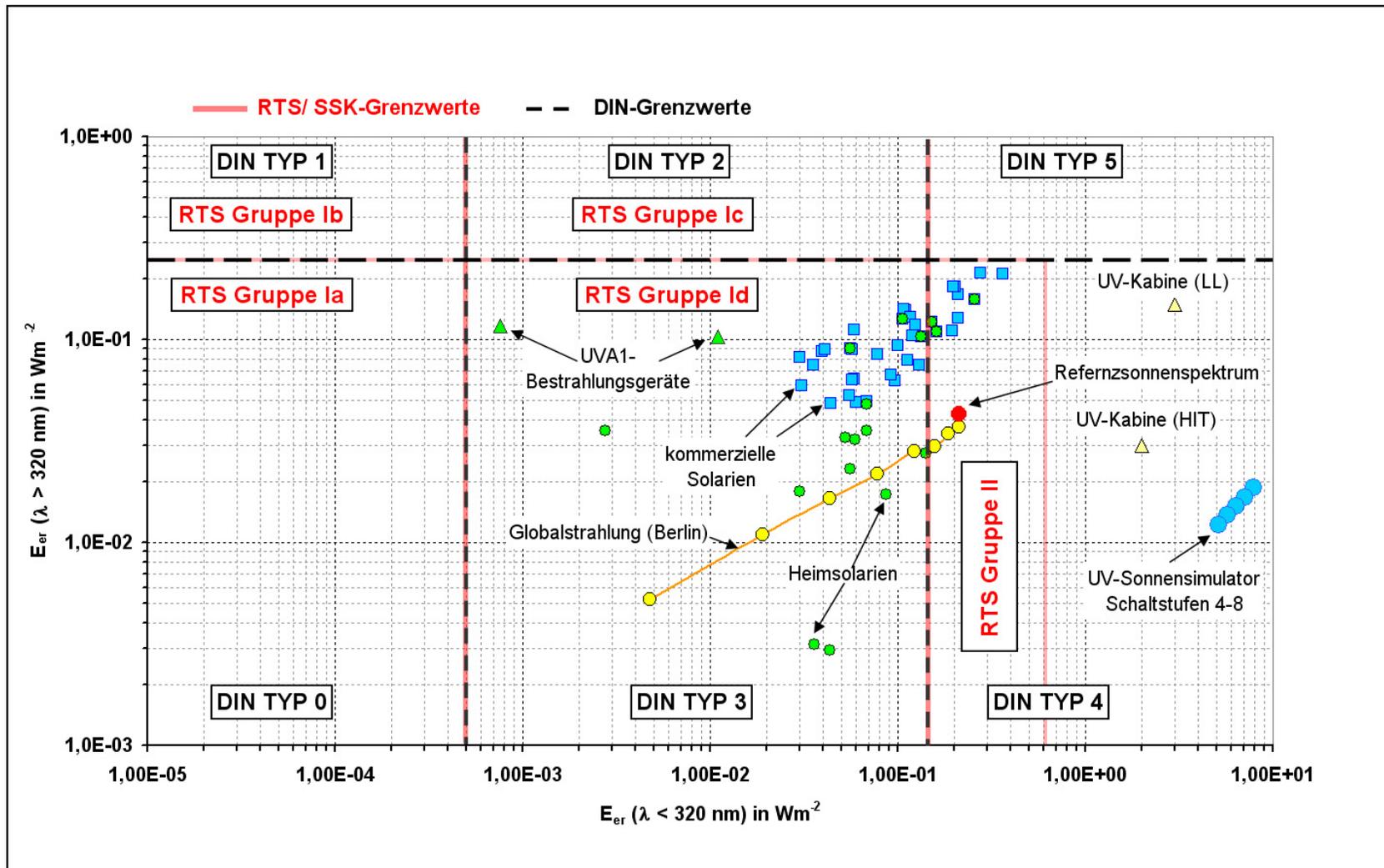


Abb. 4-35: Wirksamkeit der Photokarzinogenese von Heimsolariengeräten mit Leuchtstoff- und Halogenmetaldampflampen sowie der Referenzsonne

Die Typeneinteilung nach DIN bzw. Gruppeneinteilung nach RTS von den vermessenen UV-A1-, Solarien- und Heimsolariengeräten sind übersichtsmäßig in Abb. 4-36 dargestellt. Daneben sind Typeneinteilungen für die Messergebnisse des in der vorliegenden Arbeit fertig gestellten UV-Sonnensimulators zur Vitamin D₃-Photosynthese sowie die der Referenzsonne für verschiedenen Höhenwinkel verdeutlicht.

Abb. 4-36: Typeneinteilung nach DIN 5050 Teil 1 und nach RTS der SSK von untersuchten UV-Bestrahlungsgeräten



4.4 Lichttherapiegeräte

Seit den 80er Jahren werden zunehmend Forschungsergebnisse veröffentlicht, wonach das menschliche Auge neben seinen Aufgaben für die Sehaufgaben wie Distanzsinn und die räumliche Orientierung zusätzliche Funktionen erfüllt. Diese physiologischen Wirkungen der optischen Strahlung im sichtbaren Bereich des Spektrums besonders auf die sog. innere Uhr des Menschen bilden einen aktuellen Forschungsschwerpunkt in Lichttechnik, Psychologie und Medizin. Aufgrund der gewonnenen Ergebnisse stellen sich folgende Wirkungen besonders heraus:

- Licht reguliert den Melatoninhaushalt und (damit) das circadiane System (siehe Abschnitt 2.4.3)
- Licht hat Wirkungen auf die Leistungsfähigkeit, subjektive Wachsamkeit, Tiefe und Qualität des Schlafs /25/, /89/, /8/, /9/, /141/, /131/
- Licht beeinflusst Hirnaktivitäten und Körpertemperatur /14/, /83/
- Durch Lichttherapie kann die saisonal abhängige Depression (SAD) gemildert werden /147/, /14/, /141/

Diese photobiologischen Effekte sind in erster Linie durch die Regulation des Melatoninhaushaltes bedingt, für den das Licht eine Zeitgeberfunktion erfüllt. Damit deutet sich an, dass die Beleuchtungstechnik auf der Grundlage zahlreicher Studien zukünftig nicht nur durch die visuellen Aspekte sondern auch durch die photobiologischen Gesichtspunkte bestimmt wird. Insbesondere die Wirkung des Lichtes auf das circadiane System dürfte dabei eine zunehmende Bedeutung in der Lichttechnik gewinnen. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit sind Fragen der spektralen Zusammensetzung, die tageszeitliche Abhängigkeit sowie der Schwellenwert der wirksamen Beleuchtungsstärke für die Melatoninsuppression ein viel diskutiertes Thema in der Lichttechnik und nur teilweise geklärt.

4.4.1 Technische Ausführung von Lichttherapiegeräten

Auf dem kommerziellen Markt werden Lichttherapiegeräte zumeist als Teilkörperbestrahlungsgeräte zur Applikation der Gesichtspartie angeboten. Allerdings finden sich auch spezielle Ausführungen wie ausgedehnte Lichtbänder oder Leuchtdiodenkonstruktionen zur Bestrahlung der Augen. Zur Erzielung einer homogenen Leuchtdichte über die strahlenden Flächen eignen sich vor allem Leuchtstofflampen als Lichtquellen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden mehrere handelsübliche Lichttherapiegeräte untersucht. Die Wirkleistungen der bei diesen Geräten eingesetzten Lampen liegen zwischen 15 W - 36 W, wobei die Lampenanzahl zwischen 2 und 12 variiert. Als Lichtquellen kommen so-

wohl traditionell röhrenförmige Leuchtstofflampen als auch Kompaktleuchtstofflampen (KLL) mit höheren Leuchtdichten in Frage. Aufgrund der bereits erläuterten, neueren Erkenntnisse über die spektralen Zusammenhänge der Melatoninsuppression werden bei Lichttherapiegeräten anstelle von warmweißen Lichtfarben zunehmend ähnlichste Farbtemperaturen T_{cp} zwischen 4.000 K - 6.000 K bevorzugt. Zur Minimierung des Schädigungspotentials für Haut und Augen durch UV-Strahlung werden bei diesen Geräten UV-Schutzfilter benutzt, die meist aus Kunststoffmaterialien bestehen. Diese Filter tragen zudem durch ihre streuenden Transmissionseigenschaften zur Gleichmäßigkeit der Leuchtdichte über die Lichtaustrittsfläche und damit zur Blendungsbegrenzung bei. Als Vorschaltgeräte werden bevorzugt elektronische Vorschaltgeräte (EVGs) benutzt, um u. a. zeitliche Veränderungen des Lichtes in Bereichen oberhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz f_v zu realisieren.

Zur photobiologischen Bewertung von Lichttherapiegeräten werden im Folgenden Bewertungsgrößen definiert. Zu den wichtigsten Parametern für die strahlungsphysikalische und lichttechnische Bewertung von Lichttherapiegeräten zählen die zentrale Beleuchtungsstärke in vorgegebenen Ebenen, die Leuchtdichte und ihre Verteilung über die strahlende Fläche sowie spektrale und farbmetrische Eigenschaften. Das natürliche Tageslicht wird dabei als Referenz angesetzt.

4.4.2 Zentrale Beleuchtungsstärke E_v

Als abgesicherte Bewertungsgrenze gilt z. Zt. die zentrale Beleuchtungsstärke auf der vorgegebenen Anwendungsebene. Um eine für die Therapie von SAD effektive Wirkung zu erzielen, wird in der Literatur eine minimale zentrale Beleuchtungsstärke von 2.500 lx angegeben. Der Maximalwert der Beleuchtungsstärke ist mit 10.000 lx durch die physiologische Blendung festgelegt /147/. Die Beleuchtungsstärke wird i. A. mit einem integralen $V(\lambda)$ -angepassten Empfänger (siehe 3.3.2) im Zentrum der Messebenen senkrecht und zentrisch zur Normalen durch die Mitte der Lichtaustrittsfläche aufgenommen. Gewöhnlich wird bei den marktüblichen Lichttherapiegeräten zum Hausgebrauch ein Bestrahlungsabstand von $d = 0,5$ m vorgeschlagen. Durch die Messung der Abstandsabhängigkeit der Beleuchtungsstärke kann die Ausstrahlungscharakteristik beschrieben werden. Für einige handelsübliche Lichttherapiegeräte sind Ergebnisse der zentralen Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit vom Abstand von der Lichtaustrittsfläche in Abb. 4-37 dargestellt.

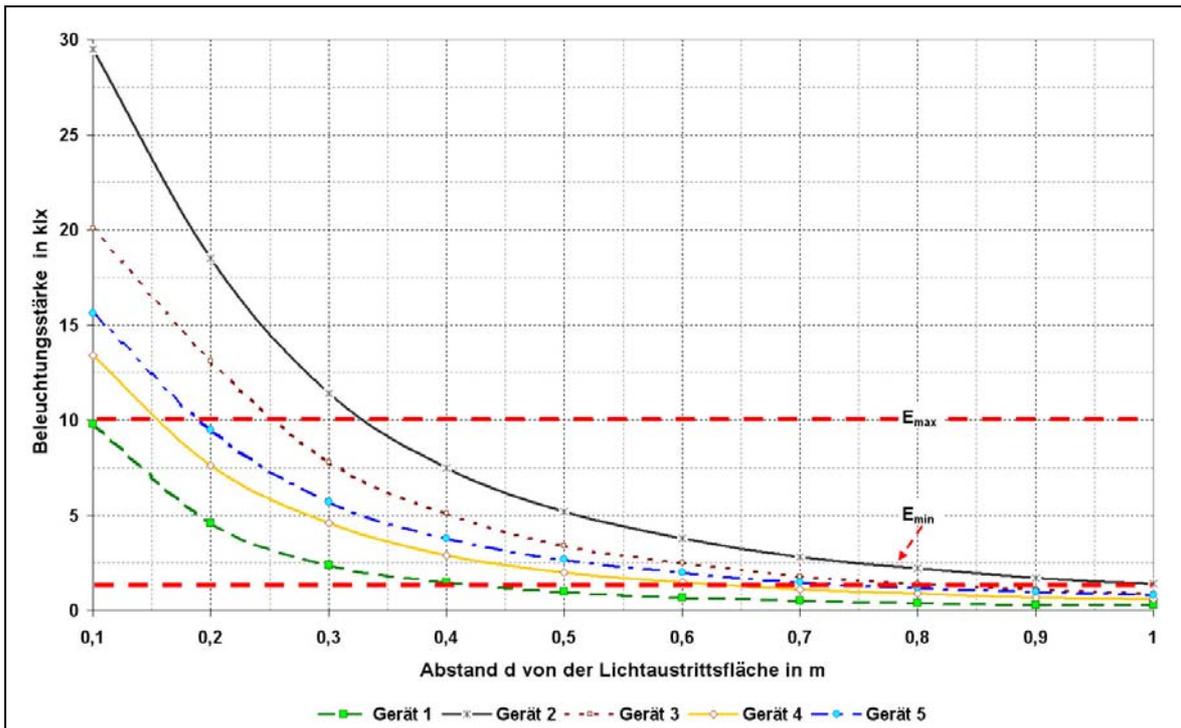


Abb. 4-37: Zentrale Beleuchtungsstärken einiger handelsüblicher Lichttherapie in Abhängigkeit vom Abstand zur Strahlungsausstrittsfläche

4.4.3 Spektrale Zusammensetzung des Lichtes

Durch das Aktionsspektrum zur Melatoninsuppression wird maßgeblich die spektrale Zusammensetzung des Lichtes von Lichttherapiegeräten vorgegeben. Die Unterdrückung des Melatonins wird vor allem durch die kurzwelligen Anteile im Blauen begünstigt, wobei das Empfindlichkeitsmaximum der circadianen Photorezeptoren nach vorliegenden Studien bei 460 nm liegt [127], [52], [145]. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit liegen verschiedene Vorschläge zur vergleichenden Bewertung der Wirksamkeit von Lichttherapiegeräten und Lichtquellen hinsichtlich der Melatoninsuppression vor. Gall definiert ausgehend von den Forschungsergebnissen von Brainard und Thapan eine gemittelte circadiane Wirkungskurve $c(\lambda)$ und einen circadianen Wirkungsfaktor a_{cv} [49], [47], [48], [50]:

$$a_{cv} = \frac{\int X_{e\lambda} \cdot c(\lambda) \cdot d\lambda}{\int X_{e\lambda} \cdot v(\lambda) \cdot d\lambda} \quad \text{Gl. 4-12}$$

Mit den spektralen Empfindlichkeitswerten $s_{ms}(\lambda)$ für diskrete Wellenlängen nach Brainard und Thapan wurde im Kapitel 2.4.3 eine Ausgleichsfunktion als Wirkungsspektrum zur Melatoninunterdrückung durch Photorezeptoren definiert (siehe Abb. 2-11). Damit lässt sich die wirksame Bestrahlungsstärke zur Melatoninsuppression definieren:

$$E_{ms} = \int_0^{\infty} E_{e\lambda}(\lambda) \cdot s_{ms,rel}(\lambda) d\lambda \quad \text{Gl. 4-13}$$

Zum Vergleich der Wirksamkeit von Lichtquellen und Lichttherapiegeräten hinsichtlich ihrer Wirkung auf das circadiane System kann ein Wirkungsgrad der Melatoninsuppression von bestrahlenden Quellen definiert werden:

$$\eta_{ms} = \frac{\int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} E_{e\lambda}(\lambda) \cdot s_{ms,rel}(\lambda) d\lambda}{\int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} E_{e\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad \text{Gl. 4-14}$$

Durch den Nenner wird dabei der Integralwert der Bestrahlungsstärke im sichtbaren Spektralbereich und durch den Zähler der mit der Wirkungsfunktion der Melatoninsuppression bewerteter Anteil dieser Strahlung festgelegt.

