



Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e..V.



Technische
Universität Berlin

Siebentes Symposium

Licht und Gesundheit



15. und 16. März 2012

**Eine Sondertagung der TU Berlin und
der DAfP, DGP und LiTG**

TAGUNGSBEIRAT

Prof. Dr. Heinrich Kaase (Vorsitzender)	Berlin
Dr. Peter Bocionek	Stuttgart
Prof. Dr. Erhard Hölzle	Oldenburg
Dr. Rolfdieter Krause	Berlin
Prof. Dr. Hans Meffert	Berlin
Prof. Dr. Christoph Schierz	Ilmenau
Prof. Dr. Paul W. Schmits	Hildesheim
Prof. Dr. Rolf Markus Szeimies	Recklinghausen
Prof. Dr. Jürgen Zülley	Regensburg

FACHLICHE GESAMTLEITUNG

Prof. Dr. Stephan Völker

Vorwort

Licht, Leben und Gesundheit sind untrennbar miteinander verbunden. Ohne Licht gibt es kein menschliches Leben. Dass fehlendes Licht die Gesundheit gefährden kann, ist auch nicht wirklich neu. Vor dem Hintergrund Energie sparen zu müssen und in allen Bereichen der Lichttechnik laut über ein mögliches Absenken der Beleuchtungsniveaus nachzudenken, wird das Thema Licht und Gesundheit aktueller denn je. Darüber hinaus führte der Einzug des Solid-State-Lighting in die Allgemeinbeleuchtung in den letzten Jahren immer wieder zu heftigen Diskussionen über ein mögliches Gefährdungspotenzial durch kurzwellige Strahlung.

Das Symposium Licht und Gesundheit gehört seit 2001 zu einer festen Einrichtung des Fachgebietes Lichttechnik der TU Berlin. Auch wenn die Veranstaltung vor zwei Jahren wegen der Personalveränderungen leider ausfallen musste, freue ich mich als neuer Fachgebietsleiter, 2012 die Tradition des Symposiums fortführen zu dürfen.

Die zwei Tage des Symposiums sind gefüllt mit spannenden Vorträgen von Experten aus den verschiedensten Fachrichtungen. Das Feld erstreckt sich hierbei von der Lichttechnik über die Dermatologie und Arbeitsmedizin bis hin zur Architektur. Aber auch auf ganz ausgefallene Themen wie die Weltraummedizin dürfen wir uns freuen.

Höhepunkt des Symposiums wird auch dieses Jahr die Verleihung des mit 10.000,- € dotierten Arnold Rikli-Preises sein. Dieser wird von der Jörg-Wolff-Stiftung gestiftet.

Im vorliegenden Tagungsband finden Sie alle Vorträge, die uns bis zum Redaktionsschluss zugesendet wurden, nach ihrer Reihenfolge im Tagungsprogramm. Das Programm wurde in folgende Bereiche gegliedert:

- Natürliche und künstlich Strahlung
- Biophotonik
- Arbeits- und Gesundheitsschutz
- Strahlungswirkung über die Haut
- Wirkungen sichtbarer und infraroter Strahlung

Anschließend folgen die eingereichten Posterbeiträge in alphabetischer Reihenfolge.

Neben dem gedruckten Konferenzband erhalten alle Teilnehmer auch eine CD, mit der die Abbildungen farbig wiedergegeben werden.

Ich bedanke mich für die qualifizierten Beiträge und wünsche allen Teilnehmern kurzweilige und interessante Tage. Für die Vorbereitung der Tagung sei an dieser Stelle ganz besonders Herrn Prof. Kaase, Frau Schumacher und Herrn Chahrour gedankt.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Stephan Völker', with a long horizontal flourish extending to the right.

Stephan Völker

INHALTSVERZEICHNIS

Einführungsvortrag: 12 Jahre Licht und Gesundheit H. Richter, Arnsberg	9
--	----------

Natürliche und künstliche Strahlung

Breitbandige Strahlungsmessungen im DWD K. Behrens, Lindenberg	14
--	-----------

Leben hinter Glas R. Hammer, P. Holzer, Krems	26
---	-----------

Weißer Leuchtstoff-basierte Hochleistungs-LEDs T. Q. Khanh, P. Bodrogi, T. Q. Vinh, Darmstadt	51
---	-----------

Biophotonik

Psychophysiological Measurement and Simulation of Photopic and Mesopic Vision W. Backhaus, Berlin	60
---	-----------

Die Anwendung von blauem Licht als ein mögliches Verfahren zur Charakterisierung zirkadianer Rhythmen und deren Störungen R. Uebelhack, L. Franke, H. Piazena	73
---	-----------

Die Haut im Spannungsfeld der positiven und negativen UV-Wirkungen J. Reichrath, Homburg/Saar	77
---	-----------

Gastvortrag: Photobiology of Vitamin D for Human Health M. Holick, Boston	82
---	-----------

Arbeits- und Gesundheitsschutz

Leitfaden zur EU-Richtlinie „Künstliche optische Strahlung“ G. Ott, L. Udovicic, E. Romanus, Dortmund	106
---	------------

Die Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung H. Siekmann, Bonn	114
--	------------

UV-Eigenschutz der Haut P. Knuschke, Dresden	127
--	------------

In vitro Bestimmung der Schutzwirkung von Sonnenschutzmitteln D. Kockott, Hanau	136
---	------------

Strahlungswirkung über die Haut

- Fluoreszenzdiagnostik und Photodynamische Therapie Aktinischer Keratosen in der hautärztlichen Praxis** 149
H. Meffert, E. Rowe, H. Piazena, G. Kolde, Berlin
- Heliotherapie und Innere Medizin** 157
R.-D. Krause, Berlin
- Thermische, schädigende und protektive Wirkungen von Infrarot-Hautbestrahlungen** 161
H. Piazena, H. Meffert, R. Uebelhack, W. Müller, W. Pittermann, K. Jung und M. Kietzmann, Berlin
- Vom UV-Schutz zum Lichtschutz? Anforderungen an moderne Sonnenschutzmittel** 183
J. Lademann, A. Patzelt, H.-J. Weigmann, S. Schanzer, M. Meinke, L. Zastrow, Berlin

Wirkungen sichtbarer und infraroter Strahlung

- Lichtwirkungen am Tag - Feldstudie in Industriebetrieben** 188
K. Bieske, C. Vandahl, Ch. Schierz, Ilmenau
- Blue Light for Pain Therapy** 201
M. Born, Aachen
- Wassergefiltertes Infrarot A (wIRA) in Chirurgie und Dermatologie** 202
G. Hoffmann, Frankfurt

-
- Abschlussvortrag: Weltraummedizin** 232
H.-Ch. Gunga, Berlin

Posterbeiträge

- Psychophysical Experiments with Related Photopic and Mesopic Lights** 233
S. Burmeister, W. Backhaus, Berlin
- Spectral Measurement of Photopic and Mesopic Light** 238
W. Backhaus, Berlin
- Mobiles Messsystem zur Gefährdungsbeurteilung von künstlich erzeugter Strahlung** 242
W. Dähn, A. Pietzsch, Türkenfeld

Parameter für die Sanierung von Beleuchtungsanlagen am Beispiel einer Schulbeleuchtung	248
S. Gramm, S. Aydınli, Berlin	
The Radical Status of the skin after UV irradiation	253
T. Herrling, K. Jung, Berlin	
Simulation of the Sun Protection Factor (SPF) and of UVA Protection: The BASF Sunscreen Simulator	259
B. Herzog, Grenzach-Wyhlen, U. Osterwalder, Düsseldorf	
Computerized Generation of Photopic and Mesopic Light for Psychophysical Experiments	266
A Krensel, W. Backhaus, Berlin	
Biometeorologische Aspekte in der Beurteilung des Tageslichtes in Hinsicht auf die Behandlung von SAD Patienten	271
G. Paissidis, H. Kambezidis, Athen	
Messungen der natürlichen Beleuchtung im Freien und im Büro	276
W. Pepler, T. Q. Khanh, Darmstadt	
Light-controlled melantonin suppression considering person´s age	280
H. Piazena, L. Franke, R. Uebelhack, D. Kockott, S. Völker, Berlin	
Dämmen und Belichten – Lichtverlust in Wohnungen nach thermischer Sanierung	282
G. Radinger, Krems	

12 Jahre Licht und Gesundheit

HaJo Richter, Dipl.-Ing.
Arnsberg

Meine sehr verehrten Damen und Herren,
der Tagungsbeirat hat mich gebeten, in einer kurzen Rückschau über die 12 Jahre Symposium „Licht und Gesundheit“ vom Beginn bis heute und über den zur Tradition gewordenen Kongress zu erinnern.

Als vor 12 Jahren, am 25. Februar 2000, das erste Symposium Licht und Gesundheit hier an der Technischen Universität in Berlin unter der Gesamtleitung des Initiators, Herrn Prof. Kaase, stattfand, konnte keiner ahnen, dass sich daraus eine nicht mehr wegzudenkende interdisziplinäre und dringend erforderliche Tagung entwickeln würde. Gewünscht hatten dies damals schon viele von uns!

Vielleicht hatten Initiator und Beirat nicht ohne Gründe das Symposium zunächst nur auf einen Tag begrenzt, um die Resonanz in den Fachkreisen abzuwarten. Die Resonanz übertraf alle Erwartungen. Und so hat sich dieses Symposium in der Zwischenzeit zu einer wichtigen Plattform für den Informationsaustausch über bislang gepflegte Fachgrenzen hinaus entwickelt.

Und dass wir uns hier und heute wieder an der TU zum 7. Symposium treffen können, verdanken wir nicht nur dem Initiator, sondern auch dem neuen Leiter des Fachgebietes Lichttechnik an der TU, Herrn Prof. Dr. Stephan Völker. Neben dem Dank an Sie – verehrter Prof. Völker – geht an Sie auch unser Wunsch, diese Tradition und das Symposium auch in den nächsten Jahren fortzusetzen.

Licht und Gesundheit ist zu einem interdisziplinären Cluster von Photobiologen, Biophysikern, Klimatologen, Physiologen, Ergonomen, Psychologen, Arbeitsmedizinern, Ophthalmologen, Dermatologen, Balneologen, Ärzten der physikalischen Therapie und Lichtfachleuten - um nur einige Disziplinen zu nennen - geworden.

Auch das 7. Symposium findet unter der fast gleichen Mitträgerschaft wie vor 12 Jahren statt, nämlich

- dem Fachgebiet Lichttechnik der TU-Berlin,
- der Deutschen Akademie für Photobiologie und Phototechnologie e. V. (DAfP)
- der Deutschen Gesellschaft für Photobiologie (DGP), die aus der damaligen Gesellschaft für Lichtforschung hervorgegangen ist,
- der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft e. V.
- und bis 2004 auch dem Berliner Zentrum Public Health.

In seiner Eröffnungsrede zum **1. Symposium** im Jahr 2000 sagte Prof. Kaase, dass sich das damals gerade zu Ende gegangene 20. Jahrhundert eine über alle Klimafragen hinwegsetzende perfekte Kunstwelt geschaffen habe und es an der Zeit sei, die Natur in das menschliche Lebensumfeld zurückzuholen. Und dabei spielten die Wirkung und Wahrnehmung der visuellen und nicht-visuellen Strahlung auf den Menschen eine zentrale Rolle. Damals war die schädigende Wirkungen nicht-visueller Strahlung in aller Munde und ein zuweilen sogar bis zum Horrorszenario hochstilisiertes Thema der Medien geworden. Ich erinnere an Stichwort wie z. B. das Ozonloch. Die positiven Effekte nicht-visueller Strahlung auf den Menschen traten im Vergleich dazu eher in den Hintergrund.

Während das 1. Symposium mit seinen Themen – um es salopp zu sagen – eher etwas medizinlätig war, hatte das 2. und die folgenden Symposien die gewünschte Ausgewogenheit zwischen den physikalisch-technischen Grundlagen und neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen, etwa über die Korrelation von Licht und Gesundheit einerseits und den praktischen Fragen der Licht- und Beleuchtungstechnik, der Lichttherapie und weiterer Praxisfragen andererseits, erreicht. Der Themenumfang wurde erweitert – und das Symposium ging ab dann über fast 2 Tage.

In seiner Begrüßung zum **2. Symposium** am 22. und 23. Februar 2001 erinnerte der Tagungsleiter Prof. Kaase an die genau vor 200 Jahren – am 22. Februar 1801 – vom Naturforscher Johann Wilhelm Ritter entdeckte ultraviolette Strahlung, über die dieser in den Annalen der Physik 1801 berichtete. Die Fachleute nahmen damals

jedoch von dieser Entdeckung wenig Notiz, und es dauerte noch lange, bis ihre Bedeutung erkannt wurde.

Ferner erinnerte der Tagungsleiter an die damals vom Bundesministerium für Bildung und Forschung ausgerufenen Deutschen Agenda „Optische Technologien für das 21. Jahrhundert“ und das beginnende Jahrhundert des Photons. Das 20. Jahrhundert hatte das Elektron und die Informationstechnologien im Focus der angewandten Forschung. Optische Technologien – so seine Vorausschau – werden das Thema „Licht zum Heilen“, die Phototherapie und den gesamten Gesundheitsbereich maßgebend beeinflussen.

Höhepunkt des 2. Symposiums war die Podiumsdiskussion, zu der auch die Öffentlichkeit eingeladen war. Die Moderation lag damals bei dem sehr eloquenten Wissenschaftsjournalisten des Senders Freies Berlin, Herrn Dr. Schibber. Viele von Ihnen werden sich an die teils sehr kontroverse Diskussion zum Thema „Gute Sonne - böse Sonne“ erinnern.

Das **3. Symposium** am 21. und 22. Februar 2002 hatte den Themenumfang abermals erweitert. Strahlungserzeugung und Strahlungsmessung, die medizinische Wirkung von Strahlung und das komplexe Thema der Wirkung des lichttechnischen Ambientes und dessen Gestaltung wurde behandelt. Erstmals gab es auch Posterbeiträge und Gerätepräsentationen. In der Abschlussdiskussion mit dem Thema „Sonnenbaden: Sonnenschutz und Risiko“ trafen Meinungen über Prävention **gegen** und Protektion **für** das Sonnenlicht kontrovers aufeinander.

Das **4. Symposium** am 26. und 27. Februar 2004 befasste sich erstmals mit der circadianen Wirkung von natürlichem und künstlichem Licht auf den Menschen, insbesondere auf Menschen mit Schichtarbeit. Auch die Lampenhersteller reagierten mit innovativen Produkten und bewerten nun Lichtquellen auch nach der seit 2001 bekannten circadianen Wirkungsfunktion der Melatonin-Sekretion.

Das **5. Symposium** am 23. und 24. Februar 2006 befasste sich neben den Traditionsthemen wie Photodermatologie, Psychologie, Ergonomie und der Frage „Wie viel UV, VIS und IR braucht der Mensch?“ nun auch mit dem Thema der

biologischen Dunkelheit in künstlich beleuchteten Innenräumen und der Chronobiologie.

Ein Bericht über tageslichtähnliche künstliche Beleuchtung bei der Betreuung Hochbetagter machte LICHT in einer neuen Dimension besonders deutlich und wir haben gelernt: „**Licht ist auch ein Medikament**“.

In der Begrüßung zum **6. Symposium** am 13. und 14. März 2008 stellte Prof. Kaase fest, dass die Erkenntnisse über die biologische Wirkung der optischen Strahlung auf den Menschen einen Umdenkungsprozess ausgelöst hätten, aus dem sich erhebliche Konsequenzen für die praktische Beleuchtungstechnik - einschließlich entsprechender Normen – ergeben hätten. Auch dieses Symposium befasste sich wieder mit der Chronobiologie.

Der Einführungsvortrag „Gesundheitsökonomische Betrachtung des Lichtes“ mit den Unterthemen „Licht als Wirtschaftsfaktor“ und „Die Sonne als Lieferant erneuerbarer Energie“ kam zum Fazit, dass Licht als Gegenstand einer gesundheitsökonomischen Betrachtung noch ganz am Anfang stünde. Und das trifft auch und gerade auf die Nutzung des Tageslichts zu.

Ein Höhepunkt des 6. Symposiums war die Verleihung des Arnold Rikli-Preises, der aus Anlass unseres heutigen 7. Symposium zum 13. Mal verliehen wird. Der internationale Arnold Rikli-Preis geht auf den im Kanton Basel geborenen Rikli zurück, der zu Ende des 19. Jahrhunderts im heutigen Bled in Slowenien als Naturheilkundler wirkte. Der auch als Sonnendoktor bezeichnete Rikli praktizierte eine auf Wasser, Luft und Licht basierende Naturheilkunde und gilt als ein Pionier der Heliotherapie.

Der Arnold Rikli-Preis wurde ursprünglich vom Institut Friedrich Wolff in Riehen in der Schweiz gestiftet und erstmalig 1989 vergeben. Seit 2006 schreibt die von Jörg Wolff, dem Bruder des früheren Sponsors, gegründete Jörg Wolff Stiftung den mit 10.000,00 € ausgestatteten internationalen Preis aus. Der Preis würdigt Forschungsergebnisse im Bereich der biologischen Wirkungen von ultravioletter, sichtbarer und infraroter Strahlung mit direkter Bedeutung für die Humanmedizin.

Eine unabhängige Jury bewertet die Arbeiten und nominiert die Gewinner. Wir freuen uns auf den neuen Preisträger und auf dessen Vortrag am heutigen Abend.

Aber weiter zu unseren Symposien:

Rechtzeitig vor Beginn aller Symposien wurde den Teilnehmern ein Tagungsband mit allen Vorträgen und Posterbeiträgen ausgehändigt, deren Redaktion maßgebend auch in den Händen von Herrn Dr. Serick lag, dem ich hier ebenfalls ganz besonders danken möchte. Der Tagungsband von 2008 hatte über 320 Seiten.

Ab dem 5. Symposium lag dem Tagungsband auch eine CD mit den Beiträgen in Langfassung bei. So haben die Teilnehmer und solche, die ein Symposium versäumen mussten, die Gelegenheit, auch im Nachhinein noch die Themenvielfalt dieser Tagungsreihe aufzunehmen und deren Inhalte nachzulesen.

Ich möchte damit meine kleine Einführung, die ja nur ein Rückblick auf die zurückliegenden Symposien sein sollte, beschließen. Über die Inhalte der Symposien geben die ausführlichen Tagungsbände – wie bereits erwähnt - besser Auskunft als ich es kann.

Wir alle sind gespannt auf das diesjährige **7. Symposium** mit wieder neuen Themen, z. B. zum Arbeits- und Gesundheitsschutz.

Zum Schluss darf ich nochmals dem Veranstalter des Symposiums – dem Fachgebiet Lichttechnik der TU-Berlin und den Mitträgern – danken, insbesondere aber den Herren Prof. Völker und Prof. Kasse und deren Mitarbeitern. Und nehmen Sie die Botschaft dieser Versammlung mit, dass wir das 8. Symposium wieder hier in Berlin begehen wollen.

Breitbandige Strahlungsmessungen im DWD

Klaus Behrens

Deutscher Wetterdienst, Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung, Meteorologisches Observatorium Lindenberg – Richard-Aßmann-Observatorium, Am Observatorium 12, 14558 Tauche OT Lindenberg

1 Einleitung

Die Überwachung und Untersuchung der kurz- und langwelligen Strahlungsströme aus dem oberen Halbraum, die wesentliche Komponenten der Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche sind, ist unentbehrlich für Meteorologie und Klimatologie, liefert doch die (kurzwellige) Strahlung von Sonne (und Himmel) fast ausschließlich alle Energie für Wetter und Leben auf der Erde.

Auf Grund der Strahlungstemperatur der Sonne von rund 6000 K befinden sich etwa 99 % der damit verbundenen Energie im Bereich von 280 bis 5000 nm. In der Meteorologie versteht man unter kurzwelliger Strahlung den Bereich zwischen 0,3 und 3 μm . Das ist der Spektralbereich, in dem nach der Absorption durch die atmosphärischen Bestandteile noch Sonnenstrahlung im thermisch-optischen Bereich an der Erdoberfläche ankommt. Die langwellige Strahlung in der Meteorologie wird durch die Strahlungstemperatur des Systems Erde-Atmosphäre von etwa 290 K bestimmt und überdeckt damit einen Spektralbereich von 3 bis 50 μm .

Breitbandige Strahlungsmessungen, durchgeführt mit Pyranometern im kurzwelligen und Pyrgeometern im langwelligen Spektralbereich sind wichtiger Bestandteil im Messnetz des Deutschen Wetterdienstes (DWD).

2 Breitbandige Strahlungsmessgeräte

Im Verlauf der Entwicklung der Strahlungsmessgeräte setzten sich für die Erfassung der Strahlung in breiten Spektralbereichen bereits frühzeitig die auf kalorimetrischer Basis arbeitenden Instrumente durch. Zwei Gründe sind dafür maßgebend: Nur die kalorimetrischen Methoden erlauben es einerseits das Sonnenspektrum (0,3 bis 3 μm) als auch die von System Erde-Atmosphäre emittierte Strahlung (3 bis 50 μm) integral zu erfassen und andererseits die entsprechende Wirkung auch in absolutem Maß, also in SI-Einheiten, anzugeben.

Seit Ende der 20iger Jahre des vergangenen Jahrhunderts werden für diese Messungen vorzugsweise geschwärzte Thermosäulen als Empfänger eingesetzt. Sie haben den Vorteil, dass sie über den gesamten gewünschten Spektralbereich eine nahezu gleiche spektrale Empfindlichkeit aufweisen und dass die nutzbaren Spannungen im mV-Bereich liegen. Diese Spannungen waren auch schon vor rund 100 Jahren ohne größeren Aufwand mit hinreichender Genauigkeit messbar.

Zur Messung der kurzwelligigen Strahlung werden Pyranometer genutzt. Diese haben einen Öffnungswinkel von 2π sr und dienen der Erfassung der Strahlung aus dem gesamten Halbraum. Bei den im Bereich des DWD eingesetzten Geräten wird die Thermosäule durch zwei Glaskalotten abgedeckt. Die aktiven Lötstellen der Thermosäule werden bestrahlt während deren passive Elemente beschattet im Gehäuseinnern auf Gerätetemperatur liegen. Das benutzte Glas schützt die Thermosäule vor Witterungseinflüssen, lässt aber auch nur den gewünschten Spektralbereich der Sonnenstrahlung passieren.

Pyrgeometer zur Messung der langwelligigen Strahlung sind ähnlich aufgebaut wie die Pyranometer und erfassen ebenfalls auf Grund ihres Öffnungswinkels die Strahlung aus dem Halbraum. An Stelle der Glaskalotten wird eine Siliziumhaube eingesetzt, die mit einem speziellen Filter kombiniert ist, das den kurzwelligen Spektralbereich blockiert, so dass, je nach Hersteller, eine Transmission zwischen 3,5 und 50 μm realisiert wird.

Pyranometer und Pyrgeometer sind Relativgeräte, d. h. sie müssen kalibriert werden.

3 Kalibrierung der Strahlungsmessgeräte

3.1 Absolutpyrheliometrie

Messungen sind nur wertvoll, wenn sie weltweit vergleichbar und reproduzierbar sind. Das gilt im besonderen Maße auch für die Meteorologie und Klimatologie, wenn Aussagen zu räumlichen Unterschieden und langzeitlichen Entwicklungen gemacht werden sollen. Für klassische physikalische Größen wie z. B. die Temperatur ist dies über die Nationalen Metrologischen Institute, in Deutschland die PTB, gewährleistet. Für die Strahlung, insbesondere für die Sonnenstrahlung war dies nicht möglich, weil als Referenz für Strahlungsmessungen normalerweise die Schwarzkörperstrahlung von schmelzendem Gold (1337 K) genutzt wurde. Da die Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung auch um ein Vielfaches größer ist, war die Anwendung einer derartigen Technik nicht anwendbar. In diesem Fall muss der Strahlungsempfänger die Referenz sein [1]. Dies führte vor mehr als

100 Jahren zur Einführung des Substitutionsprinzips und zur Entwicklung des Absolutpyrheliometers nach Angström [2], bei dem die Leistung der Sonnenstrahlung durch die elektrische Leistung substituiert wurde. Am Smithsonian Institut in den USA wurden ebenfalls Pyrheliometer entwickelt, die das Substitutionsprinzip nutzten, im Gegensatz zu Angström jedoch bereits einen Hohlraum als Empfänger einsetzten [3, 4].



Abb. 1: Angström-Pyrheliometer (vorn) und Silverdisk-Pyrheliometer (hinten) als Transferstandard der Smithsonian-Skala

Pyrheliometer sind Geräte zur Messung der direkten Sonnenstrahlung auf die Normalfläche. Auf Grund ihrer Konstruktion ist es möglich, bei bekannten Geräteparametern die gemessene Bestrahlungsstärke in absoluten Einheiten also in Wm^{-2} zu erhalten. Obwohl es sich bei den Angström- und Smithsonian-Pyrheliometern um Absolutgeräte handelte, zeigten sich im Vergleich Differenzen. Diese konnten trotz vieler Vergleiche, Untersuchungen und Neukonstruktionen von Referenzstrahlungsmessinstrumenten nicht geklärt werden [5].

Im Vorfeld des für 1957/58 geplanten Internationalen Geophysikalischen Jahres (IGJ), in dem weltweite Strahlungsmessungen eine wichtige Rolle spielten, entschlossen sich die Strahlungskommissionen von IAMAP und CIMO/WMO auf einer gemeinsamen Tagung 1956 in Davos zum 01.01.1957 zur Einführung der Internationalen Pyrheliometerskala 1956 (IPS 1956). Sie definierten die IPS 1956 als Angström-Skala +1,5% bzw. Smithsonian-Skala -2,0%. Weiterhin wurde empfohlen, unmittelbar vor und nach dem IGJ Vergleiche zwischen den Referenzpyrheliometern der Nationalen Meteorologischen Dienste und Institute mit den Standards in Stockholm (Angström-Pyrheliometer) oder beim Smithsonian Institut in den USA durchzuführen.

Letztere Empfehlung führte dann 1959 zum 1. Internationalen Pyrheliometervergleich am Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos (PMOD). Dieser Pyrheliometervergleich wurde dann 1963 wiederholt. Seit 1970 finden nun alle fünf Jahre an diesem Observatorium, das seitdem auch als Weltstrahlungszentrum (WRC) der WMO fungiert, In-

ternationale Pyrheliometervergleiche statt. Sie bilden die Basis für weltweit homogene breitbandige Strahlungsmessungen im kurzwelligen Spektralbereich.

Ende der 60iger, Anfang der 70iger Jahre wurden an verschiedenen Einrichtungen neue Absolutradiometer entwickelt. Auch diese nutzen die Substitutionsmethode und Hohlraumempfänger aber auf wesentlich höherem Niveau. Umfangreiche Gerätevergleiche und Analysen führten schließlich zum 1.1.1981 zur Einführung der World Radiometric Reference (WRR), die durch die Weltstandardgruppe (WSG) verschiedener Absolutradiometer unterschiedlicher Bauweise [1]. Um auf das nun gültige Niveau der WRR zu kommen, mussten weltweit alle Strahlungsdaten der IPS 1956 noch einmal um 2,2% erhöht werden.

Im Jahre 2010 fand nunmehr schon der 11. Internationale Pyrheliometervergleich statt. Es zeigte sich, dass die WSG innerhalb der geforderten 0,3% stabil ist [6]. Ebenfalls sind die Abweichungen des WRR in Bezug auf SI < 0,3 %. Inzwischen ist das PMOD/WRC mit der



Abb. 2: Diverse Pyrheliometer mit der Gruppe der Referenzpyrheliometer beim Vergleich vor Sonne

Größe „solar irradiance“ in der „BIPM key comparison database“ vertreten.

Mittels der an den Meteorologischen Observatorien Potsdam, Hamburg und nunmehr Lindenberg vorhandenen Nationalen Referenzpyrheliometer waren die in Deutschland im Bereich der Meteorologie durchgeführten Strahlungsmessungen immer direkt auf die international gültigen Strahlungsskalen rückführbar. Bereits Vergleiche in den 30iger Jahren in Potsdam und Davos sowie die regelmäßige Teilnahme an den Internationalen Pyrheliometervergleichen seit 1959 ermöglichten dies.

Gegenwärtig wird die Rückführbarkeit über die Referenzpyrheliometergruppe, die aus den beiden

Absolutradiometern vom Typ PMO6 sowie dem Absolutradiometer vom Typ HF besteht, die bereits seit 1980 an den Vergleichen teilnahmen, gesichert.

3.2 Im kurzwelligen Spektralbereich

Pyrheliometer dienen im kurzwelligen, integralen Spektralbereich als Referenz zur Kalibrierung der Pyranometer. Die Empfindlichkeiten der (Referenz-)Pyranometer werden durch Vergleich mit einem Referenzpyrheliometer mittels der „Alternierenden Sonne- und Schattenmethode“ bestimmt. Das Verfahren dafür ist in der ISO 9846:1993 „Solar energy - Calibration of a pyranometer using a pyrheliometer“ [7] beschrieben.

Die im Messnetz des DWD eingesetzten Pyranometer zur Messung sowohl der Global- als auch der diffusen Sonnenstrahlung werden den Regeln entsprechend am Meteorologisches Observatorium Lindenberg (MOL), das sowohl als Nationales als auch als Regionales Strahlungszentrum der WMO der Regional Assoziation VI (Europa) fungiert, kalibriert.

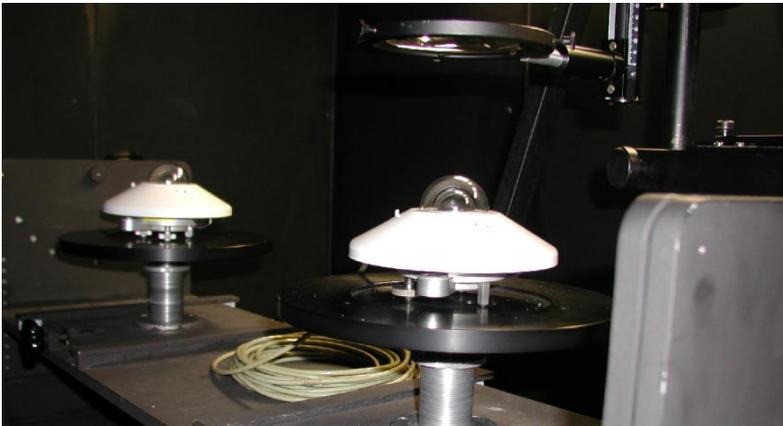


Abb. 3: Pyranometer bei der Kalibrierung nach ISO 9847 im Labor des MOL

Diese Kalibrierung wird jedoch nach der ISO 9847:1992 “Solar energy - Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer” [8] im Labor durchgeführt, um unabhängig von ungünstiger Witterung zu sein.

3.3 Im langwelligen Spektralbereich

Während es für den kurzwelligen Spektralbereich seit Jahrzehnten erprobte und bewährte Verfahren der Kalibrierung gibt, steht man im langwelligen Bereich für die Kalibrierung der Pyrgeometer noch am Anfang. Grundlage für diese Kalibrierungen sind die Vergleiche mit einem schwarzen Körper. Dabei kommt der exakten Bestimmung der Strahlungstemperatur des schwarzen Körpers größte Bedeutung zu, denn die Ermittlung der Pyrgeometerempfindlichkeit erfolgt auf der Grundlage des Stefan-Boltzmannschen-Gesetzes. Über die Temperatur ist die Rückführbarkeit auf das SI-System gewährleistet.

Da sich das von einem schwarzen Körper erzeugte Strahlungsspektrum, das auch mit Temperaturen, wie sie in der Atmosphäre üblich sind, betrieben wird, vom realen atmosphärischen Spektrum im Bereich von 3 bis 50 μm auf Grund fehlender Absorptionslinien und -banden unterscheidet, geht man gegenwärtig folgenden Weg: Am Physikalisch-

Meteorologischen Observatorium Davos/Weltstrahlungszentrum (PMOD/WRC) wurde ein Satz verschiedener Pyrgeometer mit einem schwarzen Körper kalibriert, die als Referenzgruppe dienen. Die Empfindlichkeit weiterer zu kalibrierender Pyrgeometer wird nun durch Vergleich mit dieser Referenzgruppe bei Dunkelheit und wolkenlosem Himmel bestimmt.

Für den DWD wurden am PMOD/WRC zwei Gruppen kalibriert, die nun in Lindenberg als Referenz für weitere Kalibrierungen dienen. An diese werden die im Netz des DWD einge-



Abb. 4: Pyrgeometerreferenzgruppe auf dem Dach der Strahlungsmesszentrale des MOL

setzten Pyrgeometer durch Vergleich bei Dunkelheit angeschlossen. Erfahrungen und Vergleiche mit Modellrechnungen zeigen, dass dies gegenwärtig ein gangbarer Weg ist. Die Entwicklung eines „Absolutpyrgeometers“ ist aber dringend erforderlich, um einen, dem kurzwelligen Spektralbereich, vergleichbaren Stand zu erreichen.

4 Das Strahlungsmessnetz

4.1 Vom Beginn bis zum Entstehen eines Messnetzes

Mit systematischen, breitbandigen Strahlungsmessungen wurde bereits im Jahre 1907 am Meteorologischen Observatorium Potsdam begonnen. Hierbei handelte es sich aber um Einzelmessungen der direkten Sonnenstrahlung mit dem Angström-Pyrheliometer [9]. Später wurden diese Messungen mit dem Bimetall-Aktinometer nach Michelson-Marten und dem Panzeraktinometer (Aktinometer nach Linke-Feußner) fortgesetzt. Aus diesen Daten erarbeitete Marten erste Klimatologien [10].

Wiederum am Meteorologischen Observatorium Potsdam wurde am 1. Januar 1937 mit der Registrierung der Global (G) - und diffusen (D) Sonnenstrahlung begonnen, die bis heute fortgesetzt werden.

Als Strahlungsempfänger wurden damals Pyranometer von Kipp & Zonen mit Mollscher Thermosäule eingesetzt, wobei das eine Gerät mit einem Schattenring ausgerüstet war, so dass die diffuse Sonnenstrahlung erfasst werden konnte. Die Daten wurden mit Fallbügelpunktschreibern aufgezeichnet.



Abb. 5: Pyranometer zur Messung der Global- und diffusen Sonnenstrahlung auf dem kleinen Turm des Meteorologischen Observatoriums Potsdam um 1937

Parallel dazu wurde die bereits 1929 begonnene Registrierung der direkten (I) Sonnenstrahlung mit einem Pyrhe-liometer, das ebenfalls eine Mollsche Thermosäule hatte, fortgesetzt.

Damit verfügte das Potsdamer Obser-vatorium über eine ausgezeichnete Basis für solide Strahlungsregistrie-rungen, konnte doch wegen der ge-trennten und unabhängigen Registrie-rung der direkten (I – normal einfal-lende Strahlung) und der diffusen (D) Sonnenstrahlung sowie der Glo-balstrahlung (G) als Summe aus bei-

den Größen eine ständige Kontrolle mittels der Beziehung

$$G = I \sin(h) + D,$$

wobei $\sin(h)$ der Sinus der Sonnenhöhen bedeutet, durchgeführt werden. Diese Messun-gen weisen auch während der Zeit des Zweiten Weltkrieges und danach nur kurzzeitige Unterbrechungen auf, so dass heute eine langjährige Reihe von Stundensummen vorliegt.

4.2 Das Strahlungsmessnetz von 1949 bis 2004

Das Strahlungsmessnetz entwickelte sich auf Grund der Bedeutung der Strahlung und der technischen Rahmenbedingungen in mehreren Etappen. Zunächst wurde bereits 1949 am neuen Meteorologischen Observatorium Hamburg mit der Registrierung der Globalstrah-lung begonnen. In den Jahren 1950 und 1952 folgten dann die Meteorologischen Obser-vatorien Wahnsdorf (b. Dresden) und Hohenpeißenberg. Diese Strahlungsmessungen wurden aber nicht im Sinne eines Netzes betrieben, sondern dienten der Erfassung einer

wichtigen, lokalen klimatologischen Basisgröße, die für vielfältige weitere Untersuchungen benötigt wurde.

Ein entscheidender Impuls zur weiteren Entwicklung der Strahlungsmessungen weltweit als auch in Deutschland ging von der Planung und Durchführung des Internationalen Geophysikalischen Jahres (IGJ) 1957/58 aus, bei dem ein wesentliches Ziel darin bestand, Strahlungsmessungen für das Studium der Umwandlung von Energie im System Erde-Atmosphäre und seiner Änderungen in Raum und Zeit bereitzustellen. Gleichzeitig sollten die Daten auch für die Nutzung in anderen Wissenschaften wie Biologie, Medizin, Landwirtschaft zur Verfügung stehen.

Ab 1964 wurden dann auf Beschluss der WMO die Strahlungsdaten weltweit gesammelt und am Weltstrahlungsdatenzentrum (WRDC) in St. Petersburg (Leningrad) gespeichert.

In Deutschland entstanden im Zusammenhang mit dem IGJ sechs weitere Strahlungsmessstationen. Als Strahlungsempfänger dienten weiterhin die bewährten Pyranometer. Auch im Bereich der Mess- und Registriertechnik gab es keine entscheidenden Entwicklungen, so dass mit Bewährtem die Messungen fortgesetzt wurden.



Abb.6: Strahlungsmessungen an der Wetterstation List auf Sylt um 1990. mit den beiden Pyranometern für die Global- und diffuse Sonnenstrahlung sowie dem Campbell-Stokes und dem SONie zur Sonnenscheindauermessung (vorn rechts)

Erst ab Anfang der 70iger Jahre wurde das Strahlungsmessnetz im Bereich des DWD wieder erweitert. Bis Ende 1979 kamen rund 10 Stationen hinzu, wobei zu bemerken ist, dass neue Registriertechnik in Form von elektronischen Integratoren eingeführt wurde. Damit fiel die aufwendige und bisweilen fehlerhafte Auswertung der Registrierstreifen weg. Gleichzeitig wurden einige Stationen mit einem weiteren Pyranometer sowie einem Schattenring ausgerüstet, so dass auch die diffuse Sonnenstrahlung gemessen werden konnte. Am 31.12.1979 wurde an 22 Stationen die Globalstrahlung und an 15 davon auch die diffuse Sonnenstrahlung registriert.

Durch den Einzug der elektronischen Rechentechnik in den 70iger Jahren wurde die aufwendige manuelle Datenprüfung durch die maschinelle ersetzt, wodurch der gesamte Prozess optimiert werden konnte.

Im Jahre 1981 wurde im MD der DDR an den Wetterstationen die Automatische Fernmeldende Meteorologische Station (AFMS) eingeführt. Damit verbunden war die Aufstellung von Pyranometern nach Sonntag inklusive eines Schattenrings zur Messung der Global- und diffusen Sonnenstrahlung an 12 weiteren Stationen. Die Daten dieser Stationen wurden zusammen mit den Wettermeldungen über Fernschreibleitungen zum Rechenzentrum nach Potsdam übertragen und dort zentral ausgewertet. Geprüfte Stundensummen lagen dann als Endergebnis vor.

In den 80iger Jahren wurde dann auch das Strahlungsmessnetz des DWD noch einmal erweitert und modernisiert. Schreiber bzw. Integratoren wurden durch die Messwerterfassungs- und Speichereinheit (MEISE) einem stand-alone-System ersetzt. Die MEISE der ersten Generation bestand aus einem Verstärker, einem AD-Wandler und einem C64-Computer mit Diskettenlaufwerk und Drucker. Die Schreiber waren als Ausfallsicherung in das MEISE-Konzept integriert. Die alten CM5-Pyranometer wurden durch moderne CM11 von Kipp & Zonen ersetzt. Weiterhin kam eine am Meteorologischen Observatorium Hamburg (MOH) entwickelte Belüftungseinheit mit Heizung zur Vermeidung von Tau- oder Reifansatz zum Einsatz. Die Disketten wurden nach Monatsabschluss von den Stationen zum MOH geschickt und dort ebenfalls zentral ausgewertet. Auch am Ende dieser Datenkette standen geprüfte Stundensummen.

Ende 1990 nach der Vereinigung wurde mit 43 Globalstrahlungsmessstationen die größte Dichte erreicht. Danach wurde das Messnetz schrittweise optimiert, wodurch sich auch die Anzahl der Strahlungsmessstationen verringerte. Parallel dazu wurden die Pyranometer in den alten Bundesländern ebenfalls an die automatischen Datenerfassungsanlagen der Wetterstationen angeschlossen und somit konnten diese Strahlungsdaten auch gleich im Zentralrechner gespeichert werden. Ebenfalls wurden schrittweise die Pyranometer nach Sonntag durch Kipp & Zonen-Geräte ersetzt. Durch die verschiedenen Modernisierungsmaßnahmen im Laufe der 90iger Jahre war es auch möglich, die zeitliche Auflösung von 1-Min-Werten zu erreichen.

4.3 Das Strahlungsmessnetz von 2005 bis heute

Im Laufe der Zeit wurde das gesamte Messnetz des DWD weiter optimiert und das Strahlungsmessnetz in das Bodenmessnetz integriert. Dazu zählte auch die generelle Umstellung auf das moderne, einheitliche Datenerfassungssystem AMDA im gesamten DWD mit zentraler Speicherung und Datenprüfung. Die Abtastung der Pyranometer erfolgt mit der Frequenz von 1 Hz. Ein-Min-Mittel bilden die Grundlage für die weiteren Auswertungen. Das Basisstrahlungsmessnetz besteht heute aus 26 Stationen, die die Global- und die diffuse Sonnenstrahlung mit Pyranometern vom Typ CM11 bzw. CM21 messen. Diese Stationen sind mit Personal besetzt, wodurch die Pflege und Wartung der Pyranometer sowie das notwendige, in den Übergangsjahreszeiten tägliche, Verstellen des Schattenrings gesichert wird.

Auf Grund der gestiegenen Anforderungen, insbesondere aus der Energie- und Solarwirtschaft, ist die Dichte des Basisstrahlungsmessnetzes nicht ausreichend. Dementsprechend wurde an rund 100 weiteren Stationen ein Ergänzungsstrahlungsmessnetz eingerichtet. Diese Stationen, zum Teil auch unbemannt, sind mit dem SCAPP, dem Scanning Pyranometer Pyrheliometer, ausgerüstet. Das preiswertere SCAPP liefert ebenfalls Daten der Global- und diffusen Sonnenstrahlung sowie der Sonnenscheindauer aber mit größerer Messunsicherheit.

4.4 Die BSRN-Station

Untersuchungen in den 80iger Jahre zeigten, dass die weltweit im „normalen“ Messnetz gewonnenen Strahlungsdaten den Anforderungen der modernen Strahlungsforschung, insbesondere hinsichtlich der geforderten Messunsicherheit für die Klimaforschung, nicht mehr genügten. Deshalb wurde im Rahmen des Weltklimaforschungsprogramms (WCRP) das Baseline Surface Radiation Network (BSRN) zur hochgenauen Erfassung der Bestrahlungsstärke an der Erdoberfläche etabliert [11]. Drei Ziele werden dabei verfolgt:

- die Bereitstellung bodengebundener Bestrahlungsstärken für die Validierung von Satellitendaten zur Bestimmung des Strahlungshaushalts am Erdboden und des Strahlungstransports durch die Atmosphäre
- die Bereitstellung bodengebundener Bestrahlungsstärken für die Validierung und die Verbesserung des Strahlungscode in Klimamodellen

- die Überwachung von Langzeitänderungen der Bestrahlungsstärke an der Erdoberfläche

Anfang der 90iger Jahre wurde mit den Messungen an den ersten Stationen begonnen, wobei der Schwerpunkt auf die präzise Erfassung der kurzwelligen direkten und diffusen Sonnenstrahlung sowie der Globalstrahlung und der langwelligen Wärmestrahlung der Atmosphäre liegt. Diese Messungen werden untermauert durch die notwendige Bereitstellung weiterer wichtiger Größen wie die Vertikalverteilung von Lufttemperatur und –feuchte, des Gesamtzongehalts, Wolkenhöhen, des Bedeckungsgrades u. a. m. Der DWD ist mit der Einrichtung der BSRN-Station Lindenberg am Observatorium seit 01.10.1994 an diesem Programm beteiligt.



Gegenwärtig sind weltweit rund 50 Stationen an diesem Programm beteiligt, wobei von deutscher Seite neben Lindenberg die vom Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung betreuten Stationen Ny-Alesund auf Spitzbergen und Georg v. Neumayer in der Antarktis Daten liefern.

Abb. 7: Dach der Strahlungsmesszentrale des MOL mit den Geräten der BSRN-Station

5 Zusammenfassung

Der Deutsche Wetterdienst betreibt ein umfangreiches Strahlungsmessnetz zur Erfassung der kurz- und langwelligen Strahlungsströme aus dem oberen Halbraum. Im Laufe der Jahrzehnte wurde dieses Netz immer wieder optimiert und dem technischen Entwicklungsstand angepasst., so dass die Erfordernisse von Meteorologie und Klimatologie, der angewandten Wissenschaften und von externen Kunden erfüllt werden können.

Die regelmäßige Kalibrierung der Messgeräte garantiert die Rückführbarkeit auf internationale Standards und damit auch die weltweite Vergleichbarkeit der gewonnenen Daten.

Literatur

- [1] Fröhlich, C. und London, J., Revised Instruction Manual on Radiation Instruments and Measurements, WCRP Publication series No. 7, WMO/TD-No. 149 (1986)
- [2] Angström, K., Über absolute Bestimmungen der Wärmestrahlung mit dem elektrischen Kompensationspyrheliometer nebst einigen Beispielen der Anwendung dieses Instrumentes. Ann. d. Phys. u. Chem. 67 (1899), 633-648
- [3] Abbot, C. G., Fowle, F. E., Apparatus for "solar-constant" determinations. Ann. Astrophys. Obs. Smithsonian Inst. 2 (1908), 21-49.
- [4] Abbot, C. G. und Aldrich, L. B., Smithsonian pyrheliometry revised. Smithsonian miscel. coll. 60 (1913) Nr. 18
- [5] Foitzik, L. und Hinzpeter, H., Sonnenstrahlung und Luftrübung. Akadem. Verlagsges. Leipzig, 1958, 309 S.
- [6] Finsterle, W., WMO International Pyrheliometer Comparison IPC-XI, 27 September - 15 October 2010, Davos, Switzerland - Final Report, WMO IOM Report No. 108, 2011
- [7] ISO 9846:1993 „Solar energy - Calibration of a pyranometer using a pyrheliometer“ First Edition 1993-12-01 ISO 9846:1993 (E)
- [8] ISO 9847:1992 “Solar energy - Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer” First Edition 1992-07-01 ISO 9847:1992 (E)
- [9] Marten, W., Messungen der Sonnenstrahlung auf dem Meteorologischen Observatorium bei Potsdam. Veröffentl. d. Königl. Preuß. Met. Inst. Nr. 213 (1909), XXIII-XXXVI.
- [10] Marten, W., Das Strahlungsklima von Potsdam. Veröffentl. d. Preuß. Met. Inst. 8 (1926), Nr. 4
- [11] Ohmura, A. et al., Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WCRP): New Precision Radiometry for Climate Research. Bull. Am. Meteor. Soc., Vol. 79, 1998, 2115-2136.

Leben hinter Glas

Zusammenhang von Lichtmangelerscheinungen und dem Aufenthalt in Innenräumen

Renate Hammer, Peter Holzer

Department für Bauen und Umwelt, Donau-Universität Krems,

Dr. Karl-Dorrek-Straße 30, A-3500 Krems

1 Einleitung

Legt man evolutionäre Entwicklungszeiträume zugrunde, ist der Mensch an ein Leben im Außenraum angepasst. Eine Ausprägung dieser Anpassung besteht in der Abstimmung vielfältiger physiologischer Abläufe auf das terrestrische Globalstrahlungsangebot. Nicht zuletzt auf Grund ständig verbesserten Komforts steigt unsere Aufenthaltszeit im Innenraum jedoch stetig an - man könnte sagen, „wir sind in den Innenraum übersiedelt“.

Die Betrachtung von Qualität und Quantität des solaren Strahlungsangebots in Innenräumen erscheint daher für die Physiologie des Menschen relevant. Es kann vorweggenommen werden, dass das innenräumliche Strahlungsangebot nach Durchgang durch die transparenten Elemente der Gebäudehülle vergleichsweise stark reduziert und in manchen Spektralbereichen nicht mehr vorhanden ist. Ein Bewusstsein für die sich daraus ergebenden Probleme ist unter Gebäudeplanern kaum gegeben. Das Lichtangebot wird durchaus ausreichend empfunden, Strahlungsmängel im nicht visuellen Bereich werden nicht bewusst und folglich in der Architekturgestaltung kaum thematisiert. Folglich fehlen auch entsprechende Entwurfsgrundlagen und Planungstools.