Piazena schlägt in Anlehnung auf Gall ein circadianes Wirkungskriterium f_{ms} vor, mit Hilfe dessen die hinreichenden Expositionen mit künstlich erzeugter Strahlung im Vergleich zu den vorliegenden Schwellenwerten zur Melatoninsuppression durch solare Strahlung verglichen werden kann /110/ :

$$f_{ms} = \frac{E_i}{E_{ms}} \geq 1 \quad \text{Gl. 4-15}$$

Ausgehend von den Untersuchungsergebnissen von Brainard und Thapan werden dabei als Schwellenbestrahlung zum Erreichen der wirksamen Melatoninunterdrückung $H_{c,s} \approx 360 \text{ Jm}^{-2}$ bis 540 Jm^{-2} und effektive Bestrahlungsstärken $E_{c,s} \approx 0,2 \text{ Wm}^{-2}$ bis $0,3 \text{ Wm}^{-2}$ angesetzt. Die Wirksamkeit der Melatoninsuppression einer künstlichen Strahlung kann durch den Vergleich mit einer festgelegten natürlichen Bestrahlung erfolgen. Mit dieser wirksamen Referenzstrahlung kann der Sonnenmelatoninfaktor f_{ms} definiert werden:

$$f_{ms} = \frac{\int_0^{\infty} E_{e\lambda}(\lambda) \cdot s_{ms,rel}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{e\lambda,ref}(\lambda) \cdot s_{ms,rel}(\lambda) d\lambda} = \frac{E_{ms,Strahler}}{E_{ms,ref}} \quad \text{Gl. 4-16}$$

Als Minimalwert der Beleuchtungsstärke zur effektiven Unterdrückung von Melatonin wird in der Literatur vielfach $E_v = 2.500 \text{ lx}$ angesetzt. Dieser Wert entspricht nach CIE einer vertikalen Beleuchtungsstärke des vollkommen bedeckten Himmels für den Sonnenhöhenwinkel $\gamma = 17^\circ / 19^\circ / 31^\circ$. Diese spektrale Bestrahlungsstärke, die durch den vollständig

bedeckten Himmel bei $\gamma = 17^\circ$ in einer vertikalen Ebene erzeugt wird, könnte als Referenzbestrahlung genutzt werden.

Zur endgültigen Festlegung von Schwellenwerten zum Erreichen der suppressiven Melatoninsteuerung durch Lichtabsorption sind weitere Studien notwendig, da mit Hilfe der z. Zt. verfügbaren Daten die Dosis-Wirkungs-Relationen nur zum Teil geklärt sind. Hierbei sind neben obigen Randbedingungen vor allen Dingen die spektralen Charakteristika der eingesetzten Lichtquellen und der damit erreichten Wirkungen eindeutig zu klären. Bei der Festlegung und Anwendung einer Referenzstrahlungsgröße für die Melatoninsuppression müssen weiterhin Aspekte der Tageszeitabhängigkeit der Melatoninsteuerung durch retinal absorbiertes Licht sowie weitere physiologische Gesichtspunkte wie Altersabhängigkeit u. ä. berücksichtigt werden.

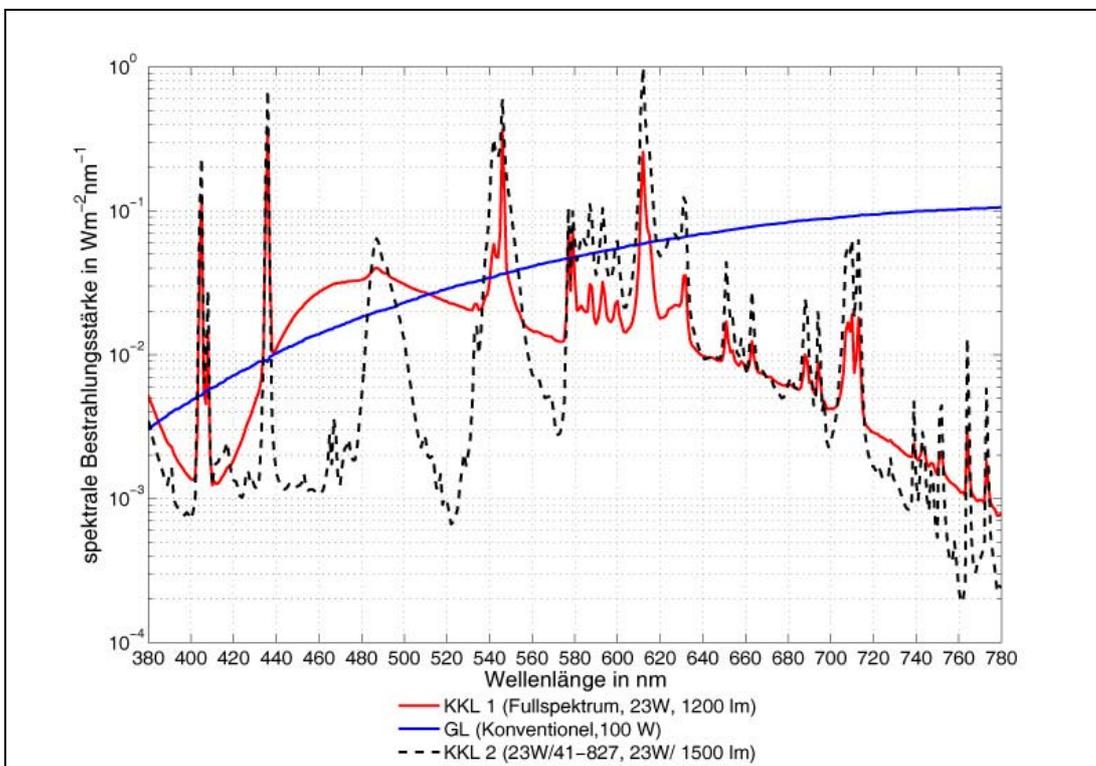


Abb. 4-38: Spektrale Bestrahlungsstärke einiger Lichtquellen ($d = 0,4 \text{ m}$)

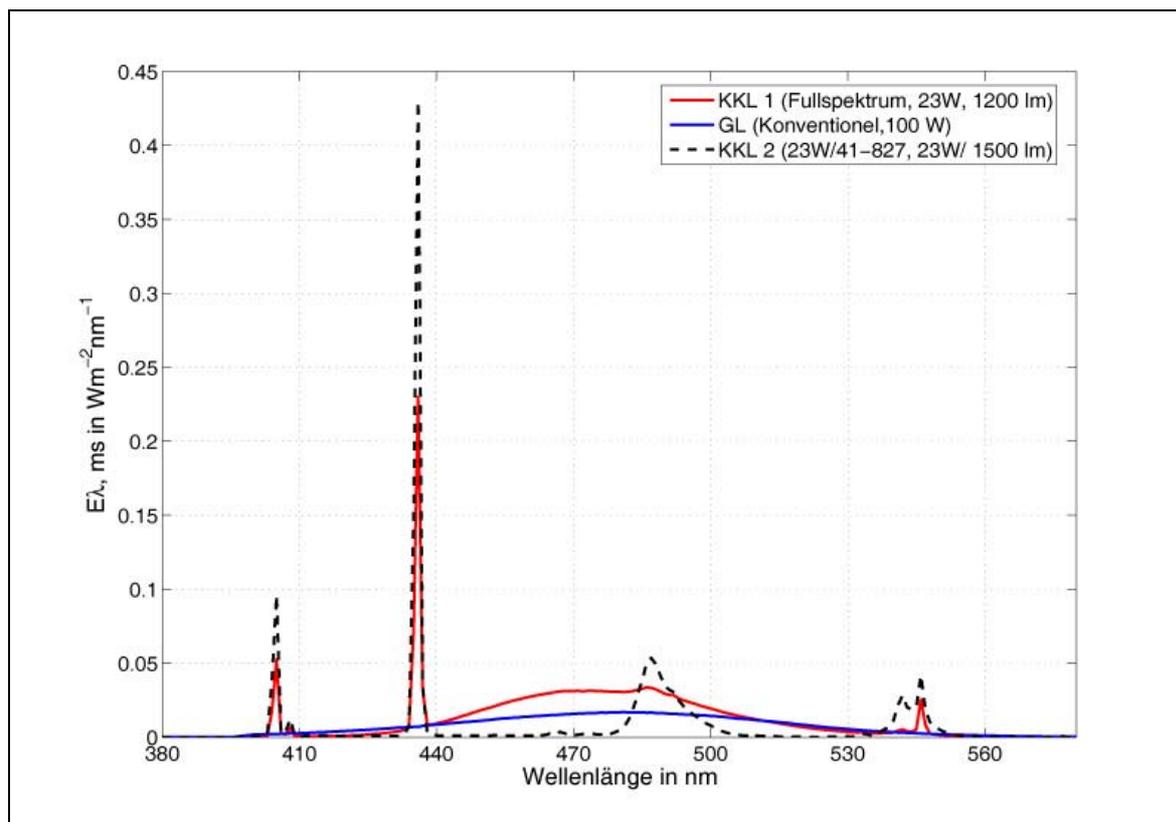


Abb. 4-39: Wirksame spektrale Bestrahlungsstärke zur Melatoninsuppression einiger Lichtquellen ($d = 0,4 \text{ m}$)

Die spektralen Verteilungen der Bestrahlungsstärke $E_{\lambda}(\lambda)$ und die jeweiligen wirksamen spektralen Bestrahlungsstärken $E_{ms, \lambda}(\lambda)$ von zwei Kompaktleuchtstofflampen (KKL) und einer Glühlampe in einem Bestrahlungsabstand von $0,4 \text{ m}$ sind in Abb. 4-38 dargestellt. Bei der hier als „Vollspektrum“ bezeichneten Kompaktleuchtstofflampe weist das Lampenspektrum im kurzwelligen Bereich des VIS durch die Verwendung eines geeigneten Leuchtstoffes höhere Anteile auf. Damit wird im betreffenden Wirkungsbereich eine höhere wirksame Bestrahlungsstärke zur Melatoninsuppression erreicht. Konventionelle Glühlampen besitzen im kurzwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums geringere Anteile, so dass sie sich zum Einsatz in Lichttherapiegeräten kaum eignen. Für diese Lichtquellen sind die Werte der auf das circadiane System wirksamen Bestrahlungsstärken $E_{ms}(\lambda)$, der integralen Bestrahlungsstärken im VIS sowie des oben eingeführten Wirkungsgrades η_{ms} in Tabelle 4-10 zusammengefasst.

Tabelle 4-10: Bestrahlungsstärken $E_{380\text{nm}-780\text{nm}}(\lambda)$, wirksame Bestrahlungsstärken $E_{\text{ms}}(\lambda)$ und Wirkungsgrade η_{ms} zur Melatonin-suppression von Lichtquellen und Lichttherapiegeräten

	$E_{380\text{nm}-780\text{nm}}(\lambda)$ in Wm^{-2}	$E_{\text{ms}}(\lambda)$ in Wm^{-2}	η_{ms}
KKL (23 W, konventionell)	12,55	1,66	0,13
KKL (23 W, fullspektrum)	7,59	2,43	0,32
Allgebrauchsglühlampe (100W)	20,33	1,44	0,07
Lichttherapiegerät 1	8,92	2,6	0,29
Lichttherapiegerät 2	16,0	3,7	0,23
Lichttherapiegerät 3	15,4	4,6	0,30
Lichttherapiegerät 4	16,1	4,4	0,28
Lichttherapiegerät 5	3,16	1,2	0,36

Daneben sind in der obigen Tabelle die Bewertungsgrößen für verschiedene Lichttherapiegeräte zu sehen. Die zugehörigen spektralen Bestrahlungsstärken sind in Abb. 4-40 dargestellt. Die Geräte 1 bis 4 sind mit je 2 Leuchtstofflampen ($P_w = 36 \text{ W}$) bestückt, wobei in Gerät 1 und 3 Lichtquellen gleichen Typs eingesetzt sind. Die Unterschiede im Spektralverlauf sind bei diesen Geräten durch die spektralen Transmissionseigenschaften der benutzten Filtermaterialien begründet. Der Wirkungsgrad der Melatonin-suppression ist bei Lichttherapiegerät 2 am niedrigsten, weil dieses in dem betreffenden Wirkungsspektrum die geringsten Strahlungsanteile erzeugt. Zusätzlich ist in dieser Abbildung die spektrale Bestrahlungsstärke eines mützenförmig ausgelegten Lichttherapiegerätes (Gerät 5) aufgetragen, bei dem als Lichtquellen 2 X 3 LEDs benutzt sind. Der Bestrahlungsabstand beträgt bei diesem Gerät 0,02 m. Da die Leuchtdioden besonders im blauen Bereich des Spektrums relativ hohe Strahlung emittieren, ergibt sich für dieses Gerät der größte Wert für den definierten Wirkungsgrad η_{ms} . Jedoch bleibt die tatsächliche Wirkung auf das circadiane System dieses Gerätes aufgrund der unüblichen Anwendung durch ausschließliche Bestrahlung der unteren Netzhautbereiche nachzuprüfen.

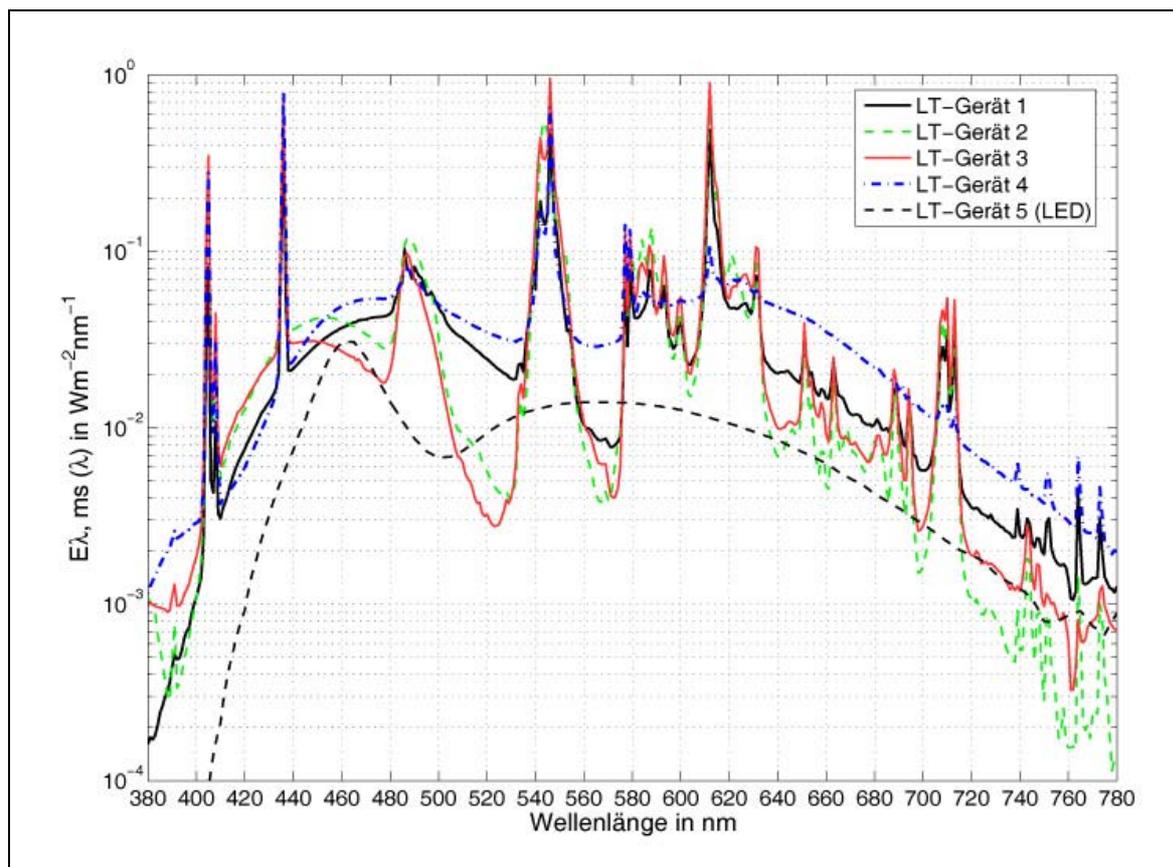


Abb. 4-40: Spektrale Bestrahlungsstärke einiger Lichttherapiegeräte in einer Abstand von $d = 0,4$ bzw. $d = 0,02$ m (LED-Gerät) vom geometrischen Mittelpunkt der Lichtaustrittsfläche

4.4.4 Farbtemperatur T_{cp}

Für die farbmetrische Bewertung von Lichttherapiegeräten eignet sich das Spektralverfahren (siehe 3.6). Die Strahlungsfunktion sollte dabei über die durch das Gerät beleuchtete $BaSO_4$ -Presstablette (siehe Abb. 3-14) in einer festgelegten Messanordnung aufgenommen werden. Gewöhnlich geht man von der Forderung aus, dass die Farbtemperatur der in den Lichttherapiegeräten eingesetzten Lampen die der Globalstrahlung ($T_{cp} = 6500$ K) möglichst nahe kommen. Als hinreichend wird eine ähnlichste Farbtemperatur von 4000 K für solche Geräte angesetzt. Für einige Geräte sind die ermittelten Werte der farbmetrischen Parameter in Tabelle 4-11 zusammengestellt. Die relativ hohe ähnlichste Farbtemperatur T_{cp} des mit LEDs bestückten Gerätes mit 6770 K ist durch die Spektralanteile im Blauen bedingt. Durch diese Strahlungsanteile wird die ähnlichste Farbtemperatur T_{cp} erhöht, und die Normfarbwertanteile x , y nehmen kleinere Werte an.