2 Angebot globaler Solarstrahlung im Innenraum

Als Ausgangsbasis für die Ermittlung des Sonnenstrahlungsangebots im Innenraum ist zunächst die spektrale Bestrahlungsintensität der extraterrestrischen Strahlung zu definieren. Dafür wurde auf die spektrale extraterrestrische Sonnenstrahlung nach Christian A. Gueymard zurückgegriffen, die den Wellenlängenbereich von 0,5 nm bis 1.000 μm abbildet und zu einer Solarkonstante von 1.366,1 W/m^2 integriert. [1] Durch spektrale Faltung der extraterrestrischen Sonnenstrahlung mit dem Strahlungsdurchgang durch die Atmosphäre wird die terrestrische solare Bestrahlungsstärke in ihrer spektralen Verteilung auf senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messflächen ermittelt. Mit der vertikalen Orientierung wird die

Physiologie des aufrecht stehenden Menschen abgebildet. Durch die einachsige Nachführung nach dem Sonnenazimut wird der Zielsetzung der Ermittlung des unter realistischen Bedingungen maximal vorliegenden Potenzials entsprochen. Die Extinktion der Sonnenstrahlung bei ihrem Durchgang durch die Erdatmosphäre wird unter Verwendung eines evaluierten parametrisierten Modells zur Abbildung komplexer strahlungsphysikalischer Vorgänge spektral nachvollzogen.

Nun kann der Strahlungsdurchgang der determinierten terrestrischen Strahlung durch ausgewählte technische Funktionsglasscheiben abgebildet und derart das innenräumliche Sonnenstrahlungsangebot eruiert werden.

2.1 Spektrale Transparenz von Funktionsglasscheiben für Gebäude

Für Bauanwendungen ist Kalknatronglas heute der praktisch ausschließlich eingesetzte Werkstoff, da es sich durch gute Lichtdurchlässigkeit, gute Verarbeitbarkeit und eine porenfreie Oberfläche bei gleichzeitig kostengünstiger Herstellbarkeit auszeichnet. Jedoch ist Kalknatronglas im UV-A-Spektralbereich nur gering transparent und ab dem UV-B-Spektralbereich praktisch intransparent, mit Grenzwellenlängen von $\lambda_g = 345$ nm und $\lambda_0 = 325$ nm bei 6 mm Glasdicke.

Zur gezielten Veränderung spezifischer physikalischer Eigenschaften wird für Bauanwendungen das Ausgangsmaterial Glas zu technischen Funktionsglasscheiben weiterverarbeitet und veredelt. Drei grundsätzlich unterschiedliche Einzelmaßnahmen kommen dabei singulär oder in Kombinationen zur Anwendung: Erstens das additive Verbinden zweier oder mehrerer Glasscheiben oft unter Bildung eines Scheibenzwischenraums zu einer luftdicht verschlossenen funktionalen Einheit. Zweitens das Aufbringen von Beschichtungen aus dünnen und daher weitestgehend transparenten Metalllagen, insbesondere aus Silber, Gold oder Aluminium an einer oder mehreren Glasoberflächen der Scheibenkombinationen und drittens die Füllung der Scheibenzwischenräume mit Edelgasen. In der Mehrzahl dienen die genannten Maßnahmen der Verbesserung der Wärmedämmung und/oder des Sonnenschutzes, wobei neben den diesbezüglichen Eigenschaften auch der Erhalt einer möglichst hohen Lichttransmission ein Qualitätskriterium darstellt. Vor diesem Hintergrund wurden eine Referenzglasscheibe und drei technische Funktionsglasscheiben ausgewählt. Alle vier beschriebenen Verglasungen sind identisch im Softwarepaket Calumen abgebildet worden. [2]

Einscheibenglas, 6, unbeschichtet, Referenzglasscheibe

Zugrunde gelegt wurden die Daten des Produkts PLANILUX 6 mm von Saint-Gobain Glass. In der International Glazing Database ist dieses Produkt mit der ID 11839 dokumentiert.

Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, 6-16A-6

Diese technische Funktionsglasscheibe ist aufgebaut aus zwei Glasscheiben PLANILUX 6 mm von Saint-Gobain Glass, aus der Beschichtung PLANITHERM ULTRA N, ebenfalls von Saint-Gobain Glass, auf Ebene 2 und aus einem Scheibenzwischenraum von 16 mm mit 90% Argon-Füllung. In der International Glazing Database ist die Kombination mit ID 11040 dokumentiert.

Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung, 6-12A-6-12A-6

Der Aufbau dieser technischen Funktionsglasscheibe zeigt zwei Glasscheiben PLANILUX 6 mm von Saint-Gobain Glass, die Beschichtung PLANITHERM ULTRA N, ebenfalls von Saint-Gobain Glass, auf Ebene 2 und einen Scheibenzwischenraum von 16 mm mit 90% Argon-Füllung. Diese Kombination ist in der International Glazing Database mit ID 11040 dokumentiert.

Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung, 6-16A-6

Diese technische Funktionsglasscheibe wurde zusammengestellt aus zwei Glasscheiben PLANILUX 6 mm von Saint-Gobain Glass, aus der Beschichtung COOL-LITE 154 SKN, ebenfalls von Saint-Gobain Glass, auf Ebene 2 und aus einem Scheibenzwischenraum von 16 mm mit 90% Argon-Füllung. Diese Kombination wird in der International Glazing Database mit ID 11036 angeführt.

2.2 Physiologisch bewertetes Strahlungsangebot

Dem Prinzip einer Potenzialstudie folgend wird festgelegt, sämtliche Berechnungen unter der Randbedingung eines wolkenlosen Himmels durchzuführen. Als Referenzzeitpunkte im Jahr werden der jeweils 15. Tag in den Monaten März, Juni, September und Dezember festgelegt. Als Referenzzeitpunkt im Tagesgang wird 12:00 mittags festgelegt. Ausgehend von der Tageszeit abhängigen photophysiologischen Sensitivität des Menschen werden ergänzend auch die Zeitpunkte 07:00 und 17:00 untersucht.[3][4][5][6] Als Referenzort wurde Wien ausgewählt. Das Sonnenstrahlungsangebot im Innenraum wird mit definierten Wirkungs-Kurven gefaltet und so das vorliegende Wirkpotential nach dem Lichtdurchtritt durch eine

Funktionsglasscheibe ermittelt. Dieses Wirkpotential im Innenraum wird mit dem entsprechenden Wirkpotentials des Außenraums verglichen.

Exemplarisch werden photophysiologische und photopathologische Wirkungen der terrestrischen Solarstrahlung ausgewählt, die von hoher allgemeiner Relevanz sind und für die spektral aufgelöste Wirkungs-Kurven sowie Dosis-Wirkungsbeziehungen oder Schwell- beziehungsweise Grenzwerte zur Erreichung einer Wirksamkeit definiert sind.

Im Spektralbereich der UV-Strahlung werden die Wirkung der Erythembildung und die Wirkung der Pre-Vitamin D₃ Photosynthese untersucht. Beide Wirkungen sind von hoher Relevanz und machen in ihrer Gegensätzlichkeit – die Erythembildung als Reaktion auf Belastung und die Pre-Vitamin D₃ Photosynthese als für die Aufrechterhaltung zentraler physiologischer Abläufe unabdingbare Hormonproduktion – die Bedeutung einer differenzierten Auseinandersetzung mit dem Thema der physiologisch determinierten Solarstrahlungsversorgung in Innenräumen deutlich.

Aus dem sichtbaren Spektralbereich werden die Wirkung der Helligkeitsempfindung unter den Bedingungen des photopischen Sehens und die Wirkung der Melatonin Suppression zur weiteren Bearbeitung ausgewählt. Jene der photopischen Helligkeitsempfindung, weil die Qualitäten Helligkeit und spektrale Ausgewogenheit die Grundlage zur Erreichung visueller Ergonomie darstellen und weil sie die Anschaulichkeit für die Gebäudeplaner erhöht. Eine Behandlung erscheint daher sinnvoll, auch wenn der Bezug zur Gesundheit des Menschen nur mittelbar vorliegt. Die Wirkung der Melatonin Suppression wurde ausgewählt, weil sie die derzeit einzige nicht visuelle Wirkung im sichtbaren Spektralbereich darstellt, die mittelbar aber doch eindeutig auf die Reaktivität des Chromophors Melanopsin in den mcGanglienzellen der Retina zurückgeht.

Aus der spektralen Bestrahlungsstärke unmittelbar hinter den Funktionsglasscheiben wird durch spektrale Faltung mit den vier ausgewählten Wirkungs-Kurven die photobiologisch wirksame Bestrahlungsstärke beziehungsweise, im Fall des photopischen Helligkeitsempfindens, die Beleuchtungsstärke ermittelt. Die photobiologisch wirksamen Bestrahlungsstärken liegen als momentane Leistungsdichten vor, die darüber hinaus auch als stündliche Energiemengen und somit als Strahlungsdosen dargestellt und derart als photobiologische Wirkpotentiale bezeichnet werden. Diese Wirkpotentiale stellen unter den beschriebenen

Randbedingungen das mögliche Maximalangebot photobiologisch wirksamer Sonnenstrahlung im Innenraum dar.

Die Ergebnisse der vier untersuchten photobiologischen Wirkpotentiale, photopischer Helligkeitseindruck, Erythembildung, Pre-Vitamin D₃ Photosynthese und Melatonin Suppression, werden numerisch und grafisch dargestellt. Die Darstellung der Berechnungsergebnisse erfolgt immer nach demselben Schema und wird exemplarisch anhand des photopischen Helligkeitseindrucks skizziert. Grundsätzlich wird innerhalb der jeweiligen Wirkpotentiale, nach dem Referenztag innerhalb des Jahres und nach der Uhrzeit innerhalb des Referenztages gegliedert.

2.2.1 Ergebnisse photopischer Helligkeitseindruck

Das photophysiologische Wirkpotential der Beleuchtungsstärke ist der durch visuelle Rezeption hervorgerufene Helligkeitseindruck, der eine direkte Folge der Beleuchtungsstärke ist. In den nachfolgenden Auswertungen wird stets die Beleuchtungsstärke in der Einheit lx beziehungsweise damit identisch lm/m², bezogen auf die vertikale einachsig nachgeführte Messebene, ermittelt.

Als Wirkungs-Kurve zur Ermittlung der Beleuchtungsstärke wurde die spektrale Bestrahlungsstärke hinter den Verglasungen gefaltet mit der $v(\lambda)$ -Kurve für photopisches Sehen, mit ihrem Maximum der Empfindlichkeit bei 555 nm und der festgelegten Empfindlichkeit für monochromatisches Licht dieser Wellenlänge in der Größe der photometrischen Konstante von 683 lm/W.[7] Aufgrund der werkstoffimmanenten Eigenschaft der hohen Transparenz im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts sind erwartungsgemäß die Beleuchtungsstärken unter den Referenzbedingungen signifikant hoch.

In der folgenden Tabelle (Tabelle 1) sind die Beleuchtungsstärken in lx zu den zehn Referenzzeitpunkten am 15. März um 07:00, um 12:00 und um 17:00, am 15. Juni um 07:00, um 12:00 und um 17:00, am 15. September um 07:00, um 12:00 und um 17:00, sowie am 15. Dezember lediglich um 12:00, da in diesem Monat die Sonne um 7:00 und um 17:00 noch nicht aufgegangen beziehungsweise bereits untergegangen ist, auf eine senkrechte nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zusammengefasst.

In der ersten Ergebnisspalte sind die Beleuchtungsstärken außen, also unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe angegeben. In den nachfolgenden Ergebnisspalten sind die ermittelten Beleuchtungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-

Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung zum unmittelbaren Vergleich in Absolutwerten angeführt.

	außen lx	hinter clear float lx	hinter 2-WSG lx	hinter 3-WSG lx	hinter 2-SSG lx
März, 07:00	26.297	23.228	20.322	17.812	12.930
März, 12:00	81.093	70.297	59.105	50.242	37.824
März, 17:00	26.297	23.228	20.322	17.812	12.930
Juni, 07:00	75.765	66.334	57.542	49.481	36.790
Juni, 12:00	59.364	43.597	31.320	22.252	20.069
Juni, 17:00	75.765	66.334	57.542	49.481	36.790
September, 07:00	48.434	42.796	37.459	32.846	23.866
September, 12:00	81.165	69.645	57.905	48.084	37.066
September, 17:00	48.436	42.798	37.460	32.847	23.867
Dezember, 12:00	70.443	62.277	54.005	47.387	34.485

Tabelle 1: Beleuchtungsstärken zu den Referenzzeitpunkten

Das Säulendiagramm (Diagramm 1) im Anschluss zeigt die Beleuchtungsstärken in lx auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. Juni. Die erste Säule bildet die Beleuchtungsstärken außen, unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheibe ab. Die jeweils vier anschließenden Säulen zeigen die ermittelten Beleuchtungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung.

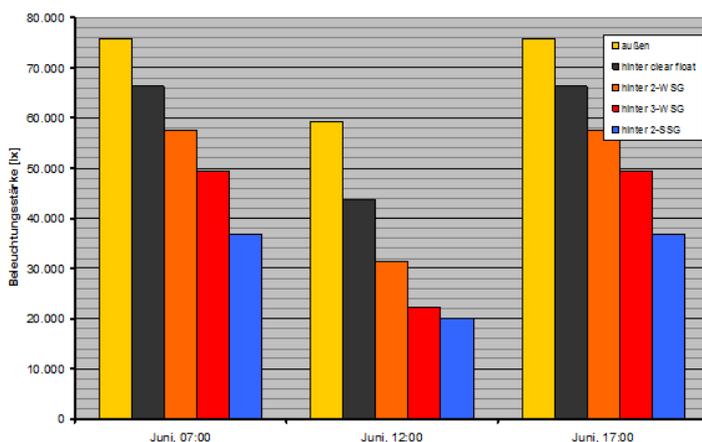


Diagramm 1: Beleuchtungsstärke zu den Referenzzeitpunkten des 15. Juni

Die drei nachfolgend abgebildeten Liniendiagramme (Diagramm 2, 3 und 4) zeigen die spektral verteilten Beleuchtungsstärken in lx/nm auf eine vertikal sonnennachgeführte

Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. Juni. Die Linie der Beleuchtungsstärke außen gibt jene Werte an, die unmittelbar vor dem Durchgang durch die Funktionsglasscheiben ermittelt wurden. Die weiteren vier abgebildeten Linien stellen die Beleuchtungsstärken unmittelbar nach dem Durchgang durch eine unbeschichtete Einscheiben-Verglasung, eine Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung, eine Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und eine Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung dar.

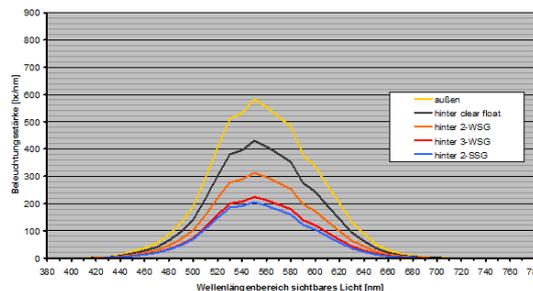
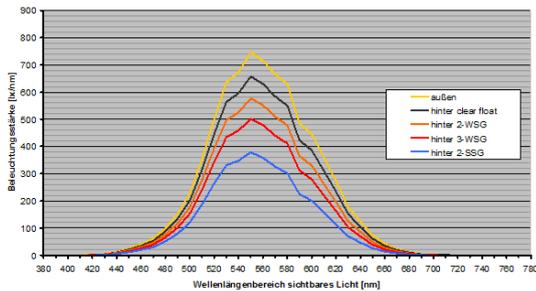


Diagramm 2: Spektrale Beleuchtungsstärke am 15. Juni um 07:00

Diagramm 3: Spektrale Beleuchtungsstärke am 15. Juni um 12:00

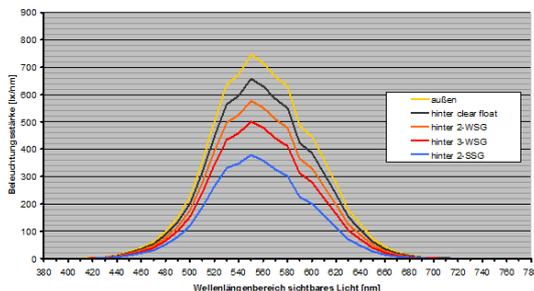


Diagramm 4: Spektrale Beleuchtungsstärke am 15. Juni um 17:00

2.2.2 Ergebnisse Erythembildung

Als Erythem wird eine mit bloßem Auge erkennbare Hautrötung bezeichnet. Untersucht wird das durch ultraviolette Strahlung hervorgerufene Erythem. Die Erythembildung ist proportional zur Strahlungsdosis und nicht zur Strahlungsintensität. Als Wirkpotential wird demnach die erythemale Dosis als die physiologisch bewertete Strahlungsdosis in J/m^2 exponierter Hautoberfläche angegeben. Im nachfolgenden Säulendiagramm wird diese als stündliche Strahlungsdosis ausgewiesen. Im Liniendiagramm wird aber in Konsistenz mit den Diagrammen zu allen anderen Wirkpotentialen die Darstellung der photophysologisch, in diesem Fall erythemal, bewerteten Strahlungsdichte in W/m^2 beibehalten.

Für die Erythembildung im ultravioletten Spektralbereich liegt eine anerkannte Wirkungs-Kurve vor.[8] Sie ist beschrieben ab einer Wellenlänge von 250 nm und ist charakterisiert durch ein plateauförmiges Maximum der Empfindlichkeit für ansteigende Wellenlängen bis 295 nm gefolgt von einem steilen Abfall mit steigender Wellenlänge. So beträgt die erythemale Empfindlichkeit an der Grenze zum Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts bereits weniger als ein Promille ihres Maximums.

Für die Erythembildung im ultravioletten Spektralbereich existiert ein Subjekt bezogener Schwellwert, die minimale Erythemdosis, abgekürzt mit MED. Sie ist definiert als jene minimale physiologisch bewertete Strahlendosis in mJ/cm^2 oder J/m^2 , die ein scharf abgrenzbares, gerade noch erkennbares Erythem mit einer Mindestfläche von 1 cm^2 hervorruft.[9] Die Empfindlichkeit gegenüber UV-Strahlung und damit die MED sind stark vom Individuum abhängig, wobei Individuengruppen mit ähnlicher Empfindlichkeit zu Hauttypen zusammengefasst werden. Um eine quantitative Abschätzung möglich zu machen, wurde für den Hauttyp II eine standardisierte gewichtete MED von $250 \text{ J}/\text{m}^2$ festgelegt.[10] Diese standardisierte MED dient einer grundlegenden Risikoeinschätzung und wurde in der gegenständlichen Arbeit als Schwellwert herangezogen. Eine Applikation von etwa 4 MED führt beim Hauttyp II zur Ausbildung von Sonnenbrand ohne Blasenbildung.[11]

Unter den angenommenen Randbedingungen kommt es im Außenraum zur Mittagszeit des 15. Juni und 15. September mit $370 \text{ J}/\text{m}^2$ beziehungsweise $325 \text{ J}/\text{m}^2$ stündlicher erythemaler Dosis bereits in weniger als einer Stunde zur Überschreitung der MED, in der Mittagsstunde des März wird mit $190 \text{ J}/\text{m}^2$ ein Wert von etwa einer $\frac{3}{4}$ MED erreicht. Hinter einer Funktionsglasscheibe sinkt aufgrund derer stark eingeschränkter Durchlässigkeit für ultraviolette Strahlung die erreichbare erythemale Dosis drastisch ab. Relativ zu jener im Außenraum beträgt sie hinter dem unbeschichteten Einscheibenglas etwa 26%, hinter der Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung etwa 13%, hinter der Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung etwa 8% und hinter der Zweischeiben-Sonnenschutzverglasung etwa 4%. Hinter technischen Funktionsgläsern ist demnach die Gefahr der Erythembildung aber auch die Chance auf eine Adaption der Haut verschwindend gering.

In der folgenden Tabelle (Tabelle 2) sind die stündlichen erythemalen Dosen in J/m^2 zu den Referenzzeitpunkten nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zusammengefasst.

	außen J/m ²	hinter clear float J/m ²	hinter 2-WSG J/m ²	hinter 3-WSG J/m ²	hinter 2-SSG J/m ²
März, 07:00	8	3	2	1	1
März, 12:00	190	31	15	10	5
März, 17:00	8	3	2	1	1
Juni, 07:00	96	22	11	7	4
Juni, 12:00	370	33	16	10	5
Juni, 17:00	96	22	11	7	4
September, 07:00	21	7	4	2	1
September, 12:00	325	36	18	11	6
September, 17:00	21	7	4	2	1
Dezember, 12:00	54	16	8	5	3

Tabelle 2: Stündliche erythemale Dosis zu den Referenzzeitpunkten

Das Säulendiagramm (Diagramm 5) im Anschluss zeigt die stündlichen erythemalen Strahlungsdosen in J/m² auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. Juni. Mit einer strichlierten, horizontalen Linie gekennzeichnet ist der erläuterte Grenzwert der minimalen Erythemdosis MED von 250 J/m².

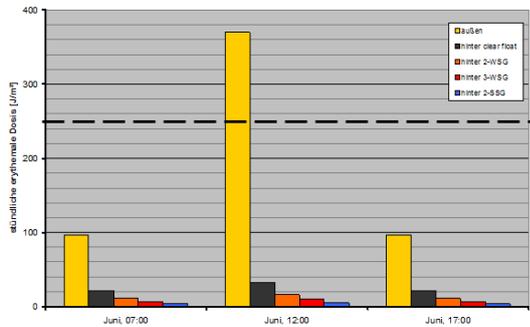


Diagramm 5: Stündliche erythemale Dosis zu den Referenzzeitpunkten des 15. Juni

Das nachfolgende Liniendiagramm (Diagramm 6) zeigt die spektral verteilten erythemalen Strahlungsdichten auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche in W/(m²nm) zum Referenzzeitpunkt 12:00 am 15. Juni.

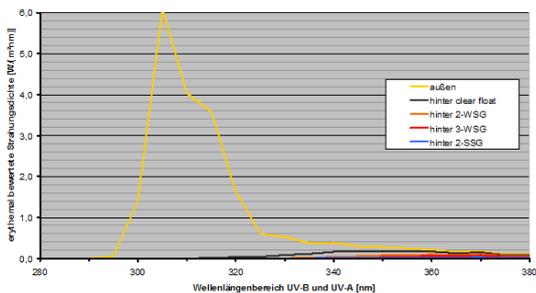


Diagramm 6: Spektrale erythemal bewertete Strahlungsdichte am 15. Juni um 12:00

2.2.3 Ergebnisse Pre-Vitamin D₃ Photosynthese

Aufgrund der zentralen Bedeutung des Vitamin D₃ für die Gewährleistung unterschiedlicher humanphysiologischer Abläufe werden die Wirkpotentiale für die Pre-Vitamin D₃ Photosynthese hinter technischen Funktionsgläsern untersucht.

Wirkpotential zur Beschreibung der Pre-Vitamin D₃ Photosynthese ist die Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdosis in der Einheit mJ/cm² exponierter Hautoberfläche. Analog der Auswertung der Erythembildung werden auch die Diagramme der Pre-Vitamin D₃ Photosynthese über der Wellenlänge als flächenbezogene Strahlungsleistung dargestellt, in der Einheit von W/(m²nm).

Für die Pre-Vitamin D₃ Photosynthese existiert eine Wirkungs-Kurve, mit einem Empfindlichkeitsmaximum bei einer Wellenlänge von 295 nm und einem steilen Abfall gegen Null im Wellenlängenbereich bis 330 nm und demnach bereits im Spektralbereich des UV-A Strahlung.[12]

Für das Einsetzen der Vitamin D₃ Photosynthese liegt ein Schwellwert in Form einer minimal erforderlichen, physiologisch bewerteten Strahlungsdosis vor. In Anwendung der diesbezüglichen Fachliteratur wird dieser Schwellwert mit 18 mJ/cm² angenommen.[13][14]

Bereits unbeschichtetes Floatglas ist für Strahlung in den zur Pre-Vitamin D₃ Photosynthese erforderlichen Wellenlängenbereichen praktisch intransparent. Es ist demnach nachdrücklich festzuhalten, dass hinter handelsüblichen Baugläsern kein in irgendeiner Weise relevantes Wirkpotential zur Pre-Vitamin D₃ Photosynthese vorliegt.

Im Außenraum wird die Schwelle der Pre-Vitamin D₃ Photosynthese von 18 mJ/cm² während der Mittagsstunden etwa des Referenztages im Juni binnen einer viertel Stunde erreicht, im September binnen einer halben Stunde, im März binnen knapp einer dreiviertel Stunde. Bemerkenswert ist, dass während der wolkenlos angenommenen Mittagsstunde des Dezembers nur 4 mJ/cm² und somit nur weniger als ein Viertel des Schwellwertes erreicht werden. Was wiederum vor dem Hintergrund an Bedeutung gewinnt, als im Dezember die statistische Tagessumme der Bestrahlungsstärke nur um ca. 15% über der Stundensumme bei wolkenlosen Referenzbedingungen liegt. Dieser Zusammenhang ist insofern bemerkenswert, als die Bestrahlungsstärke auf die vertikale Messfläche zur Mittagsstunde des Referenztages im Dezember sogar über

jener im Juni liegt. Durch den längeren Weg der Sonnenstrahlung durch die Atmosphäre kommt es aber zu einer überproportionalen Extinktion der kurzwelligen Strahlungsanteile und somit zu einer weitgehenden Wirkungslosigkeit der Wintersonne für die Pre-Vitamin D₃ Photosynthese.

Es kann also festgehalten werden, dass unter wolkenlosen Situationen des Sommerhalbjahres im Außenraum bereits Sonnenexpositionen von einer viertel Stunde aufwärts zum Start der Pre-Vitamin D₃ Photosynthese ausreichend sind, während im Winterhalbjahr Strahlungssituationen die Regel sind, in denen der erforderliche Schwellwert selbst im Außenraum innerhalb des ganzen Tages nicht erreicht werden kann.

In der folgenden Tabelle (Tabelle 3 Tabelle) sind die stündlichen Pre-Vitamin D₃ bewerteten Dosen in mJ/cm² zu den Referenzzeitpunkten nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zusammengefasst.

	außen mJ/cm ²	hinter clear float mJ/cm ²	hinter 2-WSG mJ/cm ²	hinter 3-WSG mJ/cm ²	hinter 2-SSG mJ/cm ²
März, 07:00	0	0	0	0	0
März, 12:00	26	0	0	0	0
März, 17:00	0	0	0	0	0
Juni, 07:00	10	0	0	0	0
Juni, 12:00	67	0	0	0	0
Juni, 17:00	10	0	0	0	0
September, 07:00	1	0	0	0	0
September, 12:00	55	0	0	0	0
September, 17:00	1	0	0	0	0
Dezember, 12:00	4	0	0	0	0

Tabelle 3: Stündliche Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdosis zu den Referenzzeitpunkten

Das folgende Säulendiagramm (Diagramm 7) zeigt die stündlichen Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdosen in mJ/cm² auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. Juni. Mit einer strichlierten, horizontalen Linie gekennzeichnet ist der erläuterte Schwellwert 18 mJ/cm² für das Einsetzen der Vitamin D₃ Photosynthese.

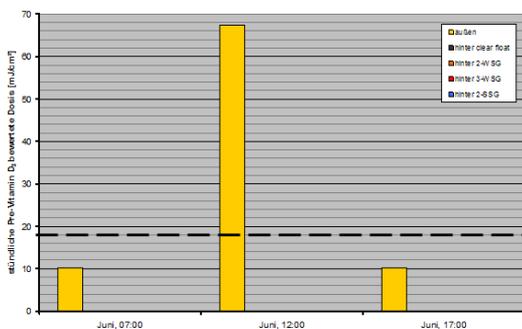


Diagramm 7: Stündliche Pre-Vitamin D₃ bewertete Dosis zu den Referenzzeitpunkten des 15. Juni

Das nachfolgenden Liniendiagramme (Diagramm 8) zeigen die spektral verteilte Pre-Vitamin D₃ bewerteten Strahlungsdichten auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche in W/(m²nm) zum Referenzzeitpunkt 12:00 am 15. Juni.

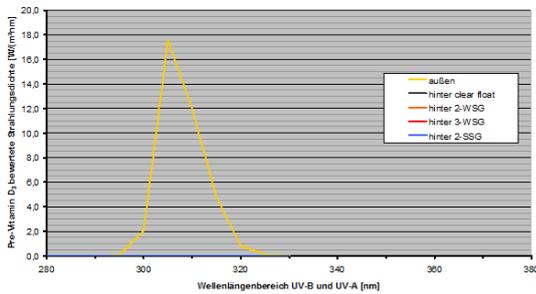


Diagramm 8: Spektrale Pre-Vitamin D₃ bewertete Strahlungsdichte am 15. Juni, 12:00

2.2.4 Ergebnisse Melatonin Suppression

Als Wirkzusammenhang im sichtbaren Spektralbereich wird die Melatonin Suppression als mittelbare nicht visuelle photophysiologische Reaktion ausgewählt. Sie steht in einem reproduzierbaren, komplexen Zusammenhang mit der circadianen Rhythmik und der subjektiven Munterkeit.

Das Wirkpotential der Melatonin Suppression wird korrekt als Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte auf die Netzhaut beschrieben und mit dem Formelzeichen I_c bezeichnet. Es ist darauf hinzuweisen, dass dieses Wirkpotential in der medizinischen Fachliteratur auch bisweilen als circadian gewichtete Strahlungsdichte bezeichnet wird. Diese Bezeichnung ist nicht völlig exakt, da die Beeinflussung der circadianen Rhythmik zwar eine der biologischen Wirkungen ist, die mit der Melatonin Suppression in einem nachgewiesenen Zusammenhang stehen, aber keinesfalls mit dieser ident ist.

Für die Melatonin Suppression liegt, aufbauend auf früheren Forschungsergebnissen, [15][16] mit der circadianen Wirkungsfunktion $c(\lambda)$ eine anerkannte Wirkungs-Kurve vor, welche die relative Melatonin Suppression über der Wellenlänge mit einem Maximum bei 450 nm beschreibt.[17] Sie wurde den gegenständlichen Analysen zugrunde gelegt.

In der Fachliteratur werden für die physiologische Wirksamkeit der Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichte auf die Netzhaut mit hinreichend genauer Übereinstimmung mehrere empirisch ermittelte Dosis-Wirkungs-Kurven angegeben. Gemeinsam ist diesen Dosis-Wirkungs-Kurven, dass sie einen charakteristischen Schwellwert und einen charakteristischen Maximalwert der wirksamen Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichte ausweisen. Bei Strahlungsdichten unter dem

Schwellwert kann keine Wirkung nachgewiesen werden. Bei Strahlungsdichten über dem Maximalwert kann keine weitere Verstärkung der Wirkung durch fortschreitende Erhöhung der Strahlungsdichte hervorgerufen werden. Hinzuweisen ist darauf, dass die genannten Schwell- und Grenzwerte empirisch bei einer sechs- und sechseinhalbstündigen Bestrahlungsdauer ermittelt wurden.

Die Obergrenze der Melatonin Suppression an sich, als auch jene der Steigerung subjektiver Munterkeit wird bei 1.000 lx kaltweißen Lichts oder 0,8 W/m² Melatonin Suppression bewerteter Strahlungsdichte erreicht. Die 50% Schwelle wird in beiden Wirkungskategorien bereits bei 100 lx oder 0,1 W/m² erreicht.[18][19] Die Obergrenze der Verschiebung der circadianen Rhythmik wird bei 9.100 lx kaltweißen Lichts oder 7,2 W/m² Melatonin Suppression bewerteter Strahlungsdichte erreicht. Die 50% Schwelle liegt hier ebenfalls bei 100 lx oder 0,1 W/m². [20]

Aus den Berechnungen ergibt sich eine vergleichsweise moderate Verminderung der Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichte hinter Glas im Vergleich zur jener im Außenraum. Nach dem Strahlungsdurchgang durch die Funktionsgläser beträgt demnach die Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte relativ zu jener im Außenraum noch minimal 48% hinter dem Zweischeiben-Sonnenschutzglas und maximal 87% hinter dem unbeschichteten Einscheibenglas.

In allen untersuchten Fällen liegen die absoluten Werte der Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichte hinter Glas deutlich über selbst dem höchsten der zuvor angegebenen Grenzwerte. Eine physiologisch wirksame Beeinflussung der circadianen Rhythmik durch Tageslicht wäre demnach hinter den untersuchten technischen Funktionsgläsern ebenso möglich wie eine physiologisch wirksame Beeinflussung der subjektiven Munterkeit. Hinsichtlich der Melatonin Suppression lassen die vorliegenden Ergebnisse eine Sorge vor dem Eintreten physiologischer Finsternis zunächst als unbegründet erscheinen. Berücksichtigt man allerdings die Abminderungseffekte durch die Einbeziehung der statistischen Bewölkung und der realen Lichtgeometrie im Innenräumen stellt sich die Situation anders dar, was Messungen, Studien und auch in diversen Regelwerken festgeschriebene Grenzwerte deutlich machen.[21][22][23]

In der folgenden Tabelle (Tabelle 4) sind die Melatonin Suppression gewichteten Strahlungsdichten in W/m² zu den zehn Referenzzeitpunkten nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zusammengefasst.

	außen W/m ²	hinter clear float W/m ²	hinter 2-WSG W/m ²	hinter 3-WSG W/m ²	hinter 2-SSG W/m ²
März, 07:00	22	20	17	15	11
März, 12:00	97	84	71	60	46
März, 17:00	22	20	17	15	11
Juni, 07:00	85	74	64	55	42
Juni, 12:00	77	57	41	29	26
Juni, 17:00	85	74	64	55	42
September, 07:00	45	40	35	31	23
September, 12:00	100	86	71	59	46
September, 17:00	45	40	35	31	23
Dezember, 12:00	75	67	58	51	37

Tabelle 4: Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte

Das Säulendiagramm (Diagramm 9) im Anschluss zeigt die Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten in W/m² auf eine senkrechte, nach dem Sonnenazimut orientierte Messfläche zu den Referenzzeitpunkten 07:00, 12:00 und 17:00 am 15. März. Mit einer strichlierten, horizontalen Linie gekennzeichnet ist die Obergrenze der Verschiebung der circadianen Rhythmik bei 7,2 W/m² Melatonin Suppression bewerteter Strahlungsdichte.

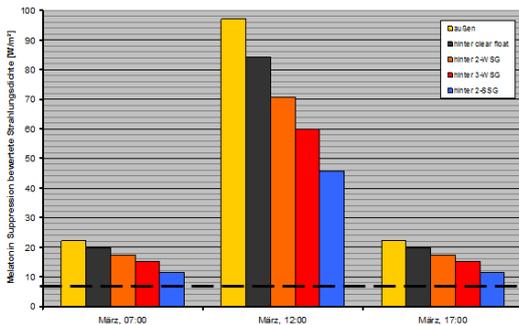


Diagramm 9: Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte zu den Referenzzeitpunkten des 15. März

Das nachfolgende Liniendiagramm (Diagramm 10) zeigen die spektral verteilten Melatonin Suppression bewerteten Strahlungsdichten in W/(m²nm) auf eine vertikal sonnennachgeführte Messfläche zum Referenzzeitpunkten 07:00 am 15. März.

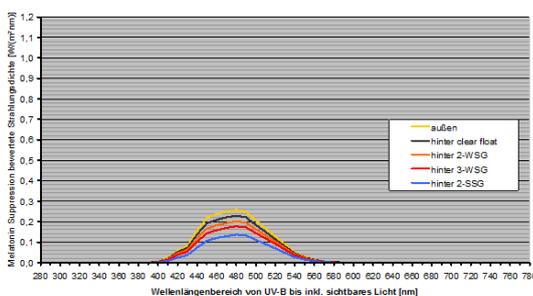


Diagramm 10: Spektrale Melatonin Suppression bewertete Strahlungsdichte am 15. März, 07:00

2.3 Bezug der Ergebnisse zu realitätsnahen Bedingungen

In der voran stehenden Potentialstudie wurde unter bewusst idealisiert festgelegten Rahmenbedingungen das mögliche Maximalangebot photobiologisch wirksamer Sonnenstrahlung im modellhaften Innenraum errechnet.

Die ermittelten Werte werden unter real üblichen Bedingungen zumeist deutlich unterschritten, wobei zwei wesentliche Effekte der Minderung diskutiert werden.

Erstens die Verhältnismäßigkeit zwischen der terrestrischen Bestrahlungsstärke zum Referenzzeitpunkt mit definitionsgemäß klarem Himmel und jener zum selben Zeitpunkt im langjährigen Mittel und somit unter Einbezug des statistischen Bewölkungsanteils. Verglichen wurde die stündliche flächenbezogene Bestrahlungsmenge auf die vertikale, zum Sonnenazimut orientierte Fläche unter wolkenlosem Himmel mit erstens stündlichen flächenbezogenen Bestrahlungsmenge und mit zweitens der im langjährigen Mittel auftretenden täglichen flächenbezogenen Bestrahlungssumme auf dieselbe, feststehende Fläche. Diesen Zusammenhang veranschaulicht das folgende Säulendiagramm (Diagramm 11). Dargestellt ist für die Referenzzeitpunkte 15. März, 15. Juni, 15. September und 15. Dezember jeweils 12:00 eine Säulengruppe, gebildet aus der Stundensumme der Globalstrahlung bei klarem Himmel, der Stundensumme der Globalstrahlung bei langjährig charakteristischer Bewölkung und der Tagessumme der Globalstrahlung bei ebenfalls langjährig charakteristischer Bewölkung.

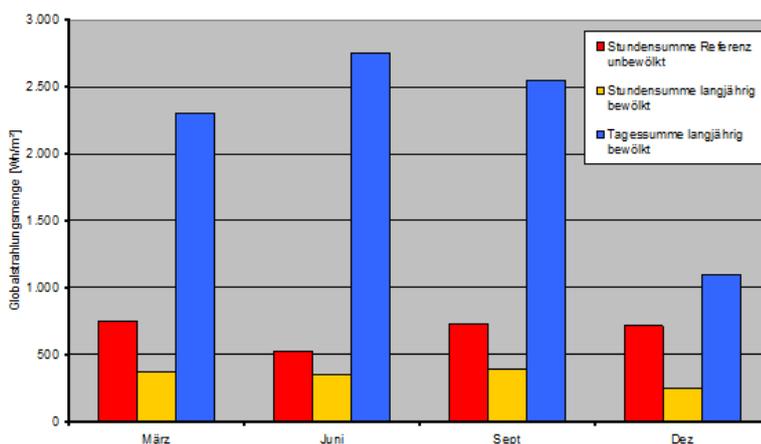


Diagramm 11: Strahlungssummen unter Referenzbedingungen und im langjährigen Mittel, 12:00

Es zeigt sich demnach, dass die Stundensummen der Bestrahlung während der Mittagsstunden unter wolkenlosen Referenzbedingungen von den Stundensummen der Bestrahlung im langjährigen Mittel um 25% bis 75% unterschritten werden, mit geringster Unterschreitung im Sommer und mit größter Unterschreitung im Winter.

Weiters zeigt sich, dass die stündlichen Strahlungsmengen während der Mittagsstunden unter wolkenlosen Referenzbedingungen bereits 20% bis 65% der langjährigen täglichen Strahlungsmengen auf dieselben, vertikal südorientierten Messebenen betragen, mit den kleineren Werten im Sommer und den größeren im Winter.

Zweitens die Verhältnismäßigkeit der Beleuchtungsstärke unmittelbar hinter der Glasscheibe zu jener in der Raumtiefe, unter der Annahme modellhafter Raumgeometrien und Oberflächenqualitäten. So kann ein weiterer Bezug hergestellt werden zwischen den unmittelbar hinter den technischen Funktionsgläsern auftretenden Wirkpotentialen und jenen in einem realistischen Abstand in Hinsicht auf den üblichen Aufenthaltsbereich eines Nutzers von der Glasscheibe. Untersucht wird mittels Tageslichtsimulation die Verringerung der Beleuchtungsstärke auf eine Messebene unmittelbar hinter der Glasscheibe zu weiteren raumseitig angeordneten Messebenen.

Berechnungen werden durchgeführt sowohl für den klaren Himmel zur Mittagsstunde eines 21. März, als auch für den bedeckten Himmel. Nachfolgend dargestellt (Diagramm 12) sind die Verläufe der Bestrahlungsstärke auf jeweils die Mittelpunkte der südorientierten vertikalen Messebenen.

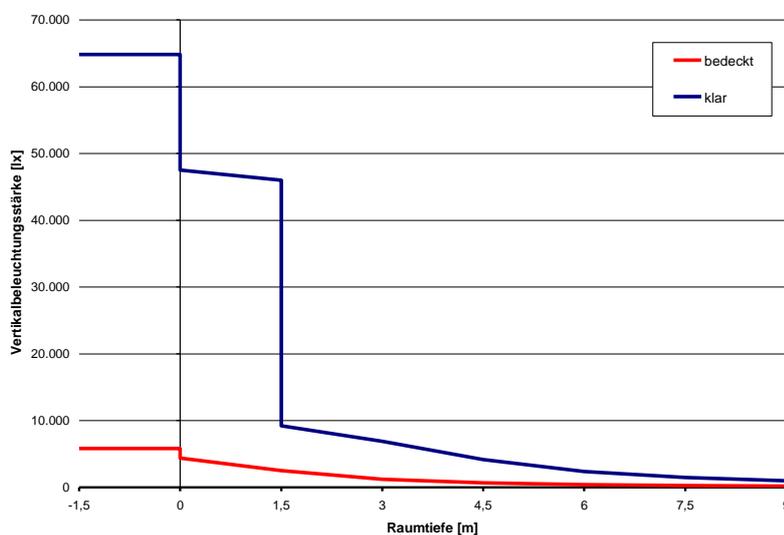


Diagramm 12: Verlauf der Vertikalbeleuchtungsstärke in der Raumtiefe

Die blaue Kurve zeigt den Verlauf der Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel, die rote Kurve bei bedecktem Himmel. Die Strahlungsintensität verringert sich innerhalb des direkten Sonnenlichts mit zunehmender Raumtiefe nur geringfügig. Wird der Betrachtungspunkt aus dem Lichtstrahl heraus verschoben, vermindert sich die

Strahlungsintensität jedoch schlagartig und nimmt mit der Raumtiefe weiter ab. Bei bedecktem Himmel ist das Ausgangsniveau der Bestrahlungsstärke erwartungsgemäß deutlich niedriger. Im Rauminneren sinkt die Bestrahlungsstärke kontinuierlich.

3 Entwurfsstrategien zur Optimierung des innenräumlichen Solarstrahlungsangebotes

Die Ergebnisse der Wirkpotentialstudie zeigen, dass das vorhandene Solarstrahlungspotential im Gebäude intensiver genutzt werden muss. Dabei sind für eine nicht nur visuell ergonomisch sondern auch eine physiologisch entsprechende Planung zwei unterschiedliche räumliche Bezüge zwischen der Strahlung und dem Innenraumbewohner als Rezipienten herzustellen. Zu berücksichtigen ist einerseits der Bezug zwischen dem Rezeptororgan Haut und der ungefilterten Solarstrahlung und andererseits den visuellen und nicht visuellen Rezeptoren des Auges und dem innenräumlichen Tageslichts andererseits. Das führt zu neuen Anforderungen für den Entwurf, für die Planungstools entwickelt werden müssen.

3.1 Tools für die Einbeziehung ungefilterter Solarstrahlung in den Entwurf

Grundsätzlich erleichtert die Verwendung polarer Sonnenbahndiagramm die Orientierung von zu entwerfenden Gebäuden im natürlichen Strahlungsraum eines konkreten Ortes. In polaren Sonnenbahndiagrammen wird der Gang der Sonne über einen hemisphärischen Himmelsraum in einer äquidistanten Vertikalprojektion in Bahnen dargestellt, sodass Azimut und Höhenwinkel der Sonne für den jeweiligen Breitengrad des Standortes abgelesen werden können. Öffnungen in der Gebäudehülle und gebäudezugeordnete Freiflächen lassen sich mit Hilfe derartiger Sonnenbahndiagramme entsprechend zur direkte Lichtstrahlung ausrichten, sodass Räume an denen die für die Überschreitung verschiedener photophysiologischer Schwellwerte notwendigen Strahlungsdosen erreicht werden identifiziert werden können.

Um die Bearbeitung des räumlichen Bezuges von ungefilterter solarer Strahlung und dem Rezeptororgan Haut möglich zu machen werden polare Sonnenbahndiagramme mit einem Farbcode entwickelt (Diagramm 13). Die intensiv farbig gekennzeichnete Fläche innerhalb der Sonnenbahnen weist jenes Zeitfenster aus, innerhalb dessen die Strahlung bei klarem Himmel ausreichende Intensität erreicht, um die für die Pre-Vitamin D₃ Photosynthese nötige Schwellendosis innerhalb längstens einer Stunde zu

überschreiten. Mit Hilfe dieses farbcodierten Sonnenbahndiagramms lassen sich Fassadenbereiche, die großflächig offenbar sein sollen sowie vom Gebäude direkt zugängliche Außenräume mit ausreichender Direktlichtversorgung einfach erkennen. Dadurch wird die Rezeption der ultravioletten Spektralanteile der Solarstrahlung durch die Haut ermöglicht, die wie ausgeführt wurde, in von handelsüblichen, lichtdurchlässigen Bauelementen begrenzten Innenräumen nicht erfolgen kann. [25]

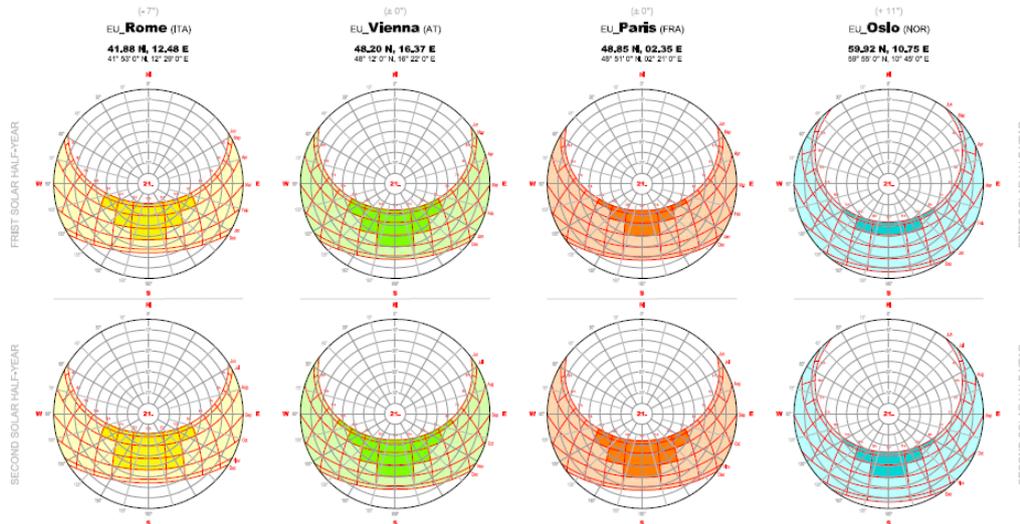


Diagramm 13: Polares Sonnenbahndiagramm mit farbiger Codierung zur Identifikation von für die Pre-Vitamin D3 Photosynthese relevanten Zeitfenstern, differenziert nach erstem und zweitem Halbjahr sowie nach den Standorten Rom, Wien, Paris und Oslo

3.2 Tools für die Einbeziehung von direktem Tageslicht in den Entwurf

Im Bereich der Tageslichtstrahlung sind die unterschiedlichen Bedürfnisse der visuellen Ergonomie und der Photophysik zur Stabilisierung der circadianen Rhythmik und zur Erreichung von Aufmerksamkeit beziehungsweise Munterkeit aufeinander abzustimmen. Wie gezeigt wurde, sind Beleuchtungsstärken von über 9.100 lx im direkten Lichtstrahlungsbereich über den gesamten Strahlungstag und das gesamte Strahlungsjahr im Innenraum erreichbar. Für den Entwurf ist in Bezug auf die innenräumliche Direktstrahlungsverteilung daher zwischen dem Blickfeld der visuellen Wahrnehmung und dem annähernd hemisphärischen Wahrnehmungsraum der nichtvisuellen Lichtrezeption zu unterscheiden. Während die visuelle Wahrnehmung speziell bei objektfokussierender Arbeit unter einem relativ engen Blickfeld und durch minimale Bewegungen des Auges erfolgt, liegt bei der nichtvisuellen Rezeption eine Integration räumlich adäquater Reize des gesamten im Gesichtsfeld erfassbaren Lichttraumes vor. Über diese wahrnehmungsräumliche Differenzierung hinaus ist auch die tageszeitlich unterschiedliche Sensibilität für den Zeitgeber Licht in Bezug auf das

Entrainment der circadianen Rhythmik zu beachten. Die Einbringung von direktem Sonnenlicht in den Innenraum, die im nichtvisuellen Gesichtsfeld wahrnehmbar wird ohne im visuellen Gesichtsfeld zu Beeinträchtigungen etwa durch Blendung zu führen ist in der Planung umzusetzen. Um hier bereits in frühen konzeptionellen Entwurfsphasen ein einfaches Mittel der Veranschaulichung bereitstellen zu können wurde ein von CAD Programmen gestütztes Tool zur Simulation des Direktlichtvolumens in Innenräumen entwickelt.[26] Es ermöglicht die Darstellung und numerische Ermittlung jenes bewegten Volumens, das auf Grund der räumlichen Gestaltung eines Gebäudes und der Sonnengeometrie von direktem Tageslicht erfüllt wird. (Abbildung 1 bis 4) Mit Hilfe dieses Tools können Öffnungen in der Gebäudehülle und die Anordnung von Reflexionsoberflächen im Innenraum so aufeinander abgestimmt werden, dass das Blendungsrisiko im Zusammenhang mit Sehaufgaben minimiert wird, sich im integrativen Wahrnehmungsraum der nichtvisuellen Rezeption aber entsprechende Flächen photophysologisch ausreichend hoher Bestrahlungsstärke befinden.