Tabelle 4-11: Die ähnlichste Farbtemperatur T_{cp} sowie die Normfarbwertanteile x und y einiger Lichttherapiegeräte

Gerät	T_{cp} in K	Normfarbwertanteil x	Normfarbwertanteil y
Lichttherapiegerät 1	4720	0.355	0.367
Lichttherapiegerät 2	5400	0.336	0.355
Lichttherapiegerät 3	5090	0.344	0.363
Lichttherapiegerät 4	4400	0.367	0.378
Lichttherapiegerät 5 (LED)	6770	0.311	0.309

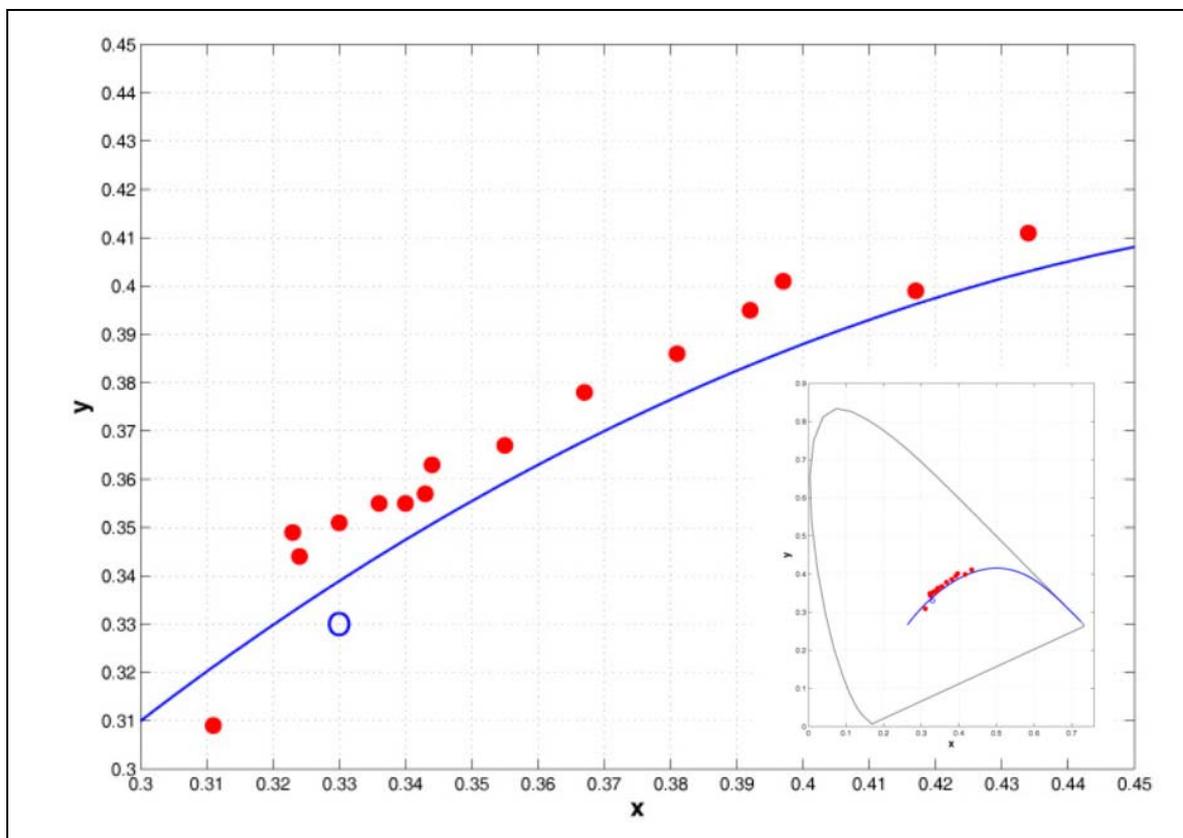


Abb. 4-41: Normfarbwertanteile einiger Lichttherapiegeräte sowie des Unbuntpunktes und ihre relative Lage zum Kurvenzug des Planckschen Strahlers

Die sich aus den farbmetrischen Bewertungen ergebenden Normfarbwertanteile x und y einiger marktüblicher Lichttherapiegeräte sind in Abb. 4-41 dargestellt. Die Mehrzahl der Farbörter von untersuchten Geräte liegen im Bereich der ähnlichsten Farbtemperaturen $T_{cp} > 4500$ K. Die Wirksamkeit zur Hemmung des Melatonins nimmt zu wärmeren Farbtemperaturen hin ab.

4.4.5 Ausschluß schädigender Strahlungswirkungen

Die Strahlungsquellen für den Einsatz in den Lichttherapiegeräten sind zumeist Quecksilberniederdruckentladungslampen mit Leuchtstoff. Da bei der Lichttherapie hauptsächlich der sichtbare Anteil des Spektrums wirksam ist, besitzen diese Lampen i. A. kaum Strahlungsanteile im UV oder diese werden meistens durch Kunststofffilter absorbiert. Da das Wirkungsspektrum zur Melatoninunterdrückung bzw. zur Steuerung der sog. inneren Uhr sich über den kürzerwelligen Bereich des VIS erstreckt, sind die Leuchtstoffe dieser Lampen so zu wählen, dass einerseits eine effiziente Therapie ermöglicht wird, andererseits aber die gesundheitsschädigenden Effekte der UV-Strahlung verhindert werden. Dabei sind neben der Erythembildung besonders die Augenschädigung zu beachten, weil die Benutzung von einer UV-Schutzbrille ausgeschlossen ist. Die Bewertung der spektralen Bestrahlungsstärke erfolgt nach dem Additivitätsgesetz:

$$E_{er} = \int_{250\text{ nm}}^{400\text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot s_{er}(\lambda) d\lambda \quad \text{Gl. 4-17}$$

und nach dem Linearitätsgesetz für Schwellenbestrahlungszeiten:

$$t_{s,er} = \frac{H_{s,er}}{E_{er}} \quad \text{Gl. 4-18}$$

Das Wirkungsspektrum $s_{\text{Auge}}(\lambda)$ wird den Vorschriften der BG und der ICNIRP entnommen. Für die jeweiligen Schwellenbestrahlungszeiten für den Augenschutz gilt:

$$t_{s,Auge} = \frac{30\text{ Jm}^{-2}}{E_{\text{Auge}}} \quad \text{Gl. 4-19}$$

Die Untersuchungen von mehreren handelsüblichen Lichttherapiegeräten zeigten, dass Schwellenwerte für gesundheitsgefährdende Effekte in der Praxis nicht erreicht werden.

4.4.6 Leuchtdichte

Bei der Bewertung von Lichttherapiegeräten spielt die Leuchtdichte eine besondere Rolle, da diese Größe den Helligkeitseindruck des Menschen bestimmt. Beleuchtete Gegenstände und Selbstleuchter (Lichtquellen) werden durch ihre Form, Farbe und Leuchtdichte wahrgenommen. Im Anwendungsfall wird das Bild des Gerätes auf die Netzhaut abgebildet. Die Größe des Objektbildes auf der Netzhaut und die Höhe der Netzhautbeleuchtungsstärke hängen von der Entfernung des Gerätes, der Fläche der Eintrittspupille und von der Leuchtdichte ab. Der Durchmesser der Augenpupille des Menschen variiert zwischen 2 mm und 8 mm und ist abhängig von der Umgebungsleuchtdichte (Adaptations-

leuchtdichte). Der Zusammenhang zwischen der Leuchtdichte und der Beleuchtungsstärke ist dabei definiert zu:

$$E = \int_{A_2} L \cdot \cos \varepsilon_2 \cdot d\Omega_2 \quad \text{Gl. 4-20}$$

Für den senkrechten Lichteinfall und einen Gesamttransmissionsgrad der Augenmedien τ_A und den Öffnungswinkel des Auges α lässt sich die Netzhautbeleuchtungsstärke nach /60/ wie folgt bestimmen:

$$\begin{aligned} E_N &= L_A \cdot \tau_A \cdot \sin^2 \alpha \cdot \Omega \\ &= L_A \cdot \tau_A \cdot \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{a^2} \cdot \Omega \\ &= c \cdot \tau_A \cdot A_p \end{aligned}$$

D. h., die Netzhautbeleuchtungsstärke ist proportional zur Adaptationsleuchtdichte. Die Leuchtdichte L eines Flächenelementes dA in einer Richtung, die mit der Flächennormale der Winkel ε_1 einschließt, ergibt sich nach dem photometrischen Grundgesetz zu:

$$L = \frac{d^2\phi}{dA \cdot \cos \varepsilon \cdot d\Omega} \quad \text{Gl. 4-21}$$

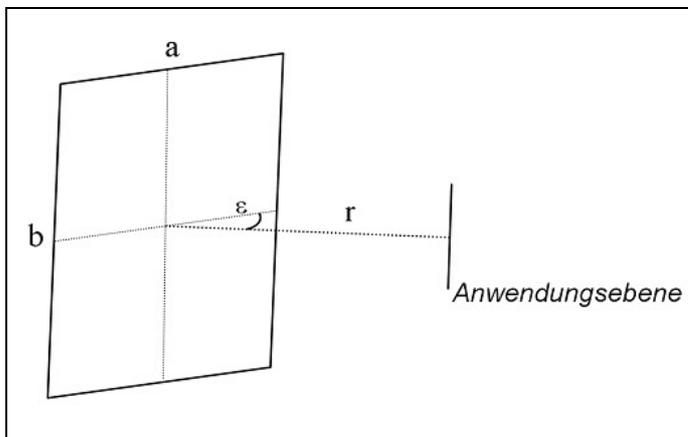


Abb. 4-42: Beleuchtende rechteckige Fläche

Die zentrale Beleuchtungsstärke einer rechteckigen, leuchtenden Fläche und ihre mittlere Leuchtdichte ist nach Bethe /6/ definiert:

$$E = 2 \cdot L_m \cdot \cos \varepsilon \cdot \left(\frac{\frac{1}{2}b}{\sqrt{\frac{1}{2}b^2 + r^2}} \cdot \arctg \left(\frac{\frac{1}{2}a}{\sqrt{\frac{1}{2}b^2 + r^2}} \right) + \frac{\frac{1}{2}a}{\sqrt{\frac{1}{2}a^2 + r^2}} \cdot \arctg \left(\frac{\frac{1}{2}b}{\sqrt{\frac{1}{2}a^2 + r^2}} \right) \right) \cdot \frac{\pi}{180} \quad \text{Gl. 4-22}$$

Für einen praxisnahen Vergleich mit $a = 0,25$ m und $b = 0,2$ m und $r = 0,5$ m, lassen sich mittlere Leuchtdichten in Abhängigkeit von der zentralen Beleuchtungsstärke berechnen. In Tabelle 4-12 sind für verschiedene Beleuchtungsstärken für ein solches Beispiel, die dazugehörigen mittleren Leuchtdichten und entsprechende Himmelszustände aufgetragen.

Tabelle 4-12: Vergleich von Beleuchtungsstärken und Leuchtdichten für natürliche und künstliche Strahlung

E in lx	L _m in cdm ⁻²	Natürlicher Referenzzustand		
		Sonnenhöhenwinkel	Sonnenhöhenwinkel	Sonnenhöhenwinkel
		$\gamma = 15^\circ$	$\gamma = 30^\circ$	$\gamma = 60^\circ$
615	1.900		Bedeckter Himmel Höhenwinkel 15°	-
2500	7.750	-	Mittlerer Himmel Höhenwinkel 15°	Bedeckter Himmel Höhenwinkel 60°
3230	10.000	-	-	Mittlerer Himmel Höhenwinkel 15°
10.000	77.500	Klarer Himmel (E _h)	-	-

Für die Akzeptanz einer Beleuchtung bzw. einer beleuchteten Fläche spielt die Verteilung der Leuchtdichte eine bedeutende Rolle. Die Absolutblendung tritt bei Leuchtdichten oberhalb von etwa 10^4 cdm⁻² auf und lässt sich nicht durch die Anhebung der Adaptationsleuchtdichte verhindern. Die häufigste Form der Blendung ist jedoch die sog. Relativblendung. Sie tritt bei zu großen Leuchtdichtekontrasten im Gesichtsfeld auf und kann durch die Anhebung der mittleren Leuchtdichte im Gesichtsfeld gemildert werden. Zu hohe Kontraste im Gesichtsfeld führen zu psychologischer Blendung und geringere Kontraste zu Monotonie. Die Leuchtdichteverteilungen von Lichttherapiegeräten werden durch die Anzahl und Anordnung der eingesetzten Lichtquellen und die Transmissions- bzw. Reflektionseigenschaften der benutzten Filter- und Reflektormaterialien bestimmt. Als günstig erweist sich die gleichmäßige Verteilung der Lichtquellen in der Lichtaustrittsfläche und Benutzung von weitgehend diffus transmittierenden Filtern. Die Leuchtdichteverteilung von Lichttherapiegeräten kann entweder durch die Messung der Leuchtdichte in einem geeigneten Raster über die leuchtende Flächen mithilfe von Leuchtdichtemessgeräten oder mit einer Leuchtdichtekamera aufgenommen werden. Leuchtdichteverteilungen von 2 Lichttherapiegeräten, bei denen 6 bzw. 2 Leuchtstofflampen als Lichtquellen eingesetzt worden sind, kann man in Abb. 4-43 sehen. Bei dem ersten Gerät liegen die Leuchtdich-

ten im interessierenden Bereich zwischen 6 kcdm^{-2} - 16 kcdm^{-2} und bei dem zweilampigen System zwischen $3,5 \text{ kcdm}^{-2}$ - $8,5 \text{ kcdm}^{-2}$. Die Leuchtdichten des Lichttherapiegerätes mit LEDs (siehe Abb. 4-44) liegen zwischen 10 kcdm^{-2} - 23 kcdm^{-2} .