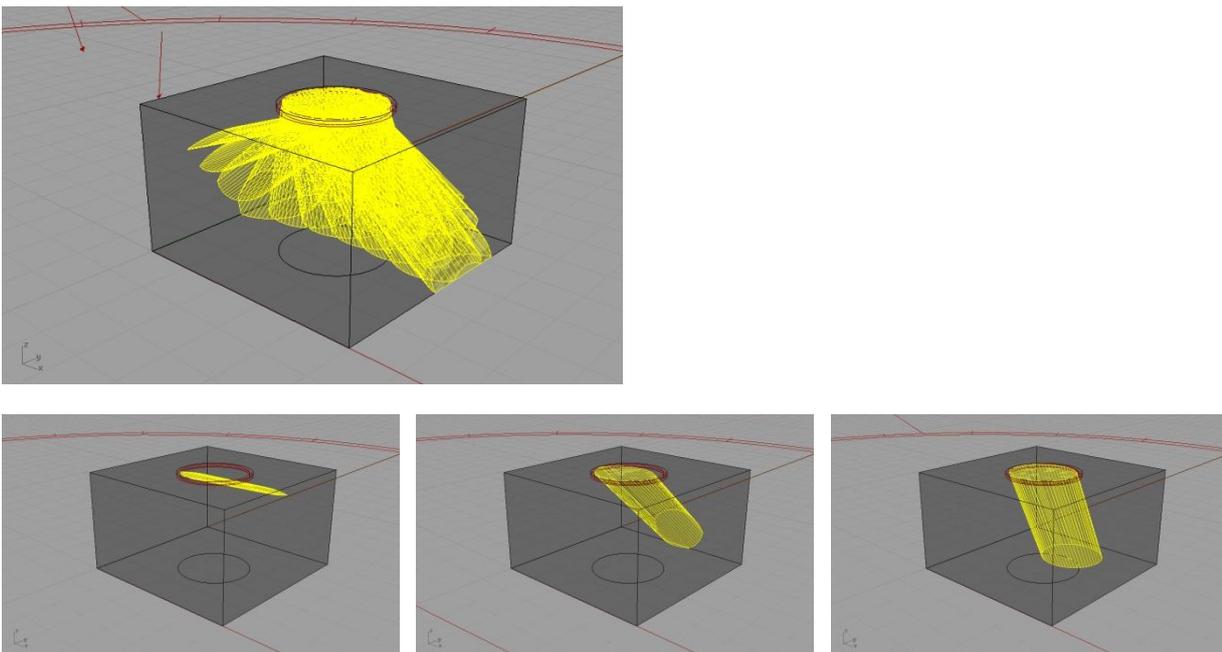


Abbildung 1, 2, 3 und 4: Darstellung des durch eine kreisförmige Überkopfföffnung einfallenden direkten Tageslichts als Volumen innerhalb eines quaderförmigen Innenraumes, Tagesverlauf in Stundenschritten am 21. Juni, sowie zum Zeitpunkt 12:00 am 21.12, am 21.03 beziehungsweise 21.09, sowie am 21.06.am Standort Wien

3.3 Kombinationstools

In Kombination wurden einfache Basisdiagramme für die Entwurfsarbeit entwickelt, die sowohl die Herstellung des Bezuges zwischen dem Rezeptororgan Haut und der ungefilterten Solarstrahlung als auch den visuellen und nicht visuellen Rezeptoren des

Auges und dem innenräumlichen Tageslicht ermöglichen (Diagramm 14 a,b und 15 a,b).[27]

Dafür wurden die bereits beschriebenen farbcodierten polaren Sonnenbahndiagramme zugrunde gelegt. Die Azimut- und Höhengrenzwinkel, welche die intensiv farbig gekennzeichnete Fläche innerhalb der Sonnenbahnen einschließen, wurden ermittelt. Unter der von diesen Winkeln begrenzt direkt einfallenden Solarstrahlung, kann bei klarem Himmel ausreichende Intensität erreicht werden, um die für die Pre - Vitamin D₃ Photosynthese nötige Schwellendosis innerhalb längstens einer Stunde zu erreichen. Die begrenzenden Höhenwinkel werden in einem kreissegmentförmigen Diagramm zur Verwendung in vertikaler Lage also zur Gestaltung von Schnitten und die begrenzenden Azimutwinkel in einem kreissegmentförmigen Diagramm zur Verwendung in horizontaler Lage also zum Entwurf von Grundrissen dargestellt.

Um dieses kreissegmentförmige Diagramm wird ein Kreisring gelegt auf dem jene Azimut- beziehungsweise Höhenwinkel in Projektion abgebildet sind, die am längsten sowie kürzesten Tag des Jahres am jeweiligen Standort von direktem Sonnenlicht durchstrichen werden.

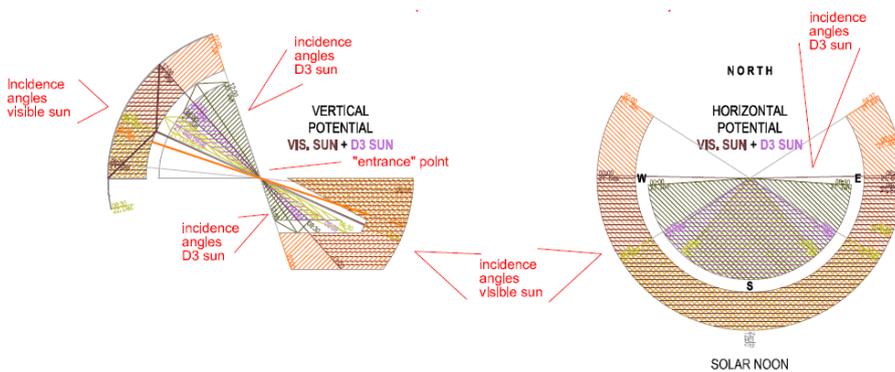


Diagramm 14a links: Vertikales Basisdiagramm, Standort Rom

Diagramm 14b rechts: Horizontales Basisdiagramm, Standort Rom

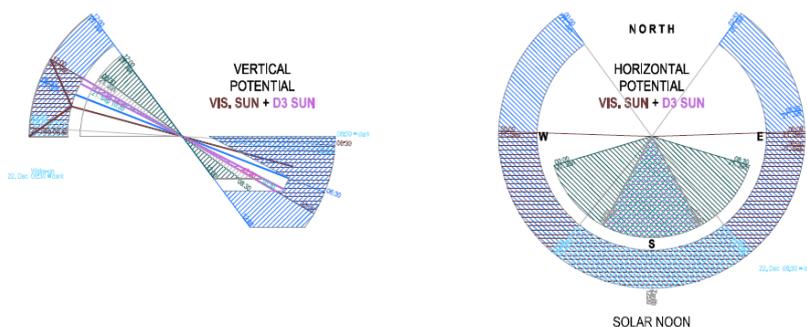


Diagramm 15a links: Vertikales Basisdiagramm, Standort Oslo
 Diagramm 15b rechts: Horizontales Basisdiagramm, Standort Oslo

In diese Basisdiagramme werden typische Körperhaltungen wie Sitzen, Liegen oder Stehen eingeschrieben und in Hinsicht auf die Bezüge Auge Direktlicht beziehungsweise Haut ungefilterte Solarstrahlung analysiert (Abbildung 2a,b).[28] Auf räumlicher Zuordnung basierende Abläufe wie das Erleben des Sonnenaufgangs oder der Konsum von direkter Solarstrahlung im Bereich des Bades können so gezielt geplant werden.

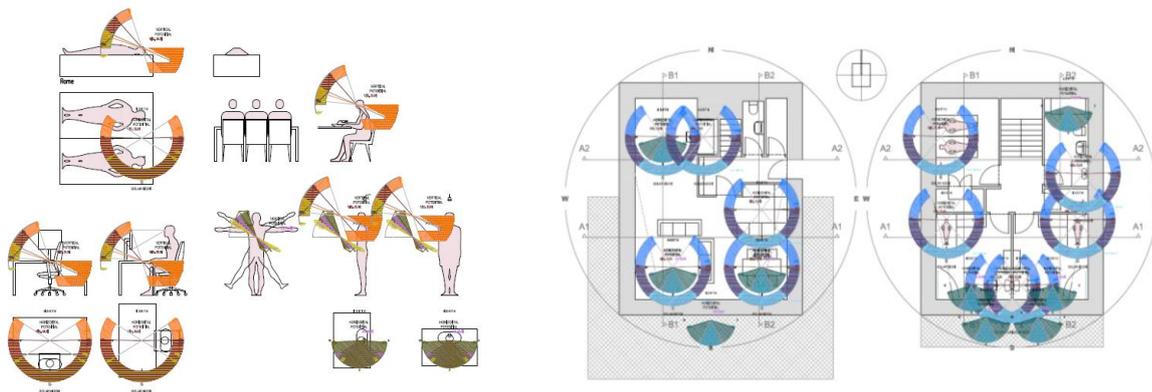


Abbildung 2a: Basisdiagramme mit eingeschriebenen Körperhaltungen, Standort Rom
 Abbildung 2b: Basisdiagramme entsprechend den Körperhaltungen in einem Grundriss angeordnet, Standort Oslo

Dadurch verändert sich das Herangehen an den Entwurf grundsätzlich und es entstehen den menschlichen Bedürfnissen nach Solarstrahlung und Sonnenlicht entsprechend gestaltete architektonische Lösungen (Abbildung 3a,b).[29]

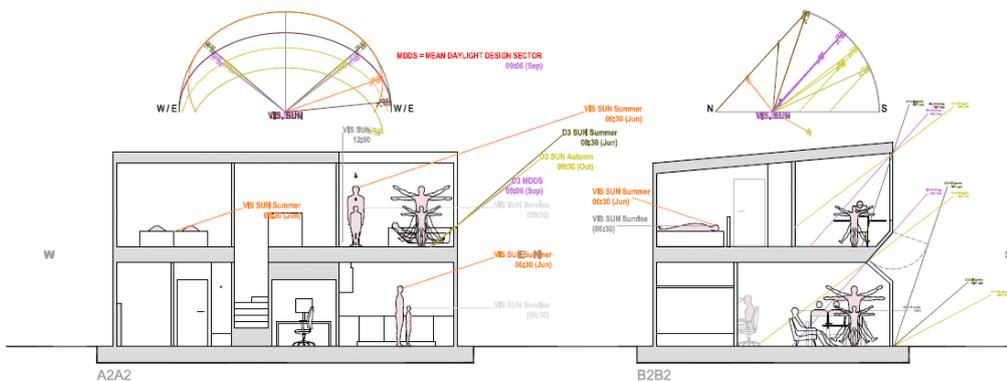


Abbildung 3a: Gebäudeschnitt West-Ost mit Studien zur Anordnung von offenbaren Fassadenelementen, Standort Rom
 Abbildung 3b: Gebäudeschnitt Nord-Süd mit Studien zur Anordnung von offenbaren Fassadenelementen, Standort Rom

4 Schlussfolgerungen

Es kann als belegt gelten, dass ein ursächlicher Zusammenhang zwischen der Evidenz des epidemischen Auftretens von Strahlungsmangelercheinungen und dem lang andauernden Aufenthalt hinter Glasscheiben im Inneren von Gebäuden besteht. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass das photobiologisch wirksame Tageslichtangebot hinter thermisch optimierten Funktionsglasscheiben geringer ist als hinter einer unbeschichteten Einscheibenverglasung. Jedoch ist das spektrale Strahlungsangebot zumindest in Bezug auf die derzeit bekannten und hier untersuchten photobiologischen Wirkungen entweder derartig unerschwellig beziehungsweise überschwellig, dass die, durch die verschiedenen Transmissionseigenschaften der untersuchten Gläser hervorgerufenen Angebotsunterschiede vergleichsweise zu gering sind, um die grundlegenden photobiologischen Tendenzen nennenswert zu beeinflussen.

So kann klar gezeigt werden, dass alle untersuchten Glasscheiben nahezu intransparent für jene Spektralanteile der UV-Strahlung sind, die dem Ablauf der Photosynthese von Pre-Vitamin D₃ zugrunde liegen. An dieser Stelle ist zu bemerken, dass das Tageslichtangebot am gewählten Standort Wien während der Wintermonate selbst im Außenraum für den Ablauf der Pre-Vitamin D₃ Photosynthese nicht ausreicht, und eine adäquate Versorgung mit solarer Strahlung in den verbleibenden Monaten daher umso wichtiger ist.

Ebenfalls in nur sehr geringem Ausmaß können jene Spektralanteile der UV-Strahlung durch sämtliche der untersuchten Glasscheiben dringen, die zur Bildung eines UV-Erythems führen. Entsprechend kann auch davon ausgegangen werden, dass sowohl photopathologische aber auch photoadaptive Wirkungen in diesem Spektralbereich hinter Glasscheiben weitgehend ausbleiben. Es ist darauf hinzuweisen, dass aktuelle medizinische Forschungsergebnisse daraufhin deuten, dass nicht oder ungenügend adaptierte Haut, bei plötzlicher Strahlungseinwirkung für Schädigungen besonders anfällig ist.

Im Gegensatz zum ultravioletten Strahlungsbereich sind alle untersuchten Glasscheiben im sichtbaren Spektralbereich derart transparent, dass die, für die photophysiologischen Wirkungen relevanten Schwellwerte jedenfalls erreicht werden können. Das gilt auch für alle derzeit bekannten nichtvisuellen Wirkungen im Zusammenhang mit der Suppression von Melatonin, sofern der betroffene Inhabitant direktes Sonnenlicht rezipieren kann. Die Entfernung von der Glasscheibe ist dabei von

sekundärer Bedeutung. Außerhalb des direkten Sonnenlichts sind strahlungstechnische und in erster Näherung auch photophysiological Intensitäten um etwa einen Faktor drei niedriger und klingen mit der Raumtiefe weiter ab.

Entsprechend müssen Gebäude konzipiert werden, die eine Ausbildung von zwei unterschiedlichen räumlichen Bezügen sicherstellen: der Bezug zwischen dem Rezeptororgan Haut und der ungefilterter Solarstrahlung einerseits und zwischen den nicht visuellen und visuellen Rezeptoren des Auges und dem innenräumlichen Tageslichts andererseits. Für den Entwurf bedeutet das die gezielte Anordnung von offenbaren Elementen in der Gebäudehülle und die direkte Zuordnung und gewährleistete Erreichbarkeit von entsprechend orientierten und konfektionierten Außenräumen. Darüber hinaus muss das vorhandene Lichtstrahlungspotential intensiver genutzt werden. Die Herausforderung für den Gestalter besteht dabei darin direktes Licht in seinem Einfall und Auftreffen auf innenräumliche Oberflächen so zu fassen, dass es für das nichtvisuelle System des Auges wahrnehmbar ist ohne das visuelle System zu stören. Um diese Differenzierung im Umgang mit Tageslicht im Gebäude berücksichtigen zu können sind aktuell den Entwurf unterstützenden Hilfsmittel in Ausarbeitung.

Literatur

- [1] C. Gueymard: User's manual of SMARTS 2.9.5, (2006), S.34-35, aus dem Internet <http://www.nrel.gov/rredc/smarts/> (01.01.2009)
- [2] Calumen 2.3.1, Softwarepaket mit Zertifizierung nach EN 673 und EN 410 zur Berechnung der lichttechnischen, energetischen und thermischen Performance einer Auswahl von Saint-Gobain Verglasungen, www.saint-gobain-glass.com/calumen/ (06.03.2009)
- [3] T. Roenneberg, M. Meroow, Das Leben im Zeitraum Tag, http://www.imp-muenchen.de/Das_Leben_im_Zeitrau.chrono_lit.1.html, (01.30.2008); http://www.notfallpflege.ch/Das_Leben_im_Zeitraum_Tag.pdf, (15.02.2009)
- [4] R. Moore, Circadian Timing, in: Fundamental Neuroscience, Herausgeber: M. Zigmond, F. Bloom, S. Landis, J. Roberts, L. Squire, 1195, (1999)
- [5] B. Naumann, Rhythmus: Spuren eines Wechselspiels in Künsten und Wissenschaften, (2005)
- [6] T. Roenneberg, S. Daan, M. Meroow, The art of entrainment, Journal of Biological Rhythems 18/3, 183 – 194, (2003)
- [7] DIN 5031- 3, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Teil 3: Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik, (1982)

- [8] CIE 103/3, Reference action spectra for ultraviolet induced erythema and pigmentation of different human skin types, (1993)
- [9] N. Lowe, Photoprotection, Seminars in Dermatology 9, 78 - 83, (1990)
- [10] Deutschen Strahlenschutzkommission: Stellungnahme, Schutz des Menschen vor den Gefahren der UV-Strahlung in Solarien, wissenschaftliche Begründung zur gleichnamigen Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 172. Sitzung, (2001)
- [11] C. Taylor, R. Stern, J. Leyden, B. Gilchrest, Photoaging/photodamage and photoprotection, Journal of the American Academy of Dermatology 22, 1 - 15, (1990)
- [12] CIE 174:2006: Action Spectrum for the Production of Previtamin D3 in Human Skin, (2006)
- [13] B. Hollis., Circulating 25-Hydroxyvitamin D Levels Indicative of Vitamin D Sufficiency: Implications for Establishing a New Effective Dietary Intake Recommendation for Vitamin D, Journal of Nutrition 135/2, 317 – 322, (2005)
- [14] J. Fisch, Licht und Gesundheit, Das Leben mit optischer Strahlung, Literaturrecherche Zusammenstellung, Ergebnisse und Ausblick, Zeitraum: 1800 – 2000, Technische Universität Ilmenau, (2000) Bemerkung: Hier wird mit 200J/m^2 eine etwas höhere Schwellenbestrahlung angeführt
- [15] G. Brainard, J. Hanifin, J. Greeson, B. Byrne, G. Glickman, E. Gerner, M. Rollag, Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor, The Journal of Neuroscience, 21(16) 6405 – 6412, (2001)
- [16] K. Thapan, J. Arendt, D. Skene, An action spectrum for melatonin suppression: Evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans, The Journal of Physiology 535 (1), 261 – 267, (20019)
- [17] D. Gall, Die Messung circadianer Strahlungsgrößen, Licht und Gesundheit, 114 – 132, Berlin, 26./27. Februar (2004)
- [18] M. Zeitzer, D. Dijk, R. Kronauer, E. Brown, C. Czeisler, Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression, The Journal of Physiology, 526, 695 – 702, (2000)
- [19] C. Cajochen, Altering effects of light, Sleep Medicine Reviews 11, 453 – 464, (2007)
- [20] M. Zeitzer, D. Dijk, R. Kronauer, E. Brown, C. Czeisler, Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression, The Journal of Physiology, 526, 695 – 702, (2000) Bemerkung: Von Brainard wurde 2001 darüber hinaus unter monochromatischem Licht von 470nm ein Grenzwert von $I_c = 0,42\text{ W/m}^2$ ermittelt, der aber hier keine Berücksichtigung findet, da er den bekannten Effekt des sub-additiven Verhaltens nicht abbildet.
- [21] S. Hubalek, LuxBlick, Messung der täglichen Lichtexposition zur Beurteilung der nicht-visuellen Lichtwirkungen über das Auge, Dissertation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Nr.: 17257, (2007)

- [22] G. Radinger, Belichten und Dämmen, Tageslicht- und Strahlungseintrag in Wohngebäuden nach thermischen Sanierungen, Postgraduale Master-Thesis am Department für Bauen und Umwelt, Donau Universität Krems, (2011)
- [23] W. Cornelius, Stand der nationalen und europäischen lichttechnischen Normung, 15. Anwenderforum Lichttechnik, Tagungsband S. 26-32, (2011)
- [24] RELUX Professional Version 2007-7.1, RELUX Informatik AG 1998-2007, Basel, Bezugsquelle aus dem Internet <http://www.relux.ch> (21.07.2008)
- [25] R. Hammer, P. Holzer, M. Nave, Entwicklung der Diagramme im Rahmen einer laufenden Postgraduale Master-Thesis am Department für Bauen und Umwelt, Donau Universität Krems, (2012)
- [26] T. Grabner, U. Frick Institut für Stadtplanung an der Universität Innsbruck mit dem Department für Bauen und Umwelt der Donau Universität Krems, Basissoftware Rhino 4.0, verlinkt mit dem Aufsatz Grasshopper und der Simulationssoftware Ecotect (2012) Entwicklung laufend,
- [27] M. Nave, R. Hammer, Entwicklung der Diagramme im Rahmen einer laufenden Postgraduale Master-Thesis am Department für Bauen und Umwelt, Donau Universität Krems, (2012)
- [28][29] M. Nave, R. Hammer, Entwicklung der Abbildungen im Rahmen einer laufenden Postgraduale Master-Thesis am Department für Bauen und Umwelt, Donau Universität Krems, (2012)

Weißer Leuchtstoff-basierte Hochleistungs-LEDs

**Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh, PD Dr.-Ing. habil. Peter Bodrogi,
Ms.Sc. Trinh Quang Vinh**

Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Darmstadt, Hochschulstraße 4A,
64289 Darmstadt

1 Einführung

Die LED-Technologie wurde industriell im Jahr 1962 von der Fa. General Electric in Form der roten Kleinleistung-LEDs eingeführt. Von da an bis 1994 gab es viele technische Fortschritte bezüglich Materialforschung und Prozessoptimierung, um farbige LEDs marktreif herzustellen. Diese farbigen LEDs wurden für Signalisierungszwecke in der Verkehrslichttechnik (Ampeltechnik, Signalleuchten für die Transportmittel wie Autos, Schiffe und LKWs), in der Konsumgütertechnik (Signallampen für Radios, Kühlschränke etc...) sowie teilweise in der Medizintechnik eingesetzt. Den großen technischen Durchbruch schaffte die LED-Technologie mit der Herstellung von den blauen Hochleistungs-LEDs im Jahr 1994 sowie mit der Erzeugung von weißen Hochleistungs-LEDs auf der Basis der blauen LEDs und dem gelben Leuchtstoff auf der YAG-Basis im Jahr 1997.

Mittlerweile ist die Entwicklung der LED-Technologie nicht nur eine Frage der Lichttechnik und der Halbleitertechnologie sondern eine gesellschaftliche Diskussion, denn damit verbunden sind die Fragen nach der Energieeffizienz in der Beleuchtung und nach der Umweltschonung. Die weiße LED hatte im Jahr 2006 eine Lichtausbeute von 23 lm/W und erreichte im Februar 2012 eine Lichtausbeute von 140 lm/W (kaltweiße LED, 350 mA, 60°C). Die warmweißen LEDs mit niedriger Farbwiedergabe (R_a -Werte um 65-70) haben eine Lichtausbeute von 110 lm/W. Generell gibt es folgende Tendenzen der Entwicklung, die sich bis 2020 fortsetzen werden:

- Durch die Verbannung der Glühlampen vom Markt in den wichtigen Regionen der Welt (die USA, EU-Bereich, China, Brasilien, Japan) werden verstärkt die LED-Retrofit-Lampen bei 2700-3000 K entwickelt und vermarktet. Da ist die Frage nach der Farbqualität (Farbwiedergabe, Brillanz, chromatische Helligkeit) und weniger nach der reinen Lichtausbeute (in lm/W) lauter. Die Lichtausbeuten der effizienten LED-Retrofit

Lampen liegen zurzeit bei 75-85 lm/W und sind bereits besser als die Kompaktleuchtstofflampen mit ihrer Lichtausbeute um 55-68 lm/W. Der Wohnraumbereich wird einen Fokus für den Einsatz der LED-Technologie bilden.

- Im Bürobereich gibt es bereits die leistungsfähigen T5-Leuchtstofflampen mit einer Lichtausbeute um 100-110 lm/W, mit moderater bis sehr guter Farbwiedergabe sowie mit einem bezahlbaren Preis. Die LED-Technologie wird hier in Form von röhrenförmigen Retrofit-LED-Lampen und von neuen designorientierten LED-Leuchten ihren Einsatz finden. Im Bürobereich und darüber hinaus im Hotelwesen, in der Verkaufsbeleuchtung und in der Industriebeleuchtung wird die LED-Technologie verstärkt eingesetzt werden, da einerseits die Lichtausbeute der LED-Komponenten sich noch weiter auf etwa 180 bis 200 lm/W entwickeln wird und andererseits die weltweite Leuchtenindustrie neue preiswerte, stabile und intelligente LED-Leuchten herstellen wird. In diesem Bereich kommen die Merkmale wie Farb- und Lichtqualität und gesundheitstechnische Aspekte der Beleuchtung zur Geltung.

- Die LED-Straßenleuchten erreichen heutzutage einen sehr guten Wert der Lichtausbeute von 95 lm/W, die dann dank der weiteren Entwicklung der LED-Bauelemente auf etwa 125-130 lm/W ansteigen wird, wogegen die Lichtausbeute der sehr guten und effizienten konventionellen Leuchten mit moderner Optik und EVGs etwa bei 80 lm/W liegt. Die LED-Leuchtentechnologie wird in der kommunalen Straßenbeleuchtung ihre Leistungsfähigkeit bezüglich Preisgestaltung, Langzeitstabilität, Austauschbarkeit, Blendung beweisen müssen, bevor sie in der Breite eingesetzt werden können.

Im Bereich der Wohnraumbelichtung, Industriebeleuchtung, Bürobeleuchtung, Verkaufsbeleuchtung, Beleuchtung für die Hotel- und Erholungsräume wird es demnächst eine Verschiebung der Diskussionsschwerpunkte von der Lichteffizienz zur Langzeitstabilität und Farbqualität geben. Die Lichtqualitätsmerkmale wie Lichtrichtung, Schattigkeit, Beleuchtungsniveau, Körperwiedergabefaktor, Leuchtdichtevertelung auf den beleuchteten Flächen (Wände, Arbeitsebene) und die Blendung sind zum einen die Eigenschaften der Leuchten selbst (Lichtstrom, Lichtstärkeverteilungskurven) und zum anderen abhängig von der Anordnung der Leuchten im Raum und von der

Beschaffenheit der Raumgegenstände. Das sind die Merkmale, die in den letzten Jahrzehnten untersucht wurden und in den gültigen Normen definiert sind.

Die Forschung zu den Farbqualitätsmerkmalen der optischen Strahlung und des sichtbaren Lichts wie Farbwiedergabe, Farbpräferenz, Farbharmonie, Farbgamut (Volumen der darstellbaren Farben bei einer bestimmten Lichtart), Brillanz, optische Klarheit, Farbdifferenzierbarkeit (Farbkontrast) ist noch sehr jung und wird u.a. an der TU Darmstadt derzeit visuell und analytisch intensiv untersucht. Die gesundheitstechnischen Aspekte der optischen Strahlung und des sichtbaren Lichts sind Gegenstände der Forschung vieler Forschungsinstitute und Universitäten weltweit. Während die Grundlagenforschung bereits sehr viele auswertbare Ergebnisse liefert, müssen diese lichttechnischen und gesundheitstechnischen Wirkungen im Feldtest (in den Büros, in den Industriehallen, in den Schulen und Kliniken, in den Seniorenheimen) über längere Zeit und mit einer großen Anzahl an Testpersonen noch klarer und mit nachvollziehbarer Statistik nachgewiesen werden.

Die Farbqualität und die gesundheitstechnischen Aspekte haben nicht nur ihre Basis im Beleuchtungsniveau, sondern viel mehr in der spektralen Zusammensetzung der Lichtquellen. Im Gegensatz zu den bisherigen Lichtquellentechnologien (Glühlampen, Entladungslampen) kann mit der Technologie der weißen und farbigen LEDs ein großer Bereich der spektralen Verteilungen der LED-Lichtquellen gewonnen werden. Das ist der Inhalt des vorliegenden Aufsatzes und des Vortrags auf der Tagung „Licht und Gesundheit“ in Berlin 2012.

2 Entwicklung der weißen LEDs

In den letzten 18 Jahren gibt es einige Leuchtstoffsysteme die gemeinsam mit der blauen LED-Strahlung das weiße LED-Licht mit sehr unterschiedlichen Farbwiedergabeindizes erzeugen. Von 1994 bis etwa 2008 sind die Leuchtstoffsysteme auf der Basis der YAG-Zusammensetzung oder BOSE-Zusammensetzung oft verwendet. Die Vorteile des YAG-Leuchtstoffsystems sind:

- Sehr hohe Langzeitstabilität, hohe thermische Stabilität
- Kleine Farbortänderung bei Temperaturänderung

- Hohe Lichtausbeute, da das Maximum des Spektrums des Leuchtstoffes um 560-565 nm und sehr nah dem Maximum der $V(\lambda)$ -Funktion (555 nm) liegt.

Mit einem blauen Chip und mit dem YAG-Leuchtstoff kann man nur warmweiße bis kaltweiße LEDs mit einem maximalen Farbwiedergabeindex R_a von 80 (in der Regel nur bis 78) mit einem speziellen Farbwiedergabeindex R_9 für die gesättigte rote Farbe von -50 bis etwa +20 herstellen, so dass diese LEDs eher für die Straßenbeleuchtung und für die Innenraumbeleuchtung mit moderater Anforderung an die Farbwiedergabe (Parkbeleuchtung, Lagerbeleuchtung, etc...) eingesetzt werden. In der Abbildung 1 werden die Spektren der kaltweißen LEDs auf der YAG-Basis dargestellt.

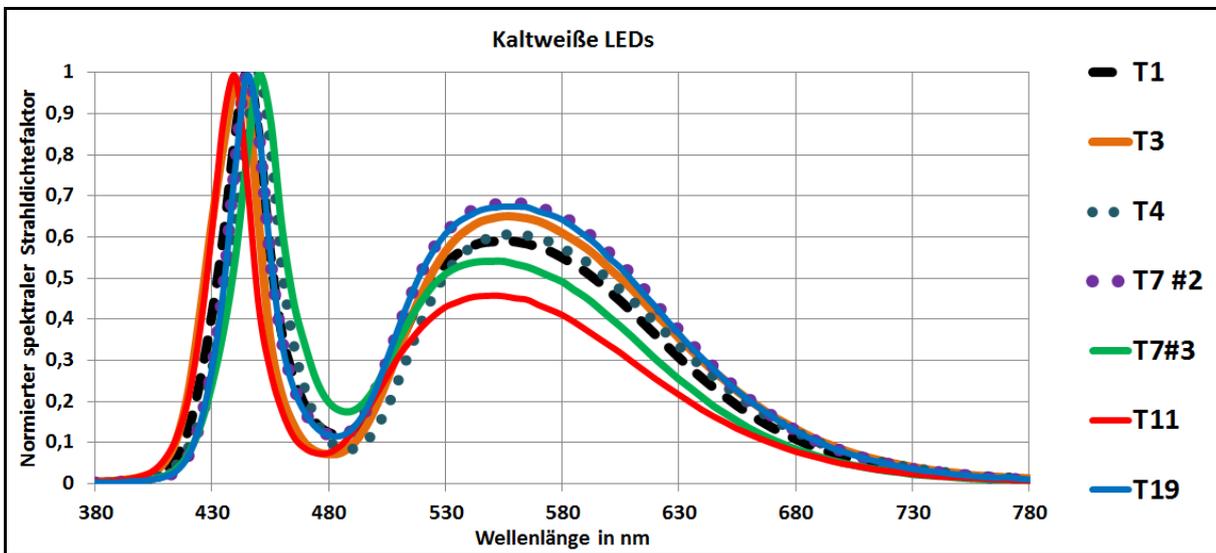


Abb. 1: Relative Spektren der kaltweißen LEDs (nach [1])

Um die neutralweißen LEDs im Farbtemperaturbereich von 3800 K bis 4900 K kommen ebenfalls die YAG-Leuchtstoffsysteme mit einem generellen Farbwiedergabeindex R_a unterhalb 80 oder die orangenen Leuchtstoffsysteme mit einem Maximum um 600-610 nm (s.T16 in der Abbildung 2) für einen generellen Farbwiedergabeindex um 82 zum Einsatz ($R_9= 26,6$).

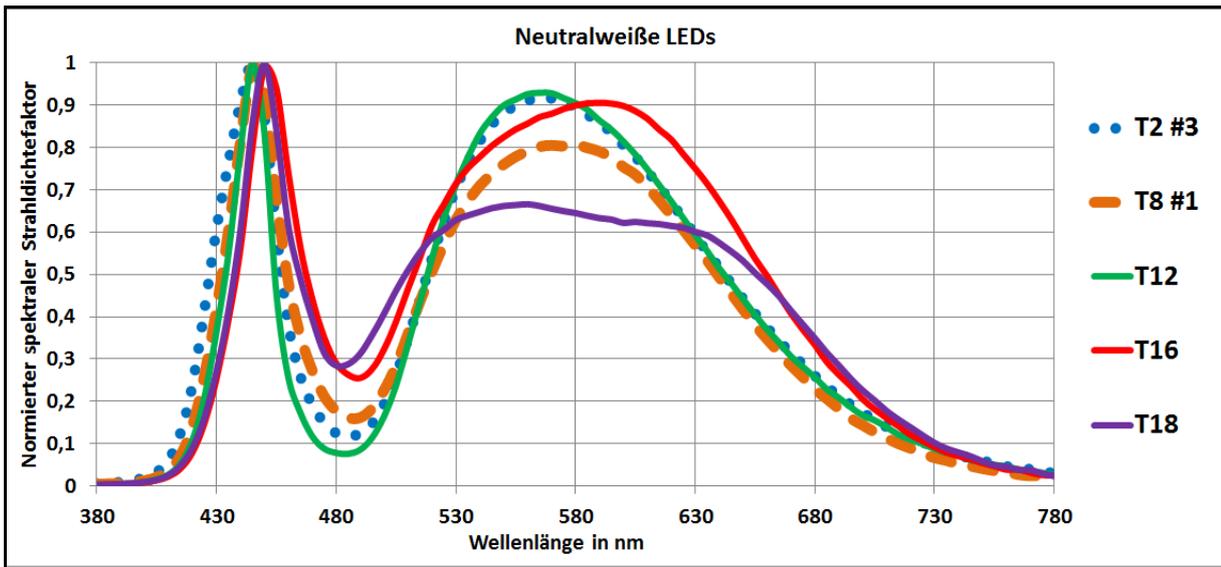


Abb. 2: Relative Spektren der neutralweißen LEDs (nach [1])

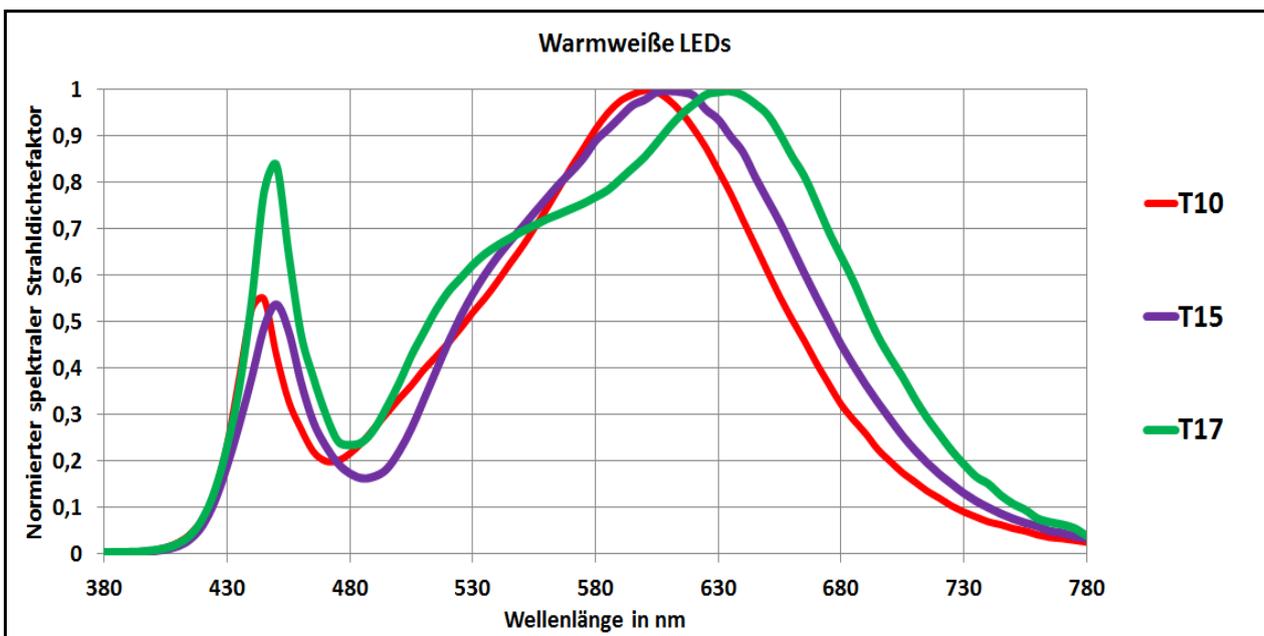


Abb. 3: Relative Spektren der warmweißen LEDs (nach [1])

Um sehr gute Farbwiedergabeindizes für effiziente weiße LEDs zu erhalten, werden in den letzten Jahren 3 Entwicklungsrichtungen besprochen:

- a) Weiterentwicklung der YAG-Leuchtstoffsysteme für das gelbe Licht (maximale Wellenlänge um 565 nm). Diese Entwicklungsarbeiten sind an einigen internationalen Universitäten und Konzernen, u.a. am Lehrstuhl für Lichttechnik

der TU Darmstadt, durchgeführt und werden auf der Lichttagung der vier deutschsprachigen Länder in Berlin 2012 präsentiert werden.

- b) Entwicklung von roten Leuchtstoffsystemen die widerstandsfähig gegenüber der Feuchtigkeit und Wärme sind und ein Maximum um 630 nm bis 645 nm aufweisen (s. T17 in der Abb. 3 und T18 in der Abb. 2).
- c) Entwicklung von grünen und cyanen Leuchtstoffsystemen mit einem Maximum um 520 nm und 530 nm (s. T17 in der Abb. 3 bei 530 nm).

Die Schritte b) und c) und deren Mischungen sind zum Teil abgeschlossen, zum Teil noch zu optimieren und legen die Grundlagen für einen generellen Farbwiedergabeindex R_a von über 90, um Verwendungen in der Hotel- und Verkaufsbeleuchtung (z.B. Empfangsbereiche, Autosalons, Shops, Lebensmittelbeleuchtung, Restaurants), in der Film- und Fernsehindustrie (Filmstudio), in der anspruchsvollen Bürobeleuchtung (Besprechungsräume, Präsentationsräume) sowie im Wohnraumbereich zu finden.

Generell besteht zwischen der Farbwiedergabe und der wahrgenommenen Helligkeit (chromatische und achromatische Helligkeit zusammen) für alle Farben kein Zusammenhang. Speziell für rote Farbtöne (rote Tomaten, rote Paprika, rote Blumen, Salami, rote Textilien...) kann man dennoch einen guten Zusammenhang herleiten (s. Abb. 4). Das bedeutet, dass man generell für rote Farben, die in unserer Umwelt oft vorkommen, eine größere Helligkeit wahrnimmt, wenn die weißen LEDs einen hohen speziellen Farbwiedergabeindex für die roten Farben aufweisen. Es lohnt sich deshalb, die Farbqualität der weißen LEDs zu optimieren.

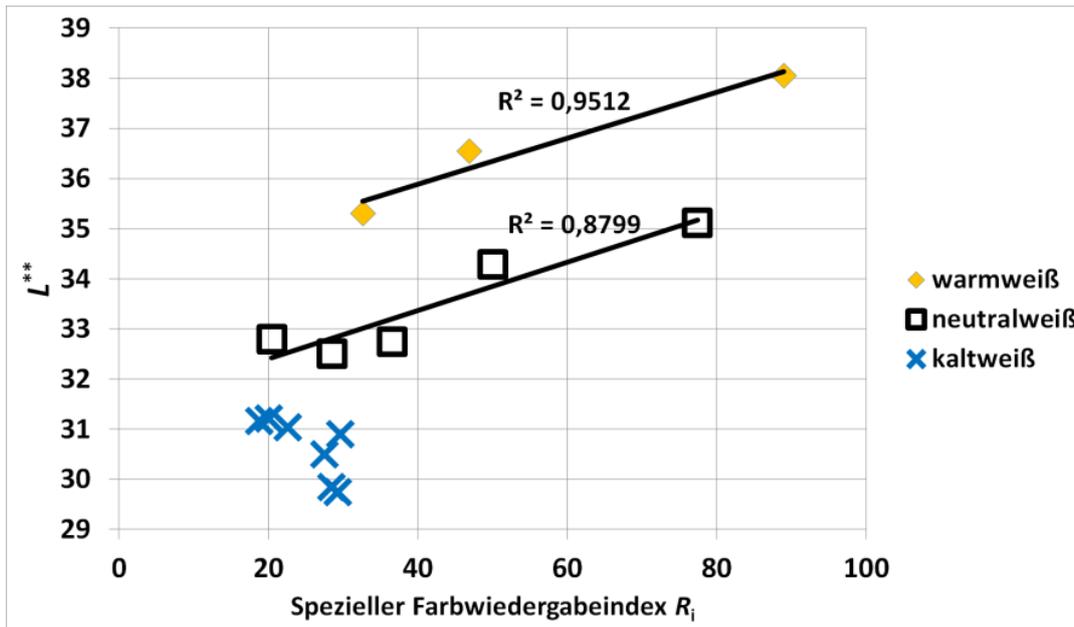


Abb. 4: Zusammenhang zwischen der Farbwiedergabe und Helligkeit roter Farbtöne am Beispiel einer roten Rose (nach [1])

3 Circadiane Qualität

Mit der Kenntnis über Farbqualität, deren Entstehung als Interaktion zwischen den Lichtquellenspektren und Materialreflexionseigenschaften, die dann in der Farbverarbeitung im menschlichen Sehapparat den Abschluss findet, sowie über die Wirkungen zwischen Licht und Gesundheit, die seit dem Jahr 2000 intensiv in den Grundlagenlaboren untersucht sind, kann man in einem universitären Forschungslabor das Spektrum der weißen LED analysieren oder in einem chemischen Labor optimieren.

Es gibt einige Definitionen, wie man die sogenannte circadiane Wirksamkeit charakterisiert und quantitativ beschreibt. Die Autoren dieser Arbeit verwenden das analytische Modell von M. Rea et al. (s. [2]).

Die folgenden Qualitätsparameter sind zurzeit an der TU Darmstadt verwendet, um die weißen LEDs zu charakterisieren:

- Die circadiane Aktivität (Abkürzung CS) nach M. Rea [2]
- Die visuell wahrgenommene Helligkeit, die nach Ware-Cowan mit Hilfe des numerischen Korrelats $L_{äq}$ beschrieben wird (sog. äquivalente Leuchtdichte, nicht zu verwechseln mit der photopischen Leuchtdichte)

- S/P-Verhältnis (skotopischer Anteil zum photopischen Anteil eines Lampenspektrums)

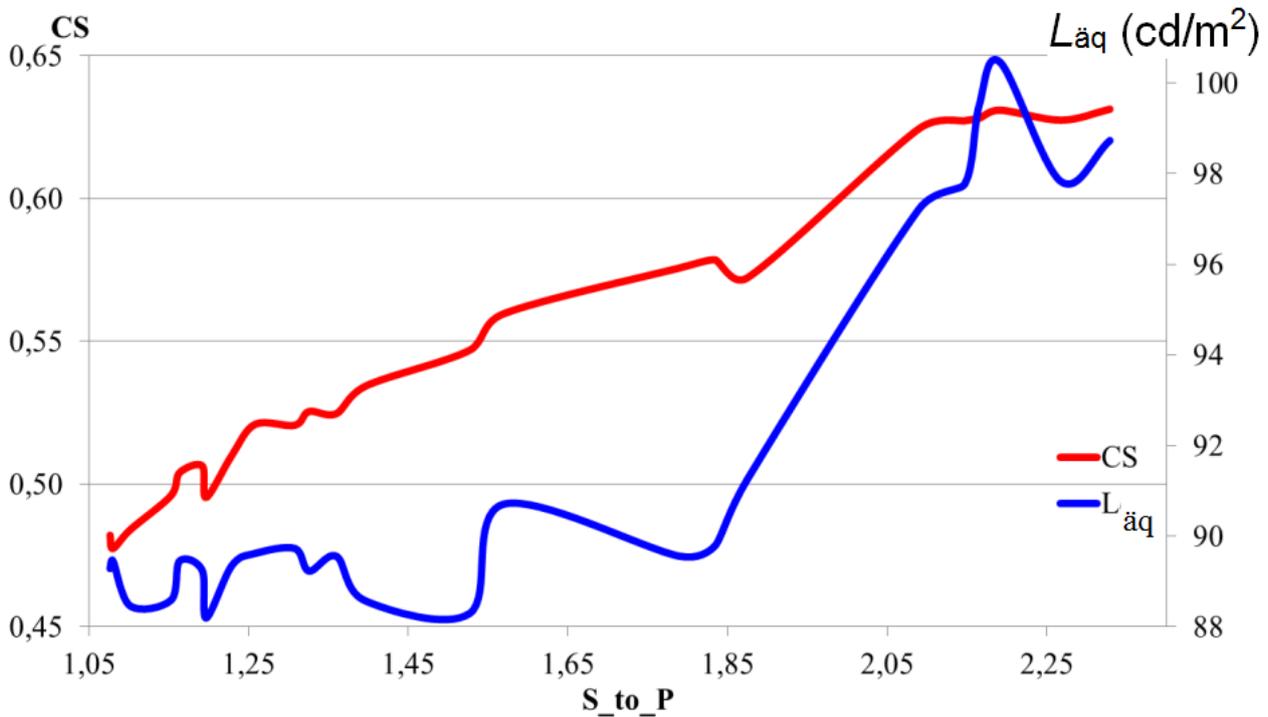


Abb. 5: Beziehung zwischen CS [2], S/P und $L_{\text{äq}}$ der untersuchten weißen LEDs

Bei einer photopischen Leuchtdichte von 100 cd/m^2 (äquivalent zu einer Beleuchtungsstärke von 650 lx bei den Gegenständen mit einem diffusen Reflexionsgrad von etwa $0,5$) wurden für mehr als 30 LED-Lichtquellen mit $80 < R_a < 100$, $R_g > 0$ und $2600 \text{ K} < T_c < 6200 \text{ K}$ untersucht. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 5 veranschaulicht. Wenn der S/P-Quotient ansteigt, nimmt die circadiane Aktivität CS auch zu. Diese Kenntnis ist nicht neu (bereits bei den konventionellen Lichtquellen bekannt). Wenn man den S/P-Quotienten erhöht, steigt die wahrgenommene Helligkeit $L_{\text{äq}}$ bei derselben photopischen Leuchtdichte von 100 cd/m^2 von 88 auf etwa 100 an. Das ist eine interessante Feststellung, die einen relativen Zuwachs von 13% (von 88 zu 100) bedeutet.