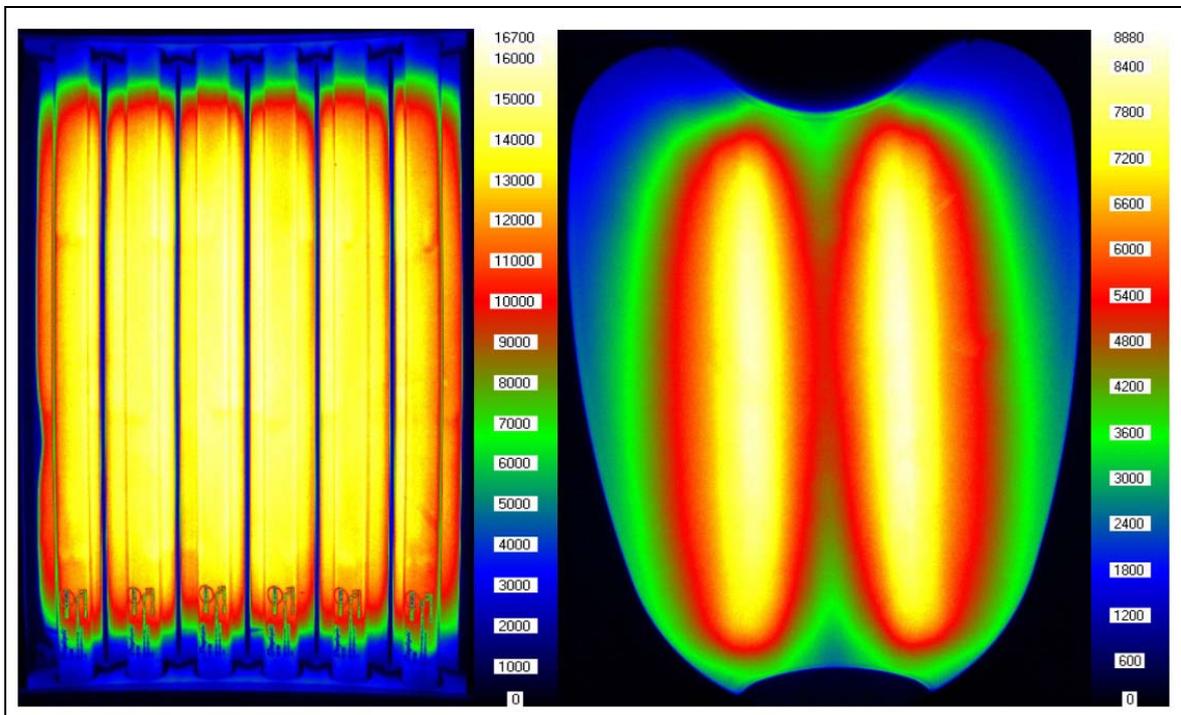


Abb. 4-43: Leuchtdichteverteilungen von 2 Lichttherapiegeräten

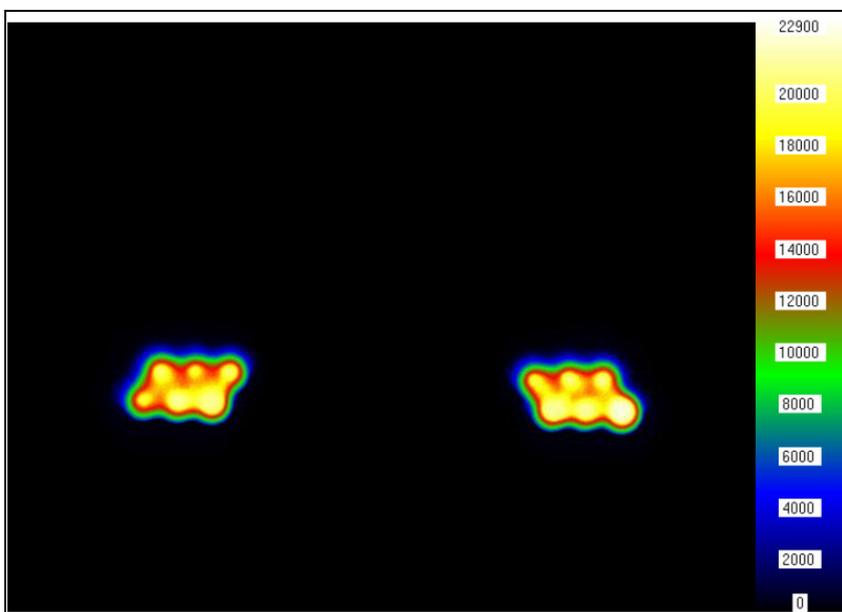


Abb. 4-44: Leuchtdichteverteilung eines Lichttherapiegerätes mit LEDs

4.4.6.1 Gesamtbestrahlungsstärke E_e

Die thermische Belastung, die durch ein Lichttherapiegerät verursacht wird, kann mit der Gesamtbestrahlungsstärke in der Anwendungsebene bewertet werden. Zur Messung dieser Größe eignet sich z. B. ein Pyranometer (siehe 3.4). Als natürlicher Vergleichswert für die Gesamtbestrahlungsstärke gilt der Maximalwert der Globalstrahlung der AM1-Sonnenstrahlung mit 1.000 Wm^{-2} , der nicht überschritten werden darf. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Lichttherapiegeräte wiesen in den von den Herstellern empfohlenen Bestrahlungsabständen Gesamtbestrahlungsstärken zwischen 5 Wm^{-2} und 25 Wm^{-2} vor.

4.4.7 Flimmerfreiheit

Modulationen des Lichtes können als störend empfunden werden, wenn diese unterhalb einer bestimmten Frequenz liegen. Die Frequenz, bei der das Flimmern zu einer zeitkonstanten Leuchtdichte verschmilzt, wird Flimmerverschmelzungsfrequenz f_v genannt. Diese ist definiert zu:

$$f_v = a \cdot \log L_m + b \quad \text{Gl. 4-23}$$

Diese Frequenz ist in erster Linie von der mittleren Leuchtdichte L_m abhängig. Für den arithmetischen Mittelwert der Leuchtdichte oberhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz gilt:

$$L_m = \frac{1}{T} \int L(t) dt \quad \text{Gl. 4-24}$$

Die Konstanten a und b beschreiben den Adaptionszustand der Zapfen und Stäbchen. Für Rechteckimpulse gleicher Hell- und Dunkelzeit werden für mittlere Leuchtdichten zwischen 2 und 300 cd/m^2 für $a = 12 \text{ Hz}$ und für $b = 33 \text{ Hz}$ eingesetzt.

Eine weitere wesentliche Einflussgröße für die Flimmerverschmelzungsfrequenz ist das Verhältnis der nach Fourier bestimmten Amplitude der Grundwelle des periodischen Verlaufs zum arithmetischen Mittelwert der Leuchtdichte. Der halbe Wert dieses Verhältnisses wird als Grundwellenquotient (Grundwellenanteil) G_w bezeichnet.

$$G_w = \frac{0,5 \cdot g_L}{L_m} \quad \text{mit } g_L: \text{ Amplitude der Grundwelle des periodischen Leuchtdichteverlaufs} \quad \text{Gl. 4-25}$$

Für die Messung des Flimmerverhaltens von Lichttherapiegeräten müssen Empfänger mit hoher zeitlicher Auflösung benutzt werden, da gewöhnlich bei diesen Geräten EVG's benutzt werden und das Licht hochfrequent moduliert wird. Als geeignet zeigen sich hierbei

Photodioden mit einer hinreichend genauen $V(\lambda)$ -Anpassung und genügend kleiner Zeit-

konstante. Für den Flickerwert F_l gilt: $F_l = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}$ Gl. 4-26

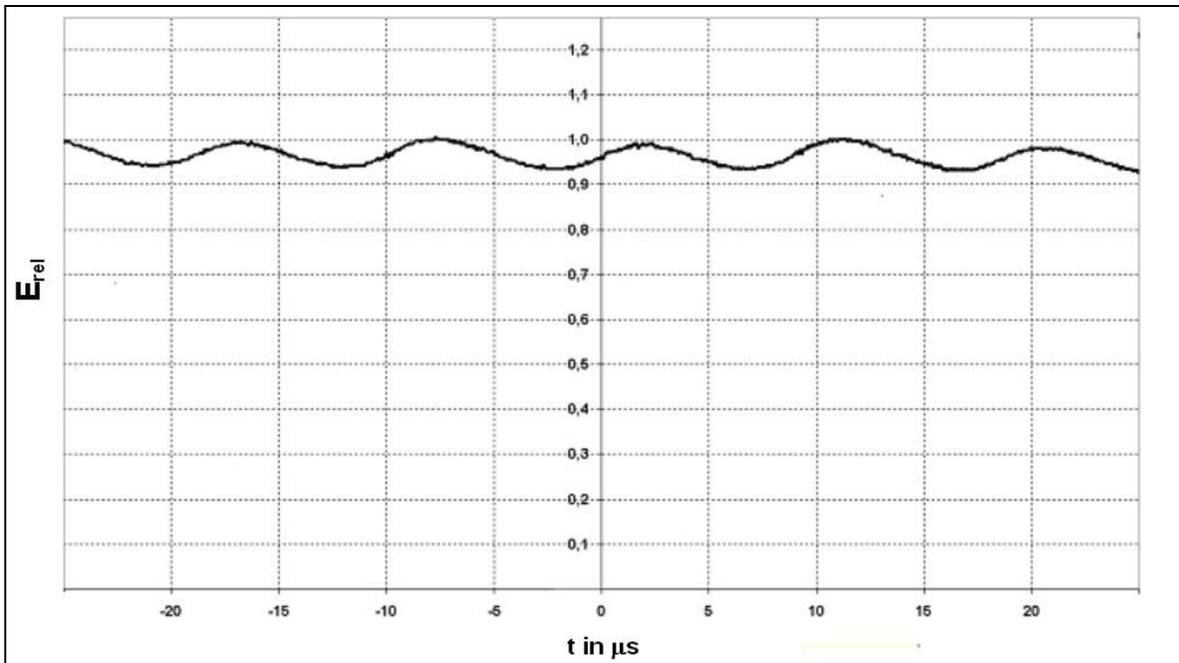


Abb. 4-45: Zeitlicher Verlauf der Beleuchtungsstärke eines EVG-betriebenen Lichttherapiegerätes

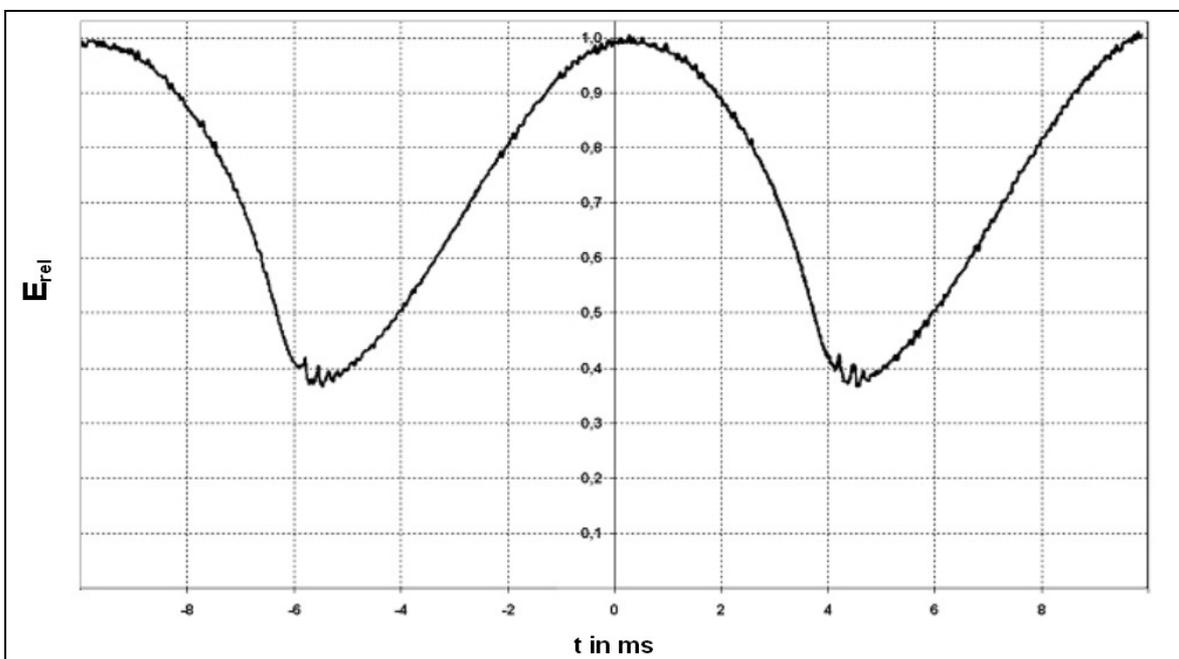


Abb. 4-46: Zeitlicher Verlauf der Beleuchtungsstärke eines KVG-betriebenen Lichttherapiegerätes

Der Einsatz von elektronischen Vorschaltgeräten ist aus Gründen der Flimmerfreiheit von Lichttherapiegeräten zu empfehlen. In Abb. 4-45 und Abb. 4-46 sind beispielhaft die zeitlichen Verläufe der Beleuchtungsstärke von Lichttherapiegeräten mit einem EVG bzw. KVG dargestellt. Bei den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Lichttherapiegeräten werden gewöhnlich EVGs eingesetzt. Für die Ermittlung der Flickerwerte ist in der EN 61000-3-3 /44/ eine Beobachtungsdauer von zehn Minuten für kurzzeitige Flickerstörungen bzw. von zwei Stunden für langzeitige Flickerstörungen festgelegt. Bei den hier untersuchten Geräten liegt der Flickerwert F_1 zwischen 0,01 und 0,18, wobei die Unterschiede in den Flickerwerten durch die Modulationsart und Frequenz der benutzten elektronischen Vorschaltgeräte bedingt sind. Die 100-Hertz-Lichtfrequenz von KVG betriebenen Geräten führt bei bestimmten Leuchtdichteverhältnissen zu psychologischen Störungen bei Patienten. Der Einsatz von diesen Vorschaltgeräten in Lichttherapiegeräten wird von wenigen Herstellern aus Kostengründen bevorzugt. Bei einem solchen Gerät wurde ein Flickerwert von $F_1 = 0,33$ ermittelt. Die Art der Vorschalttechnik sollte auf keinen Fall in der Lichttherapie angewendet werden.

4.5 IR-Bestrahlungsgeräte

Die wichtigste, natürliche Quelle für IR-Strahlung stellt die Globalstrahlung dar, wobei die der Anteil der den Erdboden erreichenden Sonnenstrahlung etwa 43 % beträgt. Die Eindringtiefe der IR-Strahlung in die menschliche Haut wird durch ihre Quantenenergie und Absorptionsbanden der Chromophore besonders des Wassers bestimmt. Kurzwellige IR-C wird in den oberen Schichten der Epidermis absorbiert und verursacht durch reflektorische Effekte eine Wärmewirkung. IR-B-Strahlung kann zum Teil bis in die papillare Epidermis eindringen und dort in Wärme umgewandelt. IR-A-Strahlung dringt in tiefere Hautschichten ein und verursacht durch Einwirkung in die hautnahen Blutgefäße eine rasche Erhöhung der Körperkerntemperatur dadurch, dass die Wärme über das Blut im Körper verteilt wird.

Bei der IR-Therapie werden Effekte der Wärmewirkung wie Erhöhung der Körperkerntemperatur und Erwärmung der tiefer gelegenen Körperorgane durch Wärmeleitungsprozesse benutzt, um gewünschte photobiologische Prozesse anzuregen. Der menschliche Körper besitzt ein Regelsystem, um die Kerntemperatur konstant zu halten. Die überschüssige Wärme wird durch die Blutbahn an die Körperoberfläche transportiert und durch Erweiterung der hautnahen Blutgefäße über die Hautoberfläche abgegeben. Dadurch erfolgt eine Blutdrucksenkung als eine der erwünschten Effekte der IR-Therapie.

Durch die milde IR-A-Hyperthermie werden günstige Effekte bei der Behandlung von systemischer Sklerodermie erreicht. Bei dieser Krankheit kommt es zu einer Verdickung der Haut, welche auf eine Akkumulation von Bindegewebe zurückzuführen ist und die sich unter Mitbeteiligung der inneren Organe durch Gefäßanomalien besonders der Kapillargefäße auszeichnet /58/. Bei dieser IR-A-Therapieform wird die Körperkerntemperatur durch Bestrahlungen um 1 K erhöht, wobei der wirksame Spektralbereich zwischen 800 nm und 1400 nm liegt. Die applizierten Bestrahlungsstärken sind kleiner als 1200 Wm^{-2} . Dabei kommt es u. a. zu Verbesserungen der Fließeigenschaften des Blutes, Hemmung angeregter Sauerstoffspezies in Leukozyten und Besserung der akralen Wiedererwärmung bei systemischer Sklerodermie /99/.

Als konventionelle Infrarotbestrahlungsquellen gelten die Rotlichtlampen, Kachelöfen, heißer Sand, erhitzte Steinplatten und Saunen. In Saunen erfolgt die Wärmewirkung durch Wärmeleitung aus der Luft und der Aufliegeflächen in Folge der Erhitzung von Holzwänden oder erhitzten Steinen. Der Spektralbereich der IR-Strahlung in Saunen erstreckt sich vor allem oberhalb von Wellenlängen $\lambda > 4000 \text{ nm}$ im IR-B und IR-C. In Abbildung Abb. 4-47 ist die typische spektrale Verteilung der IR-Strahlung von einer Trocken- und Dampfsauna vergleichend dargestellt.

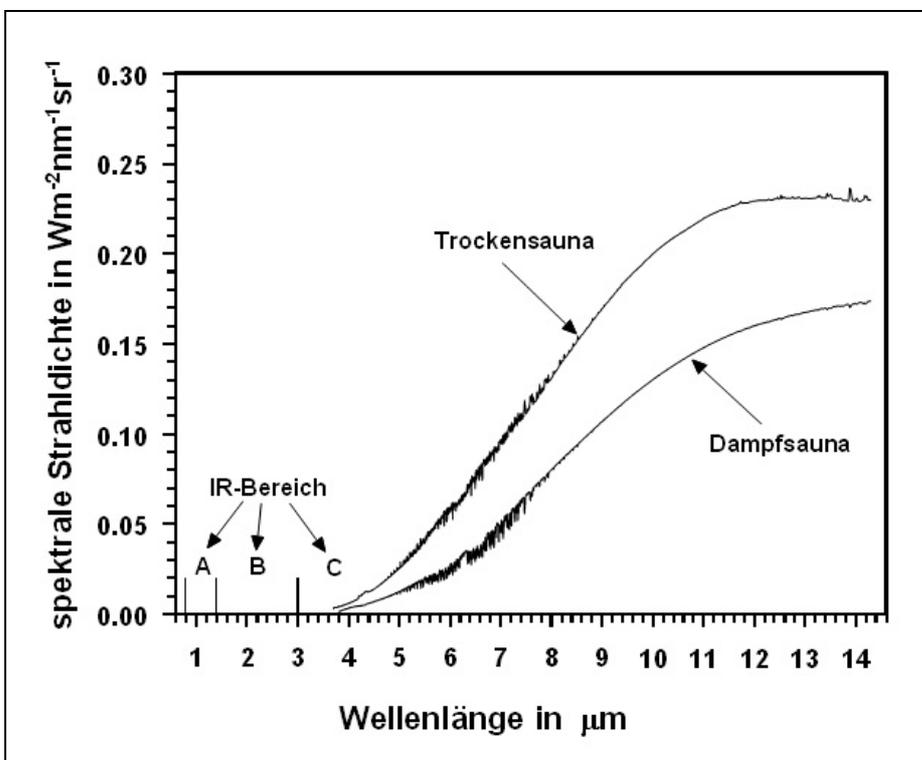


Abb. 4-47: Spektrale Verteilung der Infrarotstrahlung in einer Finnischen Sauna und in einer Dampfsauna nach /102/

IR-A-Bestrahlungsgeräte werden als Bestrahlungsliegen ausgeführt, bei denen als Strahlungsquellen Halogenglühlampen oder Xenonlampen eingesetzt werden. Als spektral-selektiv strahlende Quelle eignen sich besonders IR emittierende Lumineszenzdioden, die als Array zusammenwirken. Die Filterung der längerwelligen Spektralanteile ($\lambda > 1400$ nm) erfolgt durch den Einsatz von Breitband-Interferenz-Langpassfiltern oder von Wasserfiltern mit Schichtdicken des Wassermantels von einigen Zentimetern. Bei einigen Geräten sind hermetisch geschlossene Wasserküvetten zur Nachbildung natürlicher Feuchtigkeitsverhältnisse integriert. In Abb. 4-48 ist der spektrale Verlauf der Bestrahlungsstärke eines IR-A-Bestrahlungsgerätes auf der Anwendungsebene dargestellt. Als Strahlungsquellen werden bei diesem Gerät Halogenglühlampen benutzt, wobei die Anschlussleistung bei $P_w = 4400$ W liegt. Die Filterung erfolgt bei diesem Gerät mit Hilfe eines Wasserfilters von 10 mm Schichtdicke. Die Gesamtbestrahlungsstärke im IR des Gerätes beträgt $E_{IR} = 1730$ Wm^{-2} .

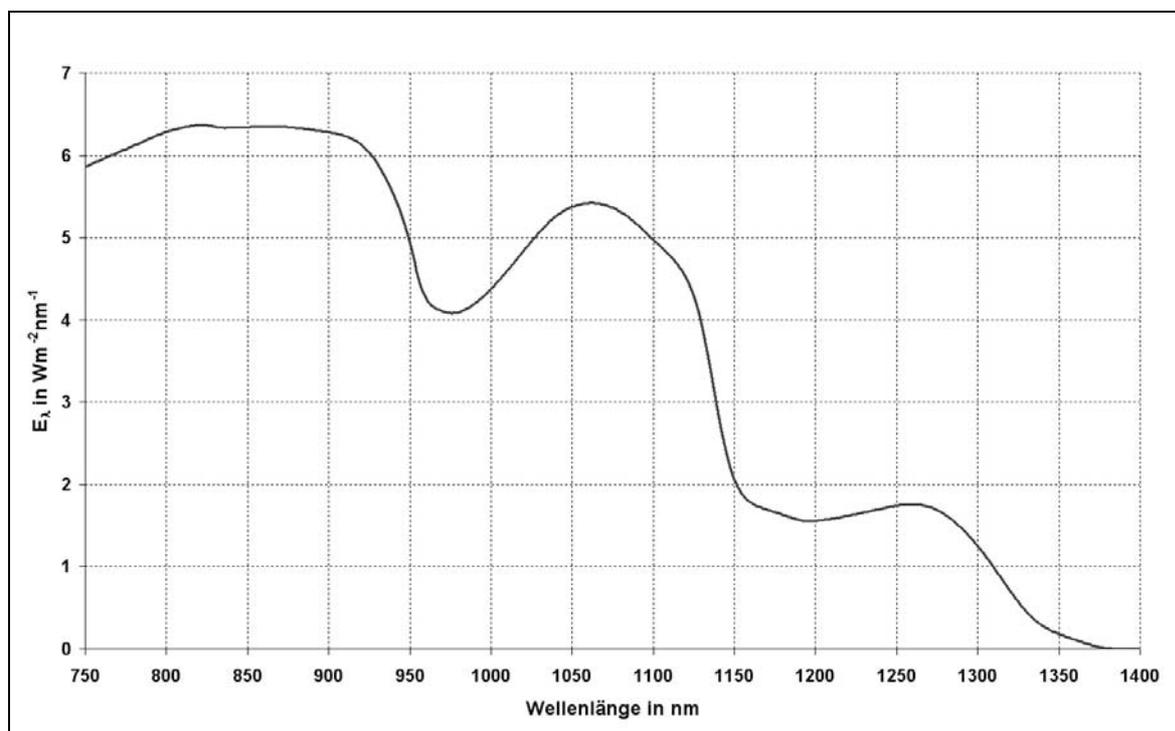


Abb. 4-48: Spektrale Bestrahlungsstärke eines IR-A-Bestrahlungsgerätes

Als Schwellenwerte bei Bestrahlungszeiten von über 1000 s werden durch ANSI (American National Standards Institute) für Augen und Ganzkörperhautbestrahlungsgeräte IR-Bestrahlungsstärken von 100 Wm^{-2} und als Schwellenbestrahlungsstärken für Teilkörperbestrahlung der Hautpartien 300 Wm^{-2} - 500 Wm^{-2} genannt. ICINIRP empfiehlt für lange andauernde Anwendungen von $T > 35$ °C die okulare IR-Bestrahlungsstärke auf Werte kleiner 100 Wm^{-2} zu beschränken.

Im Gegensatz zur IR-B- und IR-C-Bestrahlung erfolgt bei übermäßiger Exposition mit IR-A-Strahlung kein Schmerzempfinden, da diese Strahlung nicht auf die entsprechenden Rezeptoren einwirkt. Dadurch kann es zu einer raschen und übermäßigen Erhöhung der Körperkerntemperatur auf Werte über 42° C kommen, die einen Kreislaufkollaps oder eine maligne Hyperthermie zur Folge haben kann /101/. Die Erhöhung der Körperkerntemperatur auf Werte oberhalb von 40° C kann aufgrund der Erweiterung oberflächennaher Blutgefäße zur Blutdrucksenkung, Mangel durchblutung des Gehirns und zur daraus resultierenden Bewusstlosigkeit führen. Als schädigende Effekte können durch längerwellige IR-Strahlung thermische Schädigungen oder Störungen des Wärmehaushaltes verursacht werden. Chronische IR-Exposition kann zur Trübung der Augenlinse (Glasbläserkatarakt) führen. Die Dosis-Wirkungs-Beziehung sowie der spektrale Verlauf der Wirkungskurve dieser Schädigung sind nicht bekannt /136/. Als chronische Schädigung der IR-Strahlung gelten Hitzemelanosen, die in seltenen Fällen zu Plattenepithelkarzinomen entarten können. Als Schwellenwerte bei Bestrahlungszeiten von über 1000 s werden durch ANSI (American National Standards Institute) für Augen und Ganzkörperhautbestrahlungsgeräte IR-Bestrahlungsstärken von 100 Wm^{-2} und als Schwellenbestrahlungsstärken für Teilkörperbestrahlung der Hautpartien 300 Wm^{-2} - 500 Wm^{-2} genannt. ICINIRP empfiehlt für lange andauernde Anwendungen von $T > 35 \text{ ° C}$ die okulare IR-Bestrahlungsstärke auf Werte $E_{\text{IR}} < 100 \text{ W m}^{-2}$ zu beschränken /56/.

5. Vorschläge für Zertifizierungskriterien

5.1 Solarien

Durch den RTS (Runden Tisch Solarien des Bundesamtes für Strahlenschutz) sind Zertifizierungskriterien für den Betrieb bzw. Benutzung von Solarien definiert worden /122/, /123/, auf die im Abschnitt 4.3.4 dieser Arbeit eingegangen worden ist. Die Grundlage der strahlungstechnischen Bewertung von Solariengeräten bilden dabei spektraleradiometrische Messungen der Strahlungsausstrittsflächen und ihre numerische Bewertung anhand definierter photobiologischer Wirkungsfunktionen. Dabei bildet die erythemwirksame Bestrahlungsstärke E_{er} die wichtigste Bewertungsgröße. Die durch RTS bei der Zertifizierung von Solarien aufzunehmenden Messgrößen und die jeweiligen Grenzwerte sind in Tabelle 5-1 zusammengestellt.

Tabelle 5-1: Mess- und Bewertungsgrößen zur Zertifizierung von Solarien nach RTS

Nr.	Größe	Grenzwert
1	Erythemwirksame Bestrahlungsstärke im UV-A $E_{er, UV-A}$ (320 nm -400 nm)	$\leq 0,2995 \text{ Wm}^{-2}$
2	Erythemwirksame Bestrahlungsstärke im UV-B $E_{er, UV-B}$ (280nm -320 nm)	$\leq 0,6 \text{ Wm}^{-2}$
3	Erythemwirksame Bestrahlungsstärke im UV-A + UV-B $E_{er, UV-A/B}$ (280nm -400 nm)	$\leq 0,6 \text{ Wm}^{-2}$
4	Bestrahlungsstärke im UV-C E_{UV-C} (200 nm -280 nm)	$< 1 \text{ mWm}^{-2}$
5	Anfangsbestrahlungsdauer t_a	$H_a = 100 \text{ Jm}^{-2}$
6	Schwellenbestrahlungsdauern t_s für das UV-Erythem	Hauttypen I, II, III, IV nach DIN
7	Bestrahlungsdauer t_z zur Zwangsabschaltung	$H_z = 3,5 \text{ MED}$ (875 Jm^{-2})
8	Sonnenerthemfaktor f_{SE}	2,0
9	Bestrahlungsdauer t_D zur technische Realisierung von Dosierungsschritten	0,2 MED (max. 50 Jm^{-2})
10	Gleichmäßigkeit g_2 nach DIN 5050/ 1	0,4

5.1.1 Gleichmäßigkeit der Bestrahlungsstärke über die Körperfläche

In den geltenden Normen und Messvorschriften werden nur Aussagen über die Gleichmäßigkeit der Bestrahlungsstärke von einzelnen Modulen innerhalb eines Gerätes getroffen. Übliche Solarien bestehen aber mindestens aus mindestens 2 Modulen (Himmel, Auflage). In Einzelfällen werden in diese beiden Strahlungsausstrittsflächen Strahlungsquellen verschiedener Hersteller oder Leistungsstufen installiert. Dadurch kann es zur Variation der wirksamen Bestrahlung über die betreffenden Nutzflächen kommen. Aus Strahlenschutzgründen wird zur Zertifizierung eines Solariums das Modul mit den höheren erythemwirksamen Bestrahlungsstärken herangezogen.

Spektralradiometrische Messungen der Auflagefläche erweisen sich als unproblematisch und werden am Ort der maximalen Bestrahlungsstärke über diese Fläche bei aufliegender Eingangsoptik des Spektralradiometers durchgeführt. Grundsätzlich sollte dabei festgeschrieben werden, dass bei der Ausmessung eines Moduls Streustrahlung aus den übrigen Strahlungsausstrittsflächen durch Abdeckung solcher Module vermieden wird. Bestrahlungsstärken, die vom Solarienhimmel erzeugt werden, werden oft in einer Höhe von der Auflagefläche von $d = 0,25$ m am Maximum der Bestrahlungsstärke aufgenommen, die der Körperhöhe eines liegenden Menschen entspricht. Bei Variation dieser Messhöhe können sich die Messwerte je nach geometrischem Aufbau und Ausrichtung der Strahlungsausstrittsfläche jedoch verändern. Für die messtechnische Erfassung der Strahlungsanteile, die durch den Solarienhimmel erzeugt werden, wird ein Halbzylinder mit einem Radius von 25 cm deshalb die Benutzung ein Halbzylinder mit 25 cm Radius empfohlen.