Literatur

- [1] T.Q.Khanh, P.Bodrogi: Farbwiedergabe-und Helligkeitswahrnehmung von weißen Leuchtstoffkonvertierten Hochleistungs-LEDs in der Innenraumbeleuchtung, Zeitschrift Licht, H.10 (2011).
- [2] Rea MS, Figueiro MG, Bierman A, Bullough JD, Circadian light, Journal of Circadian Rhythms (<http://www.jcircadianrhythms.com>) 8/2, pp. 1-10 (2010).

Psychophysiological Measurement and Simulation of Photopic and Mesopic Vision

Werner Backhaus

Technische Universität Berlin and Freie Universität Berlin, AG Psychophysiology,
Flachbau HFT-CO, Einsteinufer 25, 10587 Berlin

1 Introduction

A new psychophysiological measurement system for photopic and mesopic vision is being developed that will finally allow us to measure the spatial and spectral intensity distributions ($\text{photons} / \text{s} / \lambda / \text{cm}^2$), emitted or reflected by natural and artificial scenery, and to predict subjective judgments of individual observers by psychophysiological adequate models. The core of the most sensitive light measurement system is a spectral CCD camera that allows the determination of a spectral light intensity distribution per pixel, each over a wavelength range of 380 nm - 825 nm in 0.6 nm steps. The objective provides, over a vertical range of 1392 pixel, a resolution $\leq 1'$, comparable to the best spatial resolution of the center part (fovea) of the retina in the human eye. An additional frog-eye objective has a vertical acceptance range of about 180° for the same number of pixels, i.e. with a somewhat cruder resolution. The latter will be used for determining the overall light that enters the eye, determining the adaptation state of the eye and thus of the visual system. The camera is mounted on an angular positioning device, driven by two fine-graded stepping motor in horizontal and vertical direction. The camera can be rotated with the same spatial resolution $\leq 1'$, almost in the range of $0^\circ - 360^\circ$. So the spectral camera measures for each horizontal position, simultaneously for the 1392 vertical pixels of the CCD matrix, the intensity values at 850 wavelengths (see Backhaus, this volume [1]). The camera can be set at the position of the eye of an observer, with the lens of the objective looking in the same direction as the lens of the eye. In this case, the measured spatial and spectral light intensity distributions are determined that enter the eye with the vertical and horizontal angles θ, φ . A self-written program derives a black & white or an RGB-picture from the measured data. A special cursor allows to select and mark pixels of interest in the picture. The related spectra are displayed and stored for further processing [1].

The measured light intensity distributions are the input to the visual system, via the retina of the eye. The respective subjective judgments of the individual observer, e.g. to light differences, are the output. The visual system is well described by psychophysiological models, taking measured neuronal properties into account, as well as psychophysical judgment and decision making processes (see Backhaus, 2008) [2, 3]. The models are being extended now from photopic light levels (daylight vision) to mesopic light levels at dawn. This makes it necessary to gauge the models for absolute light intensity. The results of respective discrimination experiments for absolute (against darkness) and incremental thresholds, performed with individual observers with one and the same equipment (see Krensel, Backhaus, this volume) [5], will be very useful in this respect. The models are being extended, in addition, to the spatial (light patterns) domain (see Burmeister, Backhaus, this volume) [6] and to the temporal domain, including flicker light, as well as spatial and temporal adaptation effects [5, 6]. The achieved models will finally be combined with the spectral camera system, described above, to a spectral camera system that not only measures light as the human eye, but in addition, adapts in the simulations the physiological models to the overall light of the scenery and subjectively judges the temporal light patterns according to the psychophysical models. In the following, the development of the method of psychophysiological modeling and simulation will be shortly discussed and illustrative results will be presented.

2 Historical notes

In 1802, Young postulated for color vision the existence of three types of light resonators in the human eye. v. Helmholtz (1850) specified these resonators further to be three spectral types of photoreceptor cells (cones) in the retina of the human eye (Young-Helmholtz theory). Grassmann (1853) formulated the linear light-mixture laws for lights that are physically different, but look identical (metameric lights), and presented a vector calculus for visualizing the mixture laws in a chromaticity diagram. His mathematical model describes human color vision approximatively for small light intensity differences. This is sufficient, when e.g. natural surfaces are compared, because their reflectance varies from black to white only over the small range of 0.05 - 0.85, i.e. 1.2 log intensity units. This range is quite small compared to the intensity range from the absolute threshold of our eyes to bright sunlight, which spans about 12 log intensity units. Maxwell (1869) realized temporal additive color mixtures by

adjustable reflecting colored plates on his rotating color wheel, and gauged the spectral curve in the color triangle. v. Kries (1894) postulated that scotopic (low light) vision is due to a fourth type of photoreceptors (rods) in the retina of the human eye and formulated the duplicity theory. v. Helmholtz (1896) extended the chromaticity diagram for photopic vision to a three-dimensional light-mixture space. These historical concepts provided the basis for the modern CIE-1931 chromaticity diagram and related color spaces.

2.1 Grassmann-Helmholtz model

In the linear Grassmann-Helmholtz model, the chromaticity coordinates p are derived by normalization from the tristimulus values P , i.e. from the weighted light intensities of the three basic lights, used for additive light mixture:

$$p_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^3 P_i} \quad (1)$$

The chromaticity coordinates of the color plane are, in the model, totally independent of changes n in total light intensity $\sum P_i$.

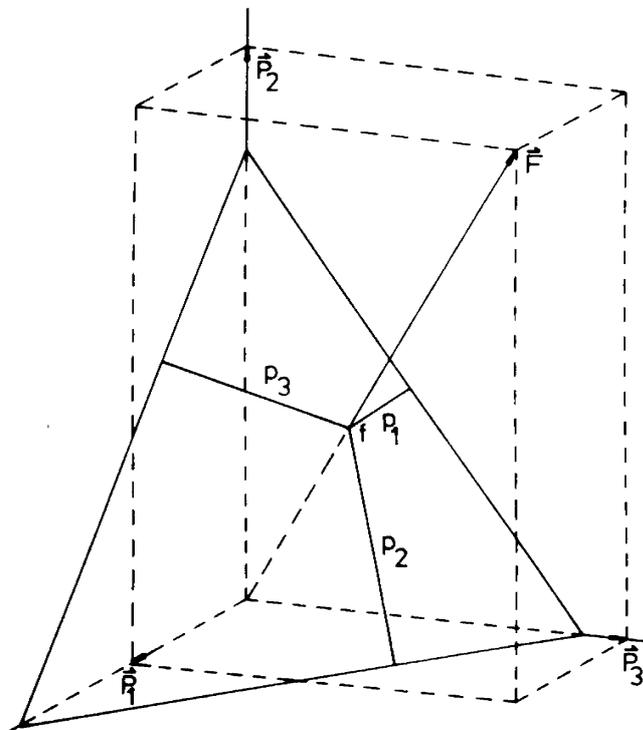


Fig. 1 Chromaticity plane as a section through the light mixture space. The chromaticity coordinates p are obtained by normalization of the weighted intensities P of the basic lights used for additive mixture. [4].

2.2 Psychophysiological model of color vision in bees

When I began my Ph.D., in 1982, as a trained physicist, in Neurobiology on “Color vision in bees”, two complementary Textbooks of two physicists were introductive to both fields:

- 1) M. Richter, 1981. Einführung in die Farbmeterik (Introduction to Color metrics) [7].
- 2) R.W. Rodieck, 1974. Vertebrate Retina: Principles and Function [8]

The messages were: 1) the black-box with light as the input and the judgments of the observer as the output is mathematically well described by color metrics. 2) Neurophysiology measured the electrical activity of neurons involved in the visual process, but the exact wiring is still unknown. 3) Therefore, the straightforward strategy for my Ph.D. became: fill the black-box by a network of models of the known respective neuron types, fill the gaps with mathematical functions, and find the correct wiring by trying out in computer simulations. Thus, in a first trial, a wiring was tried out that strictly realizes the mathematics of normalization of the primaries P by normalization to their total (equ. 1) to receive the chromaticity values p (see **Fig. 2**).

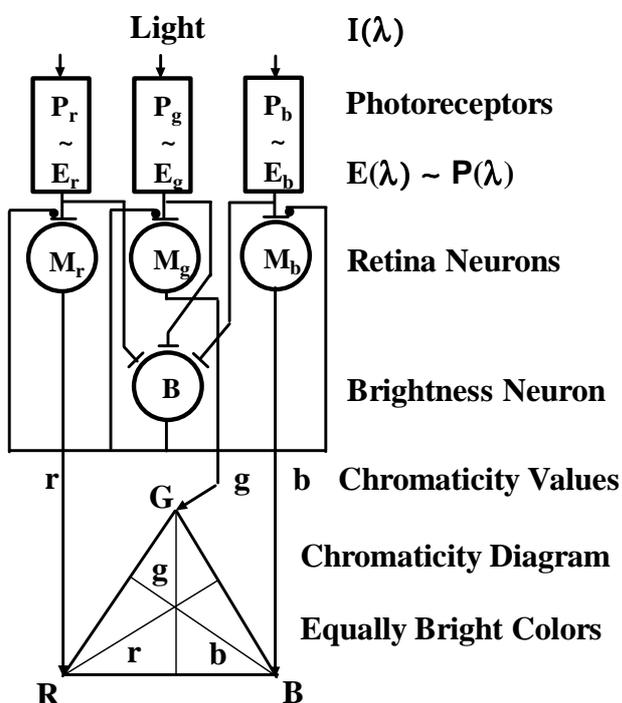


Fig. 2 First trial (1982) to realize the linear Grassmann-Helmholtz model in terms of a neurobiological photoreceptor and neuron model. The mathematical model could not be realized by a neurobiological adequate model that takes properties measured photoreceptor cells and neurons into account. [9]

The linear mathematical model assumes: 1) that the photoreceptor would linearly code the absorbed and transduced photon flux. The phototransduction function actually begins linear at lower light intensities, but becomes more and more nonlinear, finally saturating at higher light intensities. 2) A dividing synapse would be needed for performing the normalization. Such special synapses exist only in form of rare double synapses, performing so called presynaptic inhibition. Those synapses have not been reported to exist in a visual system. 3) The feed-back loop must be very fast, otherwise delays or resonance phenomena would occur, which have not been reported. Neuroanatomy had also not found any indications for such feed-back loops. 4) Last not least, brightness is not linearly related to light intensity, because of the nonlinearity of the photoreceptors. Thus, it must be concluded from these very first, thus negative results, that the mathematical Grassmann-Helmholtz model is a good approximation, but is not 1:1 realized in our visual system.

The Theory of Color Vision and Color Choice Behavior of the Bee

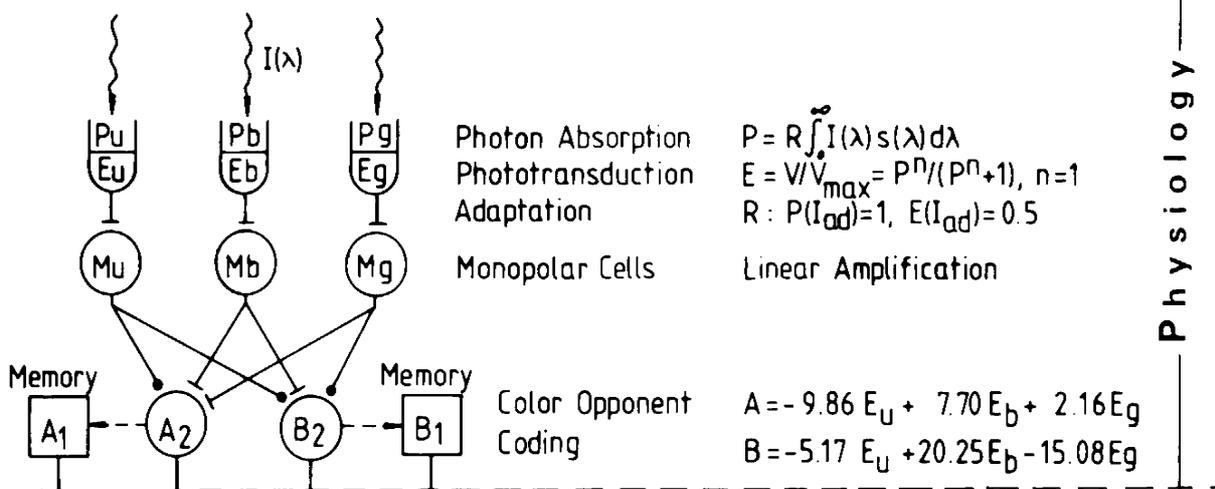


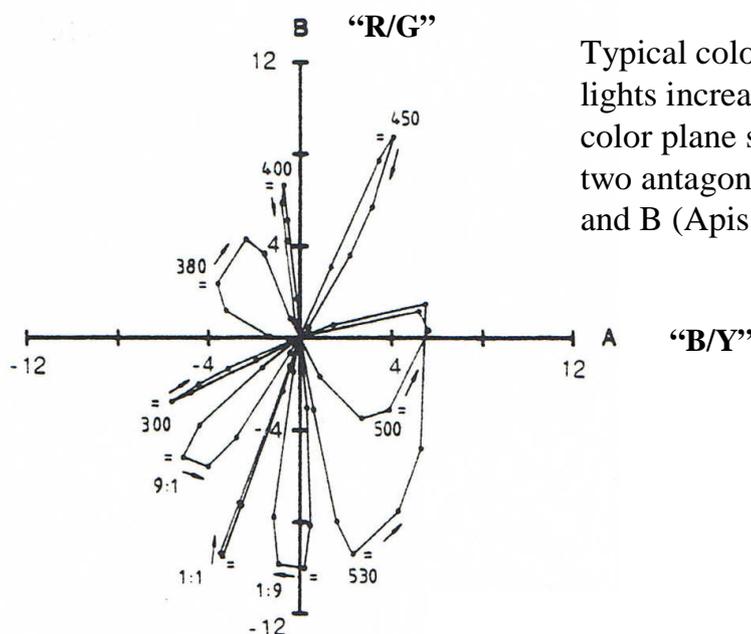
Fig. 3 Physiological part of the psychophysiological model for the bee, describing the linear mixture of lights at the level of photoreceptors and the equidistant color similarity space as spanned by two types of color opponent coding neuron types, which are nonlinearly related to the excitations of the photoreceptors. The coordinates A and B of the color space do not depend on light intensity in the middle intensity range (exact subtraction of logarithms of intensity), but depend the more on light intensity the less or more intense the light becomes relative to the middle intensity range.

The next model then started more successful from measured properties of photoreceptor cells and known neurons recorded from the simpler brains in insects, especially bees. Additional guidance came from Schrödinger (1920) who distinguished 1)

lower color metrics, i.e. additive light mixture (physics), metameric lights, Grassmann-Helmholtz model, and chromaticity diagrams, and, on the other hand, 2) higher color metrics, i.e. color difference, color similarity, non-Euclidean line-elements (Riemann, Helmholtz, Schrödinger), and color difference formulae (e.g. Lab, Luv). Thus, color differences cannot be derived directly from a chromaticity diagram that realizes linear mixture rules. The physiological model, finally derived for the bees 1) realizes the linear light mixture rules at the level of the photoreceptors, and 2) provides an equidistant subjective color space, spanned by the excitations of the two types of color opponent coding (COC) neurons. This type of neurons was shown, meanwhile, by electrophysiological recordings, by several authors in several animals, last not least also in the retina of the human eye.

2.3 Bezold-Brücke effect

A general property of color opponent coding systems is that intensity dependent color shifts are an unavoidable consequence of the nonlinear transduction process in the photoreceptors. **Fig. 4** shows that the effect is quite dramatic, and depends on the wavelength.



Typical color shifts for monochromatic lights increased from dark to bright, in a color plane spanned by the excitations of two antagonistic coding neuron types A and B (*Apis mellifera* worker bee).

Fig. 4 Intensity dependent color shifts (Bezold-Brücke effect) occur wavelength specific, more or less pronounced. The arrows indicate increasing light intensity. The axes give the excitations of the COC neurons that span the equidistant two-dimensional color space, which allows the derivation of color discrimination values via a metric.

2.4 Psychophysiological model of photopic and mesopic vision in man

The COC model of color vision of the bee was then used, with modifications, for the description of major aspects of the neuronal color coding (CC) / elementary color (EC) sensations of man. **Fig. 4** shows the major physiological and psychophysical components of the interrelated models. For a more detailed description see [2]. This model is being extended now to the spatial and temporal domain. The final model will be combined with the spectral camera system, described above.

3 Results

Psychophysiological simulations with the psychophysiological CC / EC models of classical experiments have been performed, i.e. Bezold-Brücke effect, CIE-1924 $V(\lambda)$ -function, wavelength-discrimination-, and color-saturation-curves. A comparison of measured data and data of the respective simulations show the predictive power and, therefore, the psychophysiological adequateness of the neuronal color coding (CC) / elementary color sensation (EC) models.

3.1 Differences of individual observers

In the classical hue cancellation experiments of Jameson & Hurvich (1955) [10], the data of observer I deviate from that of observer II, as discussed in the publication. This is, although both observers were classified as normal trichromates, but deviated in the wavelengths at which pure elementary colors were seen. The CC / EC model fitted the results of both experiments equally well, with comparable neuronal parameters, up to statistical variations. Exclusively, the synaptic parameters of one of the color opponent coding (COC) neurons appeared to be swapped, i.e. an inhibitory, and an excitatory synapse appear to be exchanged. This might well be due to a widely known genetically swapping of two genes. This demonstrates not only the physiological adequateness of the presented models, but shines a new light onto the historical dispute between the physiologists Helmholtz, and Hering on color vision. Helmholtz successfully explained usual color vision deficiencies by the lack of a photoreceptor spectral type. Hering, on the other hand, could not show comparably obvious effects, due to modifications of the color opponent coding neurons, he suspected to exist. From the psychophysiological simulations it becomes obvious (see **Tab.1**) that the effect of swapping two synapses of different sign is indeed less dramatic than the lack

of a photoreceptor that affects the information processing of several neurons. **Tab. 1** shows the obtained synaptic weights of the CC model. For respective curves, a detailed discussion, and further references see [2].

General Properties of Photopic and Mesopic Color Vision

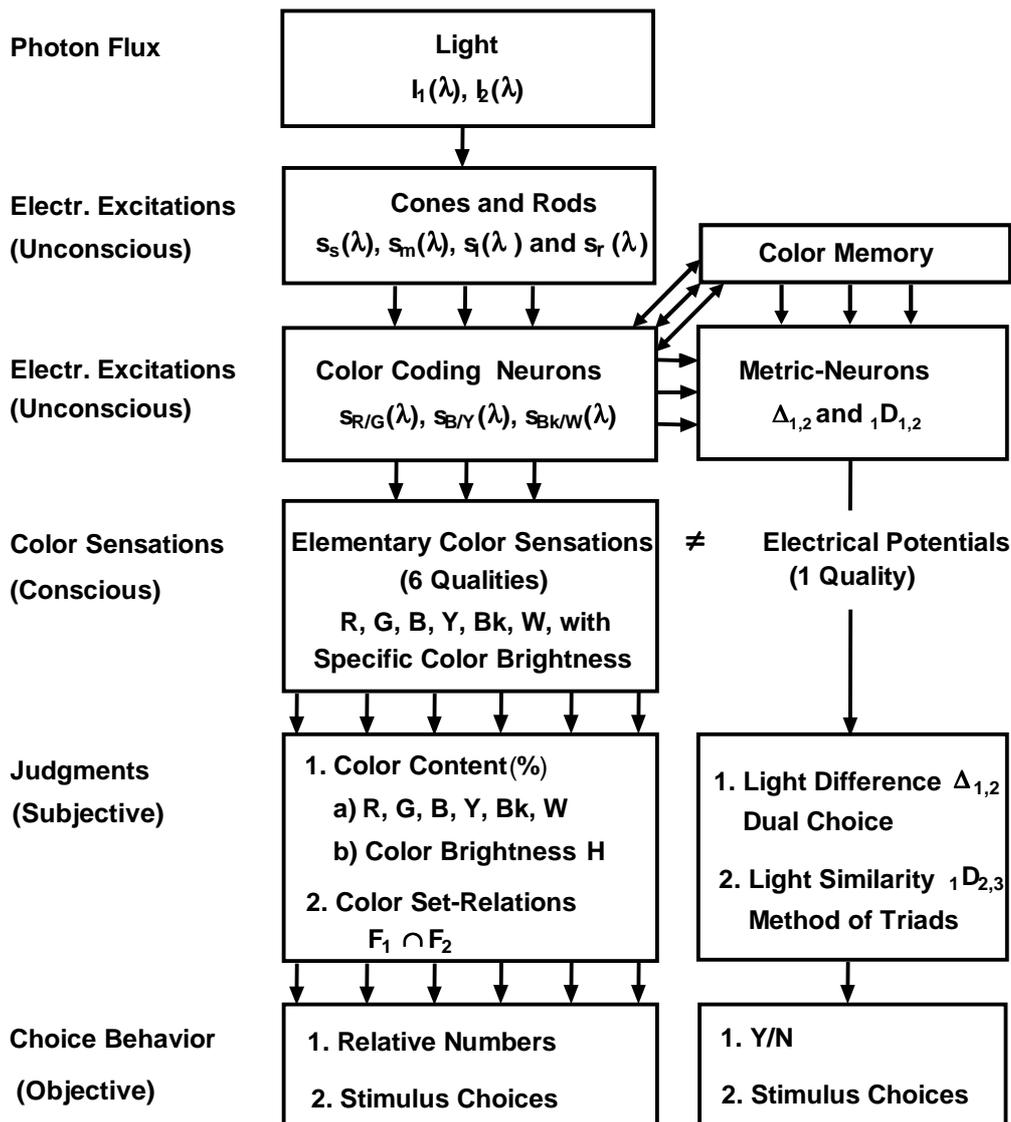


Fig. 5 Scheme of the psychophysiological model of photopic and mesopic vision of man. Color discrimination and color similarity judgments turned out to be related to the unconscious electrical excitations of the color coding (CC) neurons, whereas content analytical judgments are related to the elements (elementary colors), and secondary qualities (e.g. specific brightness of elementary colors) of the conscious color sensations.

Parameters	Simulation I	Simulation II	Initial values
a_S	-0.22	-0.18	0.0000
a_M	0.90	1.03	1.0000
a_L	-0.68	-0.85	-1.0000
Σ	0.00	0.00	
b_S	0.69	0.89	1.0000
b_M	-0.78	0.12	-0.5000
b_L	0.09	-1.01	-0.5000
Σ	0.00	0.00	

Tab. 1 Parameter values of the COC model determined in the simulations of the hue cancellation experiments of Jameson & Hurvich (1955) [10] for two observers (I and II) with the psychophysiological CC / EC model of human color vision, via best fits of the predicted, and the measured chromatic valence or response curves (see text). The double-arrow indicates the obvious swapping of inhibitory and excitatory synapses in observer I, compared to observer II, who has a most common trichromatic color vision system. [2].

3.2 CIE-1924 $V(\lambda)$ -function, with Judd-correction

Fitting of the CIE-1924 $V(\lambda)$ -function with the CC / EC model turned out not to be perfectly possible, whatever parameter settings were tried. There remained always a smaller misfit at the shorter end of the wavelength scale or close to the maximum, or a combination of both. Judd found much earlier that the $V(\lambda)$ -function needs to be corrected in the range of shorter wavelengths. The $V(\lambda)$ -function with the Judd correction was straightforward fitted by the CC / EC model as shown in **Fig. 6**. This result, furthermore, demonstrates the physiological adequateness of the CC / EC model.