Bei der photobiologischen Bewertung von Solarien sind die Gesichtsbräuner, die in die Deckenmodule integriert werden, gesondert zu betrachten. Im Gegensatz zu anderen Modulen von Solariengeräten werden diese mit einer oder mehreren Halogen-Metaldampf lampen bestückt. Folglich können bei solchen Geräten die Bestrahlungsstärkewerte und die spektrale Zusammensetzung der Strahlung über die Himmelfläche erheblich variieren. Daneben zeigt sich in der Praxis als kritisch, dass die durch die Gesichtsbräuner emittierten Bestrahlungsstärken z. T. oberhalb der durch RTS oder DIN vorgegebenen Klassifizierungsgrenzen liegen, wodurch solche Geräte als unsertifizierbar gelten können. Bei diesen Strahlungsausstrittsflächen eignet sich die erythemwirksame Bestrahlungsstärke als die kennzeichnende Größe nur beschränkt. Da in der Praxis die Benutzer teilweise auf Augenschutz verzichten und die Transmissionseigenschaften der Augenlider nicht endgültig geklärt sind, müssen diese Module durch die Angabe von der

wirksamen Bestrahlungsstärke der Augengefährdung E_{Auge} nach /51/ gekennzeichnet werden. Die durch Gesichtsbräuner von typischen Solariengeräten emittierten, hinsichtlich der Augengefährdung wirksamen Bestrahlungsstärken sind in Tabelle 5-2 zusammengestellt. Bei der photobiologischen Bewertung der Gesichtsbräunermodule sollte berücksichtigt werden, dass der Applikationsabstand durch die Benutzung von Kissen und ggf. durch integrierte Kopfstützen sich von der definierten Messhöhe für die Himmelsfläche unterscheiden kann. In Abb. 5-1 ist für ein Solariengerät die spektralen Bestrahlungsstärken der einzelnen Module sowie das Referenzsonnenspektrum mit den entsprechenden erythemwirksamen Bestrahlungsstärken vergleichend dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass die Gesichtsbräuner im UV-A im Vergleich zum Referenzsonnenspektrum deutlich höhere Bestrahlungsstärkwerte vorweisen.

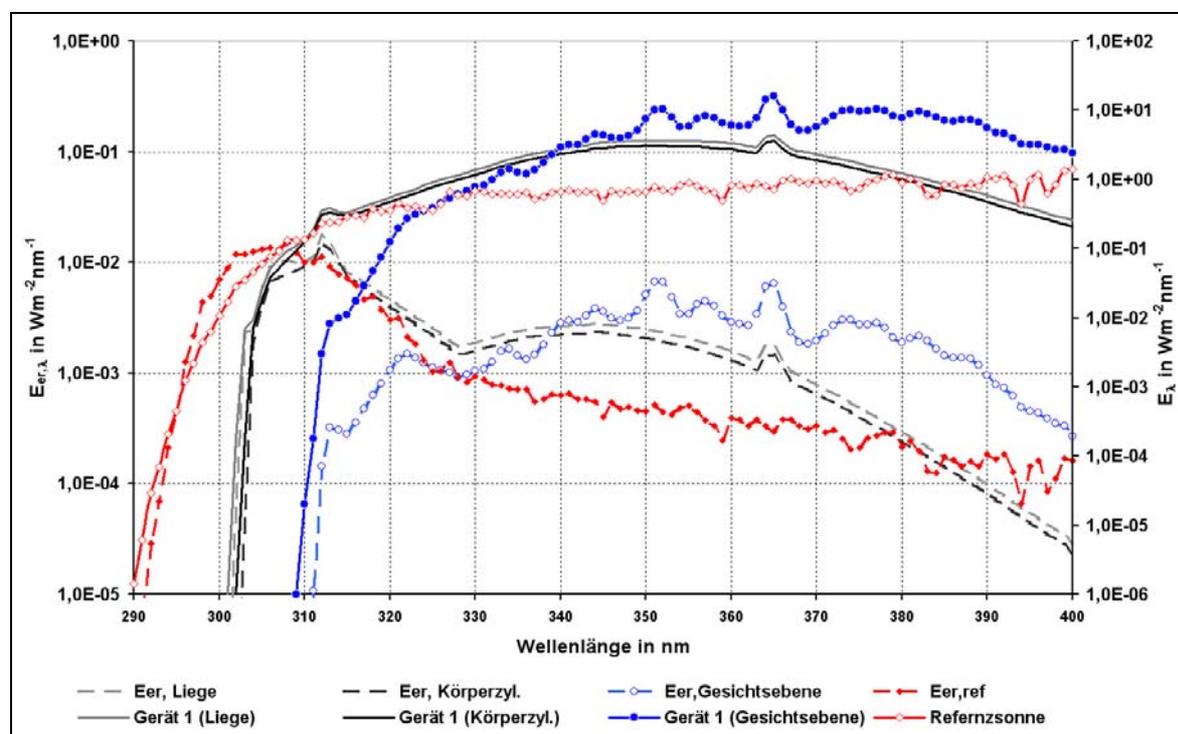


Abb. 5-1: Spektrale Bestrahlungsstärke eines Solariengerätes in der Liegefläche, auf dem Körperzylinder und auf der Gesichtsebene sowie die jeweiligen erythemwirksamen Bestrahlungsstärken im Vergleich zu den Werten der Referenzsonne

5.1.2 Bewertung der Gleichmäßigkeit der einzelnen Nutzflächen

In DIN 5050 Teil 1 /35/ sind Messvorschriften zur Bestimmung der Gleichmäßigkeit von Solarien definiert. Hier wird für die Bestimmung der Gleichmäßigkeit über eine zusammenhängende Strahlungsausstrittsfläche, die ebenförmig ausgelegt ist, ein Messraster mit quadratischen Teilflächen vorgeschlagen, wobei die Rasterabstände 0,1 m nicht überschreiten sollten. Bei der Ermittlung der Gleichmäßigkeit bei Geräten oder Modulen von Solarien, deren Nutzfläche als Zylindermantel oder Teilmantel angegeben ist, ist das

Vorschläge für Zertifizierungskriterien

Rasterfeld auf einem abgerollten Zylindermantel festzulegen. Für diese Messung eignet sich ein halbzylinderförmiges Dummy, der in Kapitel 4.3.4 dieser Arbeit beschrieben ist.

5.1.3 Kriterium Nutz- und Gefährdungsverhältnis

Solarien werden vom Benutzer nicht nur wegen der kosmetischen Wirkung sondern auch wegen ihrer gesundheitsfördernden Wirkungen aufgesucht. Die gesundheitlichen Wirkungen von Bestrahlungsgeräten hängen neben der Absolutgröße der Bestrahlungsstärke vor allem von der spektralen Zusammensetzung der emittierten Strahlung ab. Wie bei der Klassifizierung von Solariengeräten in RTS-Gruppen und DIN-Typen werden zur photobiologischen Bewertung ausschließlich die UV-Erythem betreffenden Größen herangezogen. Eine Aussage über die biopositiven Wirkungen von Solarien allein mit Hilfe dieser Größen ist jedoch nicht abschließend möglich. Auch die allgemein gebräuchliche Angabe der UV-A/ UV-B-Verhältnisse genügen nicht zur Beschreibung der Gesundheitsförderung von Solarien. Die in dieser Arbeit eingehend beschriebene Vitamin D₃-Photosynthese durch UV-B Strahlungsanteile stellt sich als ein systemischer Effekt dar, der sich zur Definition eines allgemeinen Nutzeffektes von Solariengeräten eignet. Mit der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke E_{er} und der Vitamin D₃-wirksamen Bestrahlungsstärke E_{vd} lässt sich der UV-Nutzeffekt f_{UV-NE} angeben:

$$f_{UV-NE} = \frac{\int E_{\lambda}(\lambda) \cdot s_{vd,rel}(\lambda) d\lambda}{\int E_{\lambda}(\lambda) \cdot s_{er,rel}(\lambda) d\lambda} \quad \text{Gl. 5-1}$$

Tabelle 5-2: Bestrahlungsstärken im UV-A , UV-B , wirksame Bestrahlungsstärken und UV-Nutzeffekte f_{UV-NE} für drei kommerzielle Solariengeräte

Gerät	Modul	E _{UV-A} in Wm ⁻²	E _{UV-B} in Wm ⁻²	E _{er} in Wm ⁻²	E _{vd} in Wm ⁻²	E _{Auge} in Wm ⁻²	f _{SE}	f _{UV-NE}
Gerät 1 (niedrig dosiert)	Liege	141	0,70	0,13	0,08	0,43	0,42	0,60
	Himmel	183	1,19	0,19	0,15	0,56	0,62	0,79
	Gesichtsbräuner	159	0,38	0,10	0,04	0,48	0,32	0,39
Gerät 2 (mittel dosiert)	Liege	149	1,91	0,27	0,32	0,48	0,89	1,20
	Himmel	173	2,20	0,31	0,36	0,56	1,02	1,18
	Gesichtsbräuner	376	0,27	0,18	0,04	1,13	0,62	0,21
Gerät 3 (hoch dosiert)	Liege	262	1,84	0,37	0,35	0,48	1,24	0,95
	Himmel	299	1,82	0,38	0,35	0,56	1,26	0,92
	Gesichtsbräuner	418	1,02	0,26	0,13	1,13	0,88	0,50
Referenzsonnenspektrum		62,7	1,95	0,251	0,43	0,25	0,84*	1,7

(*): Bei der Berechnung des Sonnenerthemfaktors wird als Maximalwert der erythemwirksamen Globalstrahlung 0,3 Wm⁻² angesetzt.

In Tabelle 5-2 sind für einige im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Solariengeräte der UV-Nutzeffekt f_{UV-NE} , der Sonnenerthemfaktor f_{SE} , die zugehörigen, bewerteten Bestrahlungsstärken (E_{er} , E_{vd} , E_{Auge}) sowie die integralen Bestrahlungsstärken im UV-A und UV-B angegeben. Daneben sind zum Vergleich mit den natürlichen Verhältnissen die jeweiligen Werte für die Referenzsonnenspektrum zu sehen. Es wird deutlich, dass das Referenzsonnenspektrum mit einer Bestrahlungsstärke von $1,95 \text{ Wm}^{-2}$ hohe Strahlungsanteile im UV-B aufweist. Für den oben definierten UV-Nutzeffekt lässt sich im betreffenden Spektralbereich ein Wert von $f_{UV-UN,ref} = 1,7$ angeben. Der Vergleich der auf dem Körperzylinder erzeugten Bestrahlungsstärke des Gerätes 1 und der auf der Gesichtsebene erzeugten Bestrahlungsstärke des Gerätes 3 macht deutlich, dass bei gleichem Sonnenerthemfaktor von 0,62 der UV-Nutzeffekt der betrachteten Nutzfläche des Gerätes 1 um Faktor 4 größer ist. Dies ist durch die höhere Vitamin D_3 -wirksame Bestrahlungsstärke und somit einer größeren biopositiven Wirkung des Gerätes 1 in Folge höherer Strahlungsanteile im UV-B begründet.

5.2 Lichttherapiegeräte

Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit kann kein definierter Wert für die wirksame Schwellendosis zur Melatoninsuppression angegeben werden. Ebenso besteht keine definierte natürliche Referenzstrahlung bzw. Himmelszustand für die Hemmung des Melatonins. Aufgrund der hinreichend genau geklärten spektralen Zusammensetzung der Wirkungsfunktion zur Melatoninunterdrückung lassen sich mit Hilfe des in Kapitel 4.4.3 definierten Wirkungsgrades der Melatoninsuppression Lichtquellen und Lichttherapiegeräten vergleichen:

$$\eta_{ms} = \frac{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} E_{e\lambda}(\lambda) \cdot s_{ms,rel}(\lambda) d\lambda}{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} E_{e\lambda}(\lambda) d\lambda}$$

Anhand der durchgeführten Untersuchungen an Lichttherapiegeräten und Lichtquellen lässt sich als hinreichender Wert für den Wirkungsgrad der Melatoninsuppression $\eta_{ms} \geq 0,25$ angeben. Konventionelle Kompaktleuchtstofflampen und Glühlampen zeigen sich aufgrund relativ niedriger Spektralanteile im kurzwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums mit Wirkungsgraden von 0,13 bzw. 0,07 zur Melatoninunterdrückung als eher ungeeignet.

Vorschläge für Zertifizierungskriterien

Durch Spektralanteile im kurzwelligen VIS wird i. A. die ähnlichste Farbtemperatur von Lichtquellen erhöht. Aufgrund der durchgeführten farbmtrischen Untersuchungen wird für Lichttherapiegeräte die ähnlichste Farbtemperatur mit $T_{cp} \geq 4500 \text{ K}$ und die Normfarbwertanteile x und y mit Werten jeweils kleiner $0,400$ angesetzt.

Zur Vermeidung von Blendungwirkungen ist die Leuchtdichte von Lichttherapiegeräte durch gezielte Wahl der benutzten Lichtquellen und Filtermaterialien zu begrenzen. Aus demselben Grunde wird empfohlen, auf frei brennende Lichtquellen in Lichttherapiegeräten zu verzichten. Die zeitliche Veränderung von Licht kann als störend empfunden werden, falls die Frequenz der Veränderung unterhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz liegt. Durch den Einsatz von elektronischen Vorschaltgeräten können solche Flickerscheinungen effektiv unterbunden werden. Daher wird empfohlen, bei Lichttherapiegeräten von der Benutzung konventioneller Vorschaltgeräte abzusehen.

6. Zusammenfassung

Mit der vorhandenen Technik für die Spektralradiometrie (UV-Spektralradiometer mit hoher Auflösung, transportabler Doppelmonochromator für UV und VIS, Spiegelmonochromator) und den verfügbaren Messgeräten der Photometrie, der Gesamtstrahlung und der Farbmessung wurden wirksame Strahlungsanteile für die UV- und Lichttherapie ermittelt. Eine messtechnische Ergänzung war die Umsetzung der Technik der Goniophotometrie eines Spiralphotometers für integrale Messungen im UV. Damit war auch die direkte Bestimmung von Gesamtstrahlungsleistungen Φ_{UV-A} , Φ_{UV-B} , Φ_{UV-C} und erythemwirksamer Strahlungsleistung Φ_{er} möglich. Diese Messtechnik ergänzt die bisherigen indirekten Methoden unter Verwendung von speziellen Ulbrichtkugeln. Die Messanordnung bietet zudem durch Erweiterungen mit geeigneten, spektral auflösenden Messempfängern die Möglichkeit räumliche Verteilung der spektralen Zusammensetzung von UV-Strahlungsquellen aufzunehmen.

Ein Großteil der Arbeit bezieht sich auf die Gerätetechnik. Es wurden charakteristische Eigenschaften von Gerätekomponenten (spektrale Kennzahlen zahlreicher Filter- und Reflektormaterialien) ermittelt. Durch Analysen zum Anlaufverhalten und zur Leistungsvariation von Strahlungsquellen konnten Hinweise zum Betrieb von Bestrahlungsgeräten gegeben werden.

Als Beispiel für die optimierte Bestrahlungsgerätetechnik wurde der UV-Sonnensimulator zur Vitamin D₃-Photosynthese realisiert. Die gezielte Wahl der verwendeten Materialien und Strahlungsquellen ermöglichte den Aufbau einer an die Anwendung optimal angepassten Bestrahlungskabine. Eine neu entwickelte Software ermöglicht die automatische Berechnung der Patientendosis. Das Protokoll enthält: Bestrahlungsplan, zeitliche Steuerung der UV-Strahlungsquellen und Patientendatenbank.

An therapeutischen und nichttherapeutischen Bestrahlungsgeräten wurden spektralradiometrische Messungen durchgeführt und die betreffenden photobiologischen Bewertungen nach geltenden Kriterien durchgeführt.

Anhand von Untersuchungen an zahlreichen Solarien und Heimsonnen wurden die geltenden Bewertungskriterien nach DIN und RTS erläutert und für die aktuelle Praxis der Zertifizierung von solchen Geräten Vorschläge gemacht.

Zusammenfassung

Mit Hilfe spektraleradiometrischer, lichttechnischer und farbmeterischer Messungen wurden die wirksamen Strahlungsanteile zur Melatoninunterdrückung und Bewertungsgrößen von Lichttherapiegeräten und Lichtquellen bestimmt. Für die Anwendung der in der vorliegenden Arbeit definierten Bewertungsgrößen für die Lichttherapie wurden definierte Referenzgrößen vorausgesetzt. Durch die Erläuterung des Zusammenhanges zwischen der Beleuchtungsstärke und der Leuchtdichte von leuchtenden Flächen und den Vergleich mit natürlichen Himmelsverhältnissen wurden Hinweise auf die zur Melatoninsuppression notwendigen Schwellenwerte geliefert.

7. Literatur

- /1/ ANSI/ IESNA RP 27.1/ 27.3, Photobiological Safety for Lamp & Lamp Systems-Risk Group Classifications & Labeling
- /2/ Aust, O., Untersuchungen zu UV-protectiven Effekten von Nahrungs-carotinoiden in vivo und in vitro, Dissertation, Düsseldorf, 2003
- /3/ Aydinli, S., Kaase, H. Solarstrahlung und Tageslicht, Berlin 2004
- /4/ Berger, J., Why do circadian biorhythms age? Journal of Applied Biomedicine 1: S.77–84, 2003
- /5/ Bernhardt, J. H., Gefährdung durch Nichtionisierende Strahlung, in: Aktuelle Fragen im Strahlenschutz, Verlag TÜV Bayern Sachsen, München, 1990
- /6/ Bethe, G., Über die Beleuchtung durch strahlende Flächen, Optik Heft 19, Karlsruhe 1951
- /7/ Blaudschun, R., Die UVB-abhängige Induktion des Vaskulären Endothelialen Wachstumsfaktors(VEGF) wird in epidermalen Zellen autokrin durch den Transformierenden Wachstumsfaktor alpha (TGF) reguliert: Bedeutung für die UVB-induzierte Angiogenese, Dissertation Marburg 2000
- /8/ Borbély, A. (1982), A two process model of sleep regulation. Human Neurobiol 1:195-204.
- /9/ Borbély, A. A., Achermann P., Concepts and models of sleep regulation, an overview. J Sleep Res. 1:63-79, 1992
- /10/ Brainard, G.C., Hanifin, J.P., Rollag, M.D., Greeson, J., Byrne, B., Glickman, G., Gerner, E. and Sanford, B., Human melatonin regulation is not mediated by the three cone photopic visual system. Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism 2001, 86: 433-436
- /11/ Bruls, W. A. G., Slaper, H., van der Leun, J. C., Berrens, L., Transmission of human epidermis and stratum corneum as a function of thickness in the ultraviolet and visible wavelengths, Photochemistry and Photobiology 1984, 40, 485-494.
- /12/ Bühring, M., Britzke, R., Krause, R., Boldt, R., Klamrott, P., Bocionek, G., Kühn, G. Serielle UV-Exposition mit einem natürlichen Strahlenspektrum (UVA und UVB) verbessert die Kreislaufregulation und die aerobe Kapazität (Laktatstoffwechsel) bei Patienten mit koronaler Herzerkrankung, Phys. Rehab. Kur. Med. 6, (1996), S. 16 – 18
- /13/ Bundesamt für Strahlenschutz, UV-Fibel, Braunschweig 2003
- /14/ Cagnacci, A., Elliot, J. S., Yen SSC, Melatonin: A major regulator of the circadian rhythm of core temperature in humans. J Clin Endocrinol Metab 75:447-452, (1992)
- /15/ Campbell, S. S. , Murphy, P. J.: Circadian clock resetting in humans by extra ocular light exposure, Biological Effects of Light 1998, S. 389-395, Massachusetts 1999.
- /16/ Chapuy, M. C., Arlot, M. E., Duboeuf, F., et al. Vitamin D and calcium to prevent hip fractures in elderly women. N Engl J Med. 1992;327:1637-1642.
- /17/ Chen, T., Mündliche Mitteilungen
- /18/ CIE 60335-2-27, Particular requirements for appliances for skin exposure to ultraviolet and infrared radiation, 2000

Literaturverzeichnis

- /19/ CIE Committee E-3.2, Natural Daylight Official Recommendations Compte Rendu, 13. Sitzung, Bd. 2, Paris 1955
- /20/ CIE No.17.4, Internationales Wörterbuch der Lichttechnik (1987) IEC Publikation No. 50 (845)
- /21/ CIE Publ. No. 15.2, Colorimetry, 2nd Edition, 1986
- /22/ CIE-Publication Nr. 18 (E-1.2), Principles of Light Measurement, 1970
- /23/ CIE-Publication Nr. 85, Solar Spectral Irradiance, 1989
- /24/ Coblenz, W. W., Stair, R., Hogue, J. M, The spectral erythemic reaction of the untanned human skin to ultra-violet radiation, Bur. Stand. J. Res. 8 (1932) 541 (Research Paper No. 433)
- /25/ D.-J. Dijk & C.A. Czeisler, J. Neuroscience 15, 3526-3538 (1995) DIN 32 635, Spektralphotometrische Analyse von Lösungen, Begriffe, Formelzeichen, Einheiten, 1984
- /27/ DIN 5031 Teil 10, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, Photobiologisch wirksame Strahlung, Kurzzeichen und Wirkungsspektren
- /28/ DIN 5031, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, Teil 2 Strahlungsbewertung durch Empfänger, 1982
- /29/ DIN 5031, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, Teil 7 Benennung der Wellenlängenbereiche
- /30/ DIN 5031, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, Teil 3 Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik, 1982
- /31/ DIN 5032, Lichtmessung, Teil 2, Betrieb elektrischer Lampen und Messung der zugehörigen Größen
- /32/ DIN 5032, Lichtmessung, Teil 7, Klasseneinteilung von Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemessgeräten
- /33/ DIN 5033 Teil 9 (Oktober 1982), Farbmessung, Weißstandard für Farbmessung und Photometrie
- /34/ DIN 5033, Teil 1-9, Farbmessung
- /35/ DIN 5050: Solarien und Heimsonnen, Teil 1 Meßverfahren, Typeneinteilung, Kennzeichnung
- /36/ DIN 5496, Temperaturstrahlung
- /37/ DIN 58190, Teil 1, Optische Strahlungsfiler. Einteilung, Begriffe, 1972
- /38/ DIN 67501, Experimentelle Bewertung des Erythemschutzes von externen Sonnenschutzmitteln für die menschliche Haut, 09.1999
- /39/ DIN EN 170 Persönlicher Augenschutz, Ultraviolettschutzfilter, Transmissionseigenschaften und empfohlene Verwendung, Dezember 1992
- /40/ DIN EN 60335-2-27, Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke, Teil 2-27: Besondere Anforderungen für Hautbestrahlungsgeräte mit Ultraviolett- und Infrarotstrahlung (IEC 60335-2-27:2002); Deutsche Fassung EN 60335-2-27, 2003
- /41/ Ehrenstein, W., Das Auge stellt die biologische Uhr des Menschen – Konsequenzen für Lichtnutzung und Lichttechnik, Drittes Symposium Licht und Gesundheit, Berlin 2002

Optimierte Gerätetechniken für UV- und Lichttherapie

- /42/ Empfehlungen zur Phototherapie und Photochemotherapie der AWMF (Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften), AWMF Leitlinie Nr 013/ 029, Düsseldorf 2002
- /43/ Empfehlungen zur UV-A1 – Phototherapie der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft unter www.derma.de/103.0.html
- /44/ EN 61000-3-3: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) , Teil 3-3: Grenzwerte – Begrenzung von Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker in öffentlichen Niederspannungs-Versorgungsnetzen für Geräte mit einem Bemessungsstrom $\leq 16A$ je Leiter, die keiner Sonderanschlussbedingung unterliegen, 1995
- /45/ Festigkeit von Glas, Praktikumsunterlagen, Praktikum Werkstoffprüfung, Fachgebiet Materialwissensch, TU-Darmstadt, 2004
- /46/ Freedman, M. S., Lucas, R.J., Soni, B., von Schantz, M., Munoz, M., David-Gray, Z., Foster, R., Regulation of mammalian circadian behavior by non-rod, non-cone, ocular photoreceptors, Science. 1999 Apr 16;284(5413):502-4.
- /47/ Gall, D., Circadiane Lichtgrößen und deren messtechnische Erfassung, Licht 7-8, S. 860-871, 2002
- /48/ Gall, D., Die Messung circadianer Strahlungsgrößen, Tagungsband zum IV. Symposium Licht und Gesundheit, S. 114- 132, Berlin 2004
- /49/ Gall, D., Grundlagen der Lichttechnik, Kompendium, Pflaum Verlag, München 2004
- /50/ Gall, D., Lapuente, V., Beleuchtungsrelevante Aspekte bei der Auswahl eines förderlichen Lampenspektrums, Licht (Heft 7/8), 2002
- /51/ Gefährdung der Augen, Informationen der Berufsgenossenschaftlichen Institut für Arbeitssicherheit –BIA, Sankt Augustin 7.2002
- /52/ George, C., Brainard, et al. , Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor, The Journal of Neuroscience, August 15, 2001, 21(16):6405-6412
- /53/ Glickman, G., Levin, R., Brainard G. C., Ocular Input for Human Melatonin Regulation, Relevance to Breast Cancer, Neuroendocrinology Letters 2002; 23(suppl 2):17–22
- /54/ Greiter, F., Urbach, F., et al., Systemic effects of UV radiation on human physiology, Photobiology Longworth, J. W., Fagger, J., Shropshire, Jr., W., eds., Praeger, NY, 1985, pp. 175-182.
- /55/ Grothmann, K., Messung und Bewertung optischer Strahlung in der Phototherapie, Dissertation, Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Berlin, erschienen bei Fortschritt-Berichte VDI, Düsseldorf 1999
- /56/ Guidelines on Limits of Exposure to Laser Radiation of Wavelengths Between 180 nm and 1000 μm . ICNIRP Guidelines. Health Physics, November 1996, Vol. 71, No. 5, pp 804-819.
- /57/ Hannibal, J., Hindersson, P., Knudsen, S. M., Georg, B. , Fahrenkrug, J. *The Photopigment Melanopsin Is Exclusively Present in Pituitary Adenylate Cyclase-*

Literaturverzeichnis

- Activating Polypeptide-Containing Retinal Ganglion Cells of the Retinohypothalamic Tract*, J. Neurosci., January 1, 2002; 22(1): RC191 - 191.
- /58/ Harrison's Innere Medizin 1, 15. Auflage, Deutsche Ausgabe (Hrsg. M. Dietel, J. Dudenhausen, N. Suttrop). ABW-Wissenschaftsverlag 2002
- /59/ Heinig, W. D., Heinrich, H. J., Messungen an Solarimetern, Laborarbeit, Institut für Lichttechnik der Technischen Universität Berlin, 1978
- /60/ Hentschel, H.-J. (Hrsg.), „Licht und Beleuchtung“, Hüthig Verlag, Heidelberg 1994
- /61/ Herstellerangaben, Optronic Laboratories, Inc., Orlando, FL, USA
- /62/ Herstellerangaben, Rollei d30 flex, Systemfamilie LMK 2000, Techno-Team Bildverarbeitungs GmbH
- /63/ Hochberg, Z. (ed): Vitamin D and Rickets. Endocr Dev. Basel, Karger, 2003, vol 6, pp 1-13
- /64/ Holick, M. F., Vitamin D; A millennium Perspective, J Cell Biochem. 88:296-307, 2003
- /65/ Holick, M.F., Mündliche Mitteilungen
- /66/ Holick, M.F., Vitamin D: importance in the prevention of cancers, type 1 diabetes, heart disease, and osteoporosis. Am J Clin Nutr. 2004;79(3):362-371
- /67/ <http://emsolar.ee.tu-berlin.de/~seifos/import/solar2.html>
- /68/ <http://www.mcphersoninc.com/spectrometers/vuvuvvis/model225.htm>
- /69/ Informationen der Strahlenschutzkommission (SSK) Nummer 4, Schutz des Menschen vor solarer UV-Strahlung, 1997
- /70/ Jakob, F., 1,25(OH)₂-Vitamin D₃, das Vitamin D-Hormon, Der Internist, Band 40, Nummer 4, S. 414-430, Springer Verlag, Heidelberg 1999
- /71/ Jüstel, T., Nikol, H., Ronda, C., Neue Entwicklungen auf dem Gebiet lumineszierender Materialien für Beleuchtungs- und Displayanwendungen, Angewandte Chemie, Volume 110, Issue 22, Pages 3250 – 3271, 1999
- /72/ Kaase, H, Yang, Y., Spektrale Untersuchung zu der Beziehung zwischen Strahldichte, Bestrahlungsstärke und Strahldichte Koeffizient, Optik 62, Nr. 3, S. 309 – 316, Stuttgart 1982
- /73/ Kaase, H., Bischoff, K, Metzendorf, J., Strahlungsnormale in Vieth, G. Kaase, H. (Hrsg.) Spekt-ralradiometrie: Methodik, Messtechnik, Anwendung, PTB-Bericht, PTB-Opt-24, Braunschweig 1986
- /74/ Kaase, H., Fundamentals and Limitations of Optical Radiation Measurements, Berlin VDI Verlag Düsseldorf, 1999
- /75/ Kaase, H., Problems of Spectroradiometry, in: M.F. Holick, E.G. Jung (Eds.): Biologic Effects of Light 1995, de Gruyter, Berlin – New York, S. 117-124
- /76/ Kaase, H., Serick, F., Aydinli, S., Rosemann, A., Yeni, M.: Umdruck zum Seminar, Grundlagen der Lichttechnik, Berlin 2002
- /77/ Kaase, H., UV-Radiometrie, in: Biologische Wirkung des UV-Lichts, STH Berichte, S. 13-19, Berlin 1981
- /78/ Kaase, H., Yeni M., Messtechnische Bewertung von UV-, VIS-, und IR-Bestrahlungsgeräten, Tagungsband zum II. Symposium Licht und Gesundheit, S. 101 - 113, Berlin 2001

Optimierte Gerätetechniken für UV- und Lichttherapie

- /79/ Keitz, H. A. E., Lichtberechnungen und Lichtmessungen, Zweite Auflage, Philips Technische Bibliothek, Eindhoven 1967
- /80/ Kerry M. H., John D. S., Epidermal trans-urocanic acid and the UV-A-induced photoaging of the skin , Biophysics Vol. 95, Issue 18, 10576-10578, September 1, 1998
- /81/ Kiefer, J (Hrsg.), Ultraviolette Strahlen, Walter de Gruyter, Berlin New York, 1977
- /82/ Kolkowski, A., Serotonin und seinelichtähnliche Wirkung im circadianen System der Ratte, Dissertation, Stuttgart 2000
- /83/ Kräuchi K, Cajochen C, Wirz-Justice A., A relationship between heat loss and sleepiness: Effects of postural change and melatonin administration. J Appl Physiol 83:134-139, 1997
- /84/ Krause R., Kreislaufregulation und Umwelteinflüsse, Tagungsband zum IV. Symposium Licht und Gesundheit, S. 66 - 68, Berlin 2000
- /85/ Krause, R., Bühring M., Dobberke, J. et al., Kreislaufregulation und UV-Strahlung, Tagungsband zum III. Symposium Licht und Gesundheit, S. 188 - 192, Berlin 2002
- /86/ Krause, R., Bühring M., Dobberke, J. et al., Vergessene Indikationen: Heliotherapie bei Herz-Kreislauf- und Knochenerkrankungen, Tagungsband zum I. Symposium Licht und Gesundheit, S. 111 - 119, Berlin 2000
- /87/ Krause, R., Holick, M. F., Yeni, M., et. al., Dosis-Wirkungs-Beziehung bei seriellen Bestrahlungen mit sonnenähnlichen UV-Spektren mit dem Vitamin D₃-Metabolismus, 3. Symposium Licht und Gesundheit, S. 98-107, Berlin 2002
- /88/ Krause, R., Kaase H., Yeni m. et al., Dosis-Wirkungs-Beziehungen bei seriellen Bestrahlungen mit sonnenähnlichen UV-Spektren mit dem Vitamin D₃-Metabolismus, Tagungsband zum II. Symposium Licht und Gesundheit, S. 98 - 107, Berlin 2001
- /89/ Lack L, Wright H., The effect of evening bright light in delaying the circadian rhythms and lengthening the sleep of early morning awakening insomniacs, Sleep. 1993 Aug;16(5):436-43.
- /90/ Lindner, H., Probleme der Beleuchtung am Arbeitsplatz, Folia ophthalmol. 12, S. 135 – 138, Leipzig, 1987
- /91/ Lockley, S.W., Brainard, G.C., Czeisler, C.A., High sensitivity of the human circadian melatonin rhythm to resetting by short wavelength light. Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism 2003
- /92/ Longstreth j. et al., Health Risks, Journal of Photochemistry and Photobiology, Biology 46 (1998) 20-39
- /93/ Lotze, M., Visuelle Grundlagen zur Lichttherapie, Lichttherapie S. 13-19, S. Roderer Verlag, Regensburg 1999
- /94/ Lucas, R. J., Foster, G. F., Neither functional rod photoreceptors nor rod or cone outer segments are required for the photic inhibition of pineal melatonin, Endocrinology Vol. 140 nr. 4, S. 1520 – 1524, London, 1999

Literaturverzeichnis

- /95/ Marjolein Visser, M., Deeg, D. J. H., Lips, P., Low Vitamin D and High Parathyroid Hormone Levels as Determinants of Loss of Muscle Strength and Muscle Mass (Sarcopenia), *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* Vol. 88, No. 12 5766-5772, 2003
- /96/ Marx, P.: *Das Spiralphotometer*, Dissertation D83, TU Berlin 1974
- /97/ Matthes R., *Gesundheitlicher Gefahren der ultravioletten Strahlung*, *Bundesgesundheitsblatt Sonderheft* 10.1994
- /98/ McCollum, E. V., Simmonds, N., Becker, J. E., Shipley, P. G., *Studies on experimental rickets, XXI an experimental demonstration of the existence of a vitamin which promotes calcium deposition*, *J. Biol. Chem.*, Aug 1922; 53: 293 - 312
- /99/ Meffert, H., Buchholz, I., Brenke, A., *Milde Infrarot-A-Hyperthermie zur Behandlung der systemischen Sklerodermie*, *Dermatol. Mon. Schr.* 176 (1990), 683-686
- /100/ Meffert, H., Gaunitz, K., Gutewort, T., Amlong, U. J., *Aknetherapie mit sichtbarem Licht*, *Dermatol. Mon. Schr.* 173 S. 8- 11, 1987
- /101/ Meffert, H., Piazena, H., *Wirkungen der infraroten Strahlung auf den Menschen*, *Tagungsband zum I. Symposium Licht und Gesundheit*, S. 175 - 185, Berlin 2004
- /102/ Meffert, H., Piazena, *Wirkungen der infraroten Strahlung auf den Menschen*, *Tagungsband zum I. Symposium Licht und Gesundheit*, S. 92 - 99, Berlin 2000
- /103/ Methling, D., Peschke, M., *Licht, Beleuchtung und Sehen*, Verlag Tribüne, Berlin 1978
- /104/ *Modern Nutrition in Health and Disease*, Edited by Shils, Olson and Shike, Eighth ed. S. 308-316, 1994
- /105/ Moore RY., *Circadian rhythms: basic neurobiology and clinical applications*, *Annu Rev Med.* 48, S. 253- 266, 1997
- /106/ Müller-Breitenkamp U, Hockwin O, Siekmann H, Wegener A, *UV-induzierte Pathologie des menschlichen Auges*, TÜV Verlag, Köln, S. 149 - 156 In: Krause N, Fischer M, Steimel H-P (Hrsg): *Nichtionisierende Strahlung*
- /107/ Niedrig, H. (Hrsg.), *Bergmann Schäfer Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 3, Optik-Wellen- und Teilchenoptik*, 10 Auflage, Walter de Gruyter Berlin 2004
- /108/ Pevet, P., Nothorel, B., Sloten, H., Saboureau M., *The chronobiotic properties of melatonin*. *Cell Tissue, Res* 309(1) S. 183- 191, 2002
- /109/ Piazena, F., Meffert, H., *Photobiologische Eigenschaften von Solarien*, *Tagungsband zum II. Symposium Licht und Gesundheit*, S. 114 - 124, Berlin 2001
- /110/ Piazena, H., *Cirkadiane Wirksamkeit der Solarstrahlung*, *Tagungsband zum IV. Symposium Licht und Gesundheit*, S. 95- 1113, Berlin 2004
- /111/ Piazena, H., Meffert, H., *Photobiologische Bewertung von UV-Bestrahlungsgeräten*, *Tagungsband zum I. Symposium Licht und Gesundheit*, S. 3 - 18, Berlin 2000
- /112/ Piazena, H., Meffert, H.: *Humanbiologische und medizinische Wirkungen ultravioletter Strahlung*. *Bundesgesundheitsblatt, Sonderheft* 10/1994, S. 11-26, 1994
- /113/ Piazena, H., *Verfahren zur Solarienbewertung*, *Tagungsband zum IV. Symposium Licht und Gesundheit*, S. 35 - 65, Berlin 2004

Optimierte Gerätetechniken für UV- und Lichttherapie

- /114/ Piazena, H., Zur Dosierung solarer UV-Bestrahlungen in der Klimatherapie, Z. Physiother. Jg. 42, S. 75 – 80, Leipzig, 1990
- /115/ Piazena, H., Zur geographischen und zeitlichen Variabilität der erythemwirksamen solaren UV-Strahlung an der Erdoberfläche, Z. Physiother. Jg. 42, S. 357 – 367, Leipzig, 1990
- /116/ Reule, A., Dispersive Spektralapparate S. 18- 45 in Vieth, G. Kaase, H. (Hrsg.) Spektralradiometrie: Methodik, Messtechnik, Anwendung, PTB-Bericht, PTB-Opt-24, Braunschweig 1986
- /117/ Richter, M., Einführung in die Farbmeterik, de Gruyter Berlin, New York 1. Auflage, 1976
- /118/ Richter, M., Einführung in die Farbmeterik, Verlag de Gruyter, Berlin, New York 1981
- /119/ Rochlin, G. N.: Halogenmetallampfen, Verlag Energija, 1971, (in deutscher Übersetzung von VEB NARVA, Berliner Glühlampenwerk Abt. Dokumentation)
- /120/ Schönfelder, U., Der Einfluss von Cholesterol auf die UV-induzierte Päroxidation der Lipide des menschlichen Stratum corneum, Dissertation, Halle, 1999
- /121/ Schutz des Menschen vor den Gefahren der UV-Strahlung in Solarien - Wissenschaftliche Begründung, Wissenschaftliche Begründung zur gleichnamigen Empfehlung der Strahlenschutzkommission, Bonn 2001
- /122/ Schutz des Menschen vor den Gefahren der UV-Strahlung in Solarien, Empfehlungen der Strahlenschutzkommission, Bonn 2001
- /123/ Schutz des Menschen vor den Gefahren der UV-Strahlung in Solarien, Wissenschaftliche Begründung zur gleichnamigen Empfehlung der Strahlenschutzkommission, Bonn 2001
- /124/ Selektive UVA1-Bestrahlung, Zusammenfassender Bericht des Arbeitsausschusses "Ärztliche Behandlung" des Bundesausschusses der Ärzte und Krankenkassen über die Beratungen gemäß §135 Abs.1 SGB V, Köln 2001
- /125/ Selektive UV-A-Bestrahlung, Zusammenfassender Bericht des Arbeitsausschusses der „Ärztliche Behandlung“ des Bundesausschusses der Ärzte und Krankenkassen über die Beratungen Gemäß § 135 Absatz 1 SGB V, Köln 2001
- /126/ Spiegelmonochromator SPM 2, Gebrauchsanweisung des Gerätes, Druckschrift Nr. 32-G 322 b-1, Carl Zeiss Jena
- /127/ Thapan, K., Arendt, J., Skene, D. J., An action spectrum for melatonin suppression, Journal of Physiology (2001), 535.1, S. 261-267
- /128/ UV Radiation Exposure Dosimetry of the Eye, WHO/EHG/95.18, written for the World Health Organization by David H. Sliney, U.S. Army Laser/Optical Radiation Program, Geneva, 1995.
- /129/ van Esseveldt K. E. , Lehman MN, Boer GJ., The suprachiasmatic nucleus and the circadian time-keeping system revisited, Brain Res. Rev. 33(1), S. 34-77, 2000
- /130/ VDE 0700 Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke, Teil 2-27: Besondere Anforderungen für Hautbestrahlungsgeräte mit Ultraviolett- und Infrarot-Strahlung

Literaturverzeichnis

- /131/ Vgontzas, A. N., Papanicolaou D. A., Bixler E. O. et al., Circadian interleukin-6 secretion and quantity and depth of sleep., J. Clin. Endocrinol Metab. 84(8):2603-7, 1999
- /132/ Waßmer T., Die zeitliche Organisation des Winterschlafs beim Europäischen Feldhamster, Dissertation, Fakultät für Biologie, Universität Konstanz, München 1998
- /133/ Waymouth, J. P.: Electric Discharge Lamps, Cambridge Mass. and London, M. I. T. Press, 1971, (in deutscher Übersetzung von VEB NARVA Berliner Glühlampenwerk Abt. Dokumentation)
- /134/ Weis, B. Grundlagen der Beleuchtungstechnik, Pflaum-Verlag, München 2001
- /135/ Weiß, B., Physiologie des Sehens/ Probleme der Darstellung des nächtlichen Straßenraumes auf dem Bildschirm, Licht 6, 1990, S. 491 – 500
- /136/ Weiterentwicklung der Forschung zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung, Empfehlungen der SSK, Bonn 2002
- /137/ Werdermann, D., <http://www.auge-online.de/>
- /138/ Whistler, D. Morbo puerili Anglorum, quem patrio idiomae indigenae vocant the rickets. Lugduni Batavorum (1645), S. 1 - 13
- /139/ Windaus, A., Linsert, O. Luttringhaus, A. and Weidlinch, G. Über das kristallisierte Vitamin D₂. Justis. Liebigs. Ann. Chem. 492: 226-231, 1932
- /140/ Wiskemann, A., Langzeitwirkungen optischer Strahlung auf die Haut, Aktuelle Dermatologie 14, 11, S. 32, , 1988
- /141/ Wurtsand, S. W., Edgar, D. M., Circadian and Homeostatic Control of Rapid Eye Movement (REM) Sleep: Promotion of REM Tendency by the Suprachiasmatic Nucleus , The Journal of Neuroscience 20(11) S. 4300 - 4310, 2000
- /142/ Yeni, M., Dimmung von Halogenmetall dampflampen mit Al₂O₃-Keramikkbrenner, Studienarbeit im Fachbereich der Technischen Universität Berlin, 1997
- /143/ Yeni, M., Einfluss des Halogengehaltes auf die lichttechnischen Parameter von Halogen-Metall dampflampen, Diplomarbeit im Fachbereich der Technischen Universität Berlin, 1999
- /144/ Yeni, M., Kaase H., Messung der UV-Gesamtstrahlungsleistung, Tagungsband zum III. Symposium Licht und Gesundheit, S. 79 - 88, Berlin 2002
- /145/ Yeni, M., Kaase, H., Bewertungsgrößen für Lichttherapiegeräte, Tagungsband zum IV. Symposium Licht und Gesundheit, S. 133 - 143, Berlin 2004
- /146/ Zeitzer, JM., Dijk, D.J., Kronauer, R., Brown, E., Czeisler, C., Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression. J Physiol, 526.3 S. 695-702, 2000
- /147/ Zulley, J., Wirz-Justice, A., Sammelband-Lichttherapie, Biologische Rhythmen und Schlaf, Regensburg 1999
- /148/ Zwick, P., Messung und Bewertung aktinischer UV-Strahlungsanteile, VDI Reihe 17 Nr. 62, Düsseldorf 1990

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter mit Lehraufgaben am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Berlin.

Meinem Doktorvater und Lehrer Herrn Prof. Dr. rer. nat. H. Kaase möchte ich aufrichtig für die Bereitstellung des außerordentlich interessanten Themas, die hervorragende Betreuung sowie die zahlreichen Anregungen zum Fortgang dieser Arbeit danken.

Bei den Mitgliedern des Promotionsausschusses Prof. Dr.-Ing. habil. D. Gall und Prof. Dr. med. H. Meffert bedanke ich mich für die Begutachtung und die kritische Durchsicht meiner Arbeit. Herrn Prof. Dr. -Ing. R. Orglmeister danke ich für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses.

Dr. rer. nat. H. Piazena möchte ich für die unendlich vielen Nanometer, die unsere Spektラルradiometer zusammen erfasst haben, und die fachlichen Hinweise zu Fragen der Photobiologie danken. Dr. med. R. Krause gilt mein Dank für die Kooperation und die Einbeziehung in die klinische Praxis der Phototherapie sowie Bereitstellung von Messobjekten. Bei Dr.-Ing. F. Serick möchte ich mich für die vielen, vielen praktischen Hinweise und stets expliziten Antworten auf alle Fragen der Lichttechnik bedanken. Ein besonderer Dank gilt Dr.-Ing. S. Aydınli, der als kompetenter Fachmann zu vielen Themen dieser Arbeit als Diskussionspartner bereitstand. Dr.-Ing. A. Rosemann danke ich für die freundliche Zusammenarbeit und den regen Gedankenaustausch. Meinen Kollegen im Fachbereich Lichttechnik gilt mein Dank für ihre stete Kollegialität.

Den Mitarbeitern des Fachgebietes Lichttechnik, Herrn Volz und Herrn Oertwig danke ich für ihre tatkräftige Unterstützung bei allen praktischen Problemen insbesondere bei der Realisierung des UV-Sonnensimulators. Bei den Studenten A. Buss, M. Reimers und M. Nolle möchte ich mich bedanken, dass sie mit ihren Studienarbeiten zu dieser Arbeit beitrugen.

Mein herzlicher Dank gilt meinem Vater Hüseyin Yeni und meiner ganzen Familie, die mir nicht nur zu der Zeit der Entstehung dieser Arbeit den Rücken freigehalten und mich stets motiviert haben.