3.3 Wavelength-discrimination

The classical wavelength-discrimination curve of an individual observer, measured by Wright and Pitt (1934) [11], was straightforward fitted by a simulation of the experiments with the CC / EC model. The spectral lights were adjusted in the experiments for equal brightness, before the wavelength discrimination curve was measured. The explanation of such experiments is non-trivial, because brightness is a secondary quality of color, i.e. described in the CC / EC model as the total sum of the specific brightness values of the elementary colors, weighted by their amounts in the color sensations. Wavelength discrimination, on the other hand, is related to the electrical excitations of the COC neurons, and the metric of color space, spanned by the excitations of these neurons. Thus, these fits (see **Fig. 7**) positively tested several aspects of the CC / EC model (**Fig. 5**) simultaneously.

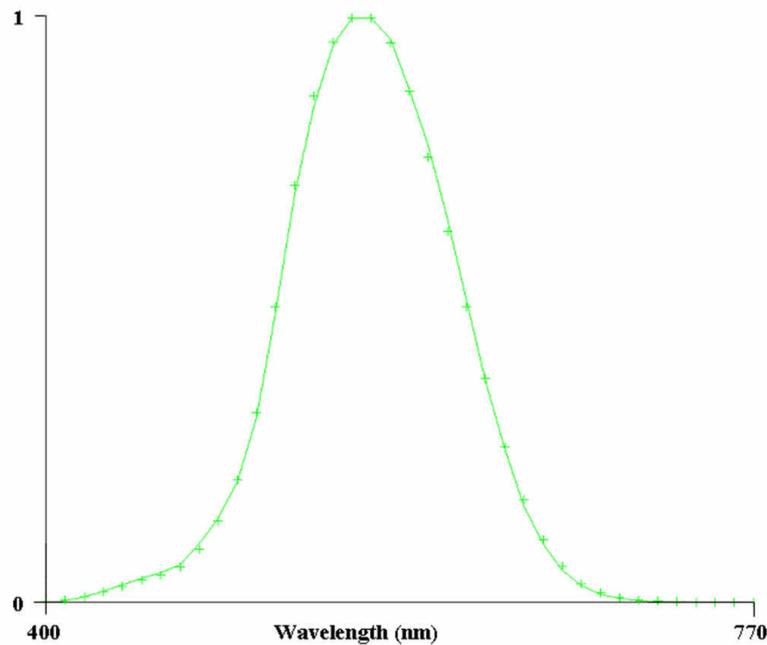


Fig. 6 $V_Q(\lambda)$ -curve (CIE, 1924) with Judd-correction for physiological adequateness (+), compared to the curve of a simulation of the measurements, with the CC / EC model. The fit is striking. [13].

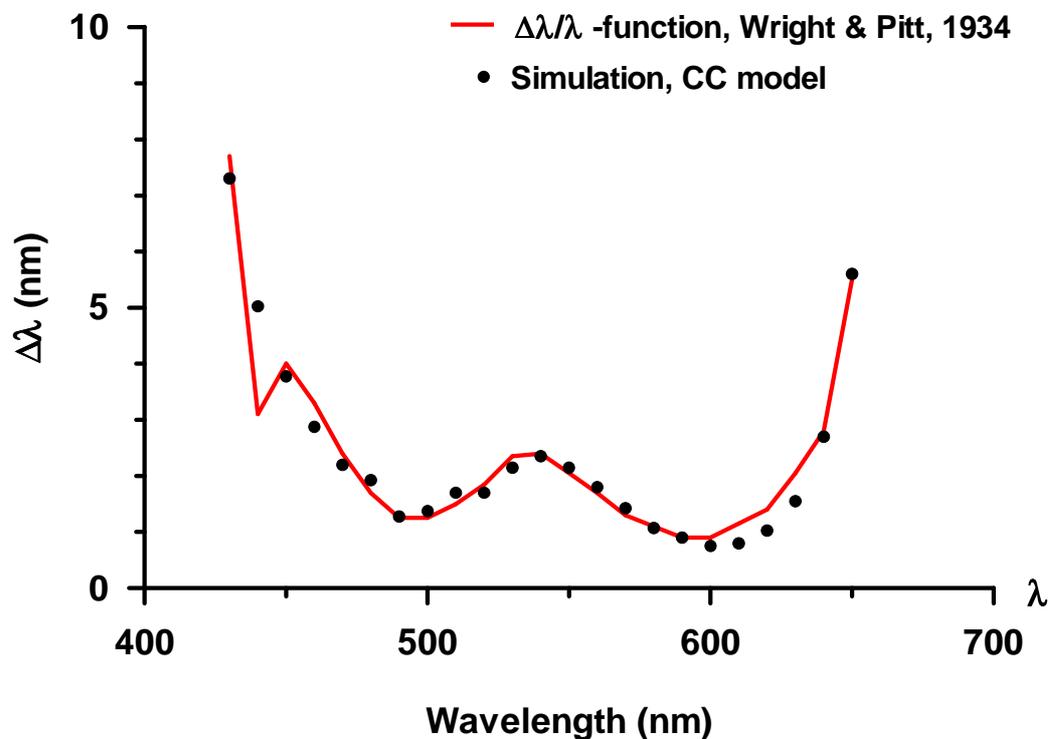


Fig. 7 Comparison of the wavelength discrimination data of Wright and Pitt (1934), connected by straight lines and the simulation of this experiment with the CC / EC model. The fit is quite good, especially in respect to the complexity of the experiment and the different judgment types involved. (See text).

3.4 Color saturation of monochromatic light

The saturation of a color, i.e. the total amount of achromatic elementary colors in a color sensation, was measured for several wavelengths of the visible spectrum by Jacobs (1967) [12]. The monochromatic lights were adjusted to equal intensity of 66 mL (milli-Lambert). The observer judged the saturation by estimation of the gray content of the sensations, caused by the monochromatic lights (see **Fig. 8**). The fit of the simulation of the experiment, with the CC / EC model, to the measured data, is quite striking, despite the small statistical spread of the measured data.

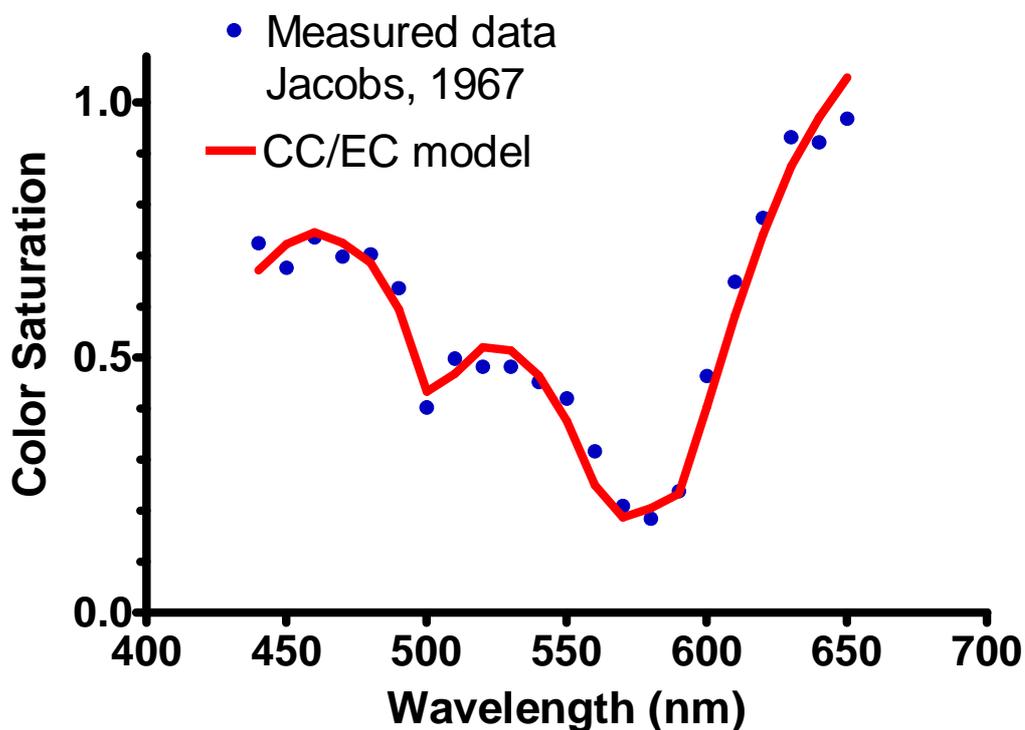


Fig. 8 Comparison of the estimated saturation values for monochromatic lights of an intensity of 66 mL, and the predicted values of a simulation of the experiment, with the CC / EC model. The match is striking, despite the small statistical spread of the measured data.

4 Conclusions and Outlook

The discussed results clearly demonstrate that the psychophysiological CC / EC model precisely describes many aspects of our visual system. 1) Since the model describes additional data, for which the model was not originally developed, the model obviously has predictive power. This shows the psychophysiological adequateness of the model in all the aspects described in **Fig. 5**. Furthermore, 2) the psychophysiological adequate models can not be fitted to average data of different obser-

vers. This is because mathematical averages do not necessarily correspond to possible real neuronal system. Different experiments must thus be performed with individual observers and, at best, with one and the same multipurpose apparatus (see above). The models, fitted to the data of individual observers, may nevertheless be averaged afterwards, e.g. for an analysis of the inter-individual spread of the measured data. 3) The spectral and angular light intensity distributions (λ , θ , φ), actually entering the eye of the observer, must be measured with a spectral (CCD) camera in photons / s / λ , / cm^2 , with the resolution of the eye ($1'$), at the position of the eye. 4) The spectral camera, in combination with the gauged CC / EC model, finally results in a mobile light measurement and judgment device for photopic and mesopic vision, comparable to the human observer.

Acknowledgements

This research is part of the fundamental research project "Measurement and Simulation of Photopic and Mesopic Vision", funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF-13N10915).

Literature

- [1] W. Backhaus, Spectral Measurement of Photopic and Mesopic Light, (this volume)
- [2] W. Backhaus, Psychophysiological Simulations of Spatial Color Vision: II. Light and Color Sensations. In: Sechstes Symposium Licht und Gesundheit, 13.-14.3.2008. Eine Sondertagung der TU Berlin und der DGP mit DAfP und LiTG, Hrsg. H. Kaase & F. Serick, Tagungsband, Hauptvorträge, pp. 57-69, (Technische Universität, Berlin, 2008)
- [3] W. Backhaus, Physiological and psychophysical simulations of color vision in humans and animals. In: Color Vision - Perspectives from Different Disciplines, eds. W. Backhaus, R. Kliegl, J.S. Werner, pp. 45-77, (De Gruyter, Berlin, 1998)
- [4] W. Backhaus, Color Vision in Bees: Similarity Measures and Metric Scales of the Perceptual Space, (Diss., Freie Universität Berlin, Germany, 1987)
- [5] A. Krensel, W. Backhaus, Computerized generation of photopic and mesopic light for psychophysical experiments, (this volume)
- [6] S. Burmeister, W. Backhaus, Psychophysical experiments with related photopic and mesopic lights, (this volume)
- [[7] M. Richter, Einführung in die Farbmeterik 2. Aufl. (Introduction to Color metrics, 2nd ed.), (De Gruyter, Berlin, 1981)
- [8] R.W. Rodieck, Vertebrate Retina: Principles and Function, (Freeman, London, 1974)

- [9] W. Backhaus, Backhaus, W., Buckow, H., Breyer, J., Pielot, R. & Becker, K., Temporal neuronal colour coding and fluctuations, behaviour and evolution. In: Neuronal Coding of Perceptual Systems, ed. W. Backhaus, pp. 25-78, (World Scientific, London, 2001).
- [10] D. Jameson, L.M. Hurvich, Some quantitative aspects of an opponent-colors theory. I. Chromatic responses and spectral saturation, J. Opt. Soc. Am. 45, 546-552 (1955)
- [11] W. D. Wright, F.H.G. Pitt, Hue discrimination in normal colour vision, Proc. Phys. Soc. (London) 46, 459 ff. (1934)
- [12] G.H. Jacobs, Saturation estimates and chromatic adaptation, Perception and Psychophysics 2, 271-274 (1967).
- [13] G. Wyszecki, W.S. Stiles, Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, 2nd ed. (Wiley, New York, 1982)

Die Anwendung von blauem Licht als ein mögliches Verfahren zur Charakterisierung zirkadianer Rhythmen und deren Störungen

R. Uebelhack¹, L. Franke¹, H. Piazena^{1,2}

¹Charité, AG Medizinische Photobiologie, Berlin

²TU Berlin, Fachgebiet Lichttechnik, Berlin

Unter natürlichen Lichtverhältnissen werden (bei einer Gesamttageslänge von 17-18 Stunden) beim Menschen charakteristische Melatoninprofile mit Anstiegen der Konzentration in der Dunkelheit, Maximalwerten in der Nacht und einem Konzentrationsabfall in der Morgendämmerung beobachtet.

Es sind individuelle Variationen der Phasenlage und Phasendauer solcher Profile bekannt. Sie spiegeln sich unter anderem in der Präferenz von Schlaf-Wachzeiten wieder und lassen drei Chronotypen (Abb.1) unterscheiden:

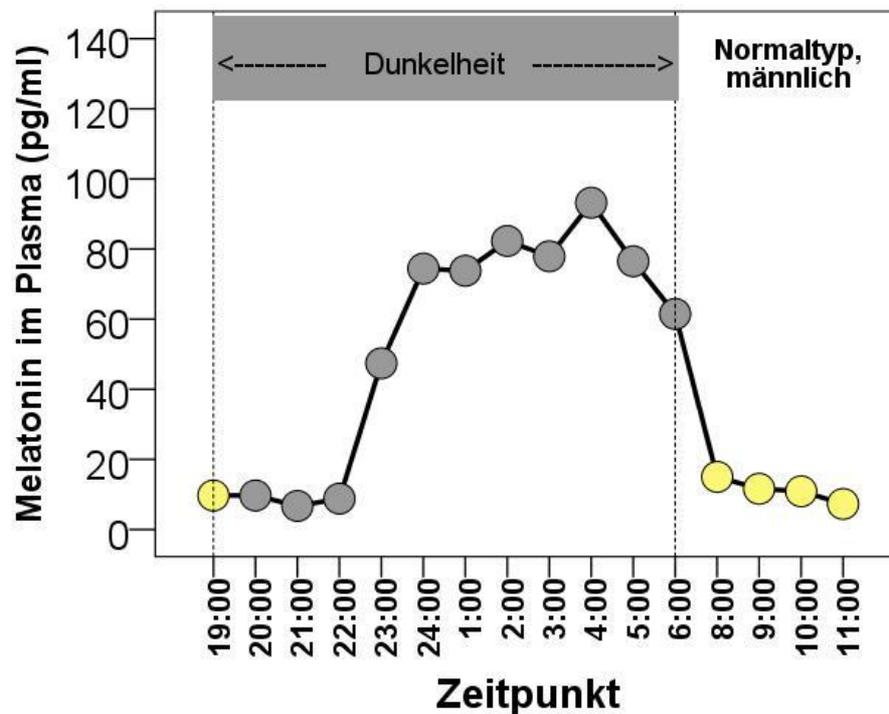
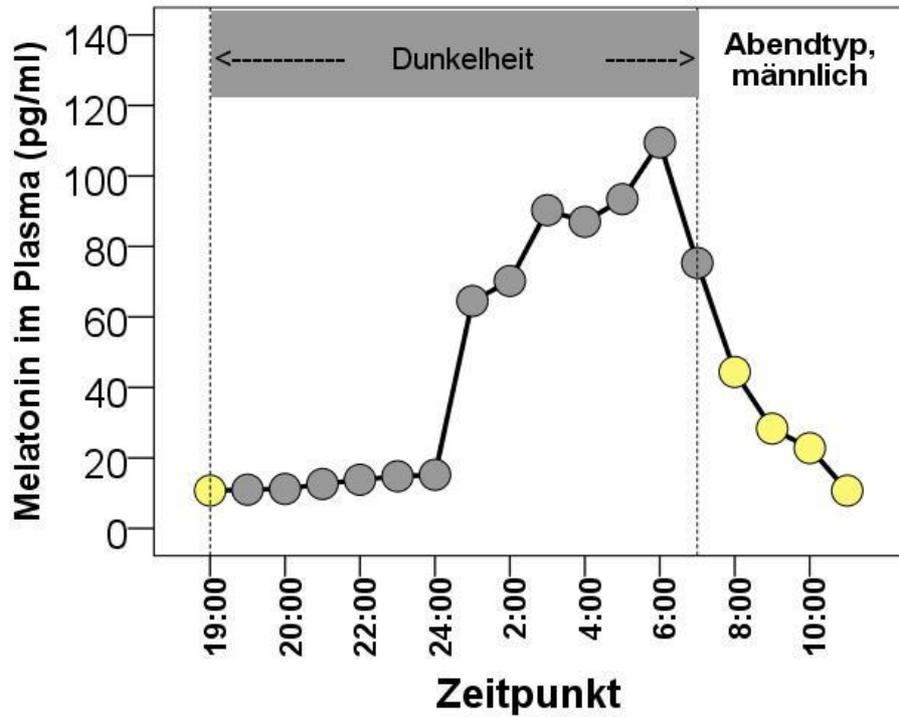
- Morgentyp
- Interferenztyp
- Abendtyp

Der individuelle Chronotyp scheint bei den meisten Menschen im Laufe des Lebens einem charakteristischen Wandel zu unterliegen. Es ist auch anzunehmen, dass sich die zirkadianen Profile bei psychiatrischen Erkrankungen verändern. Bei depressiven Störungen und bei der Gruppe der Schizophrenien gibt es hierfür Hinweise.

Die nächtliche Suppression der Melatoninsynthese durch weißes Licht ist seit mehr als 30 Jahren Gegenstand der Forschung.

Seit der Entdeckung spezifischer Rezeptoren für kurzwelliges Licht in der Retina werden Effekte monochromatischer Lichtquellen untersucht. Hierbei wird der Chronotyp der untersuchten Probanden (vorzugsweise Männer) oft nicht berücksichtigt.

Abb. 1 Chronotyp und Melatoninverläufe



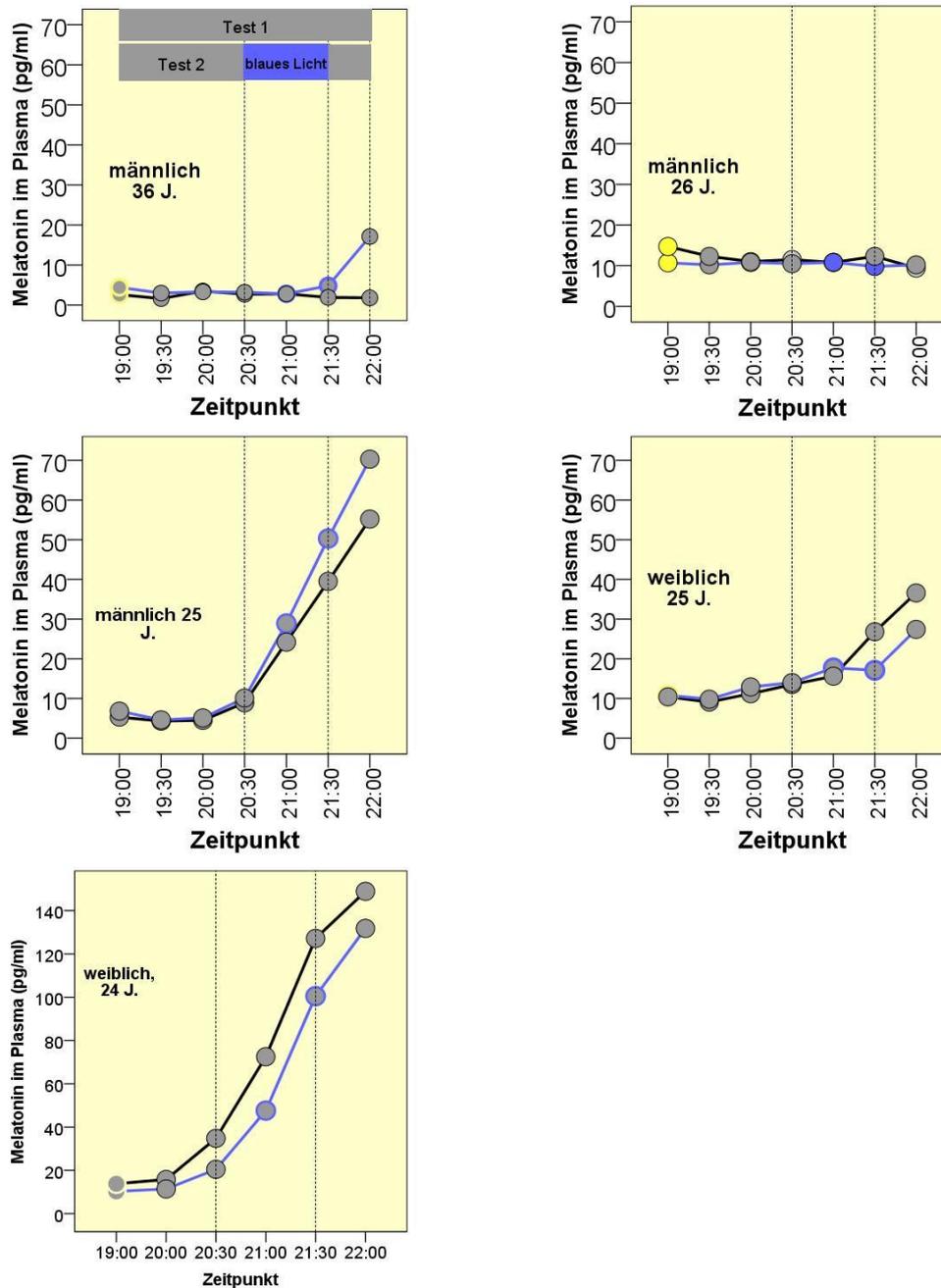
Legende: gelbe Kreise = Blutabnahmen bei Tageslicht

Abendtyp: Beginn der Melatoninsynthese nach 24 Uhr, Maximum um 6 Uhr, in den Morgenstunden noch hohe Melatoninwerte

Normaltyp: Beginn der Melatoninsynthese nach 22 Uhr, Maximum um 4 Uhr, niedrige Melatoninwerte in den Morgenstunden

Es ist davon auszugehen, dass erhebliche individuelle Unterschiede in der Melatonin-suppression nach Lichtapplikation auftreten (Abb. 2).

Abb. 2 Blaues Licht und individuelle Melatoninverläufe



Legende:

Testtag 1 (schwarz Linie) – kein Licht (<math><50\text{ Lx}</math>) von 19:00 bis 22:00

Testtag 2 (blaue Linie) – kein Licht von 19:00 bis 20:30, blaues Licht von 20:30 bis 21:30, dunkel von 21:30 bis 22:00

Lichtquelle: Wellenlängenbereich: 430 – 525 nm; Bestrahlungsstärke: $E_B = 12,15\ \mu\text{W} / \text{cm}^2$; Effektive Strahldichte: $L_B = 1,44\ \text{W} / \text{m}^2\cdot\text{sr}$ (L_{max} bei $\lambda = 460\text{nm}$)

Diese Unterschiede zeigen, dass die Heterogenität größer ist, als durch die drei Chronotypen reflektiert wird.

Unter diesen Aspekten wurde eine Studie an gesunden männlichen und weiblichen Probanden (n=60) durchgeführt.

Hierbei sollte die Auswirkung einer Lichtapplikation zu einer für das Alltagsleben relevanten Zeit zwischen 20.30 und 21.30 Uhr auf die Melatoninkonzentration im Plasma untersucht werden.

Die verwendete Lichtquelle hatte folgende Parameter:

- Wellenlängenbereich 430-525 nm
- Bestrahlungsstärke $E_B=12,15 \text{ uW/cm}^2$
- Effektive Strahlendichte $L_B 0,144 \text{ W/m}^2 \text{ sr}$ (L_{\max} bei $\lambda = 460\text{nm}$).

Es wurden sehr unterschiedliche Profile von Melatoninverläufen gefunden (Abb.3). Eine eindeutige Unterdrückung der Melatonsynthese nach Lichtapplikation konnte unter diesen Bedingungen nur bei etwa $\frac{1}{4}$ der Probanden beobachtet werden. An Beispielen von individuellen Verläufen wird gezeigt, dass das blaue Licht zur Charakterisierung der individuellen Sensibilität zirkadianer Rhythmen für Licht verwendet werden kann.

Es ist davon auszugehen, dass der Morgen- und der Abenddämmerung im Alltagsleben große Bedeutung zukommt.

Eine Vielzahl von artefiziellen Lichtquellen beeinflusst die über Millionen von Jahren entstandenen natürlichen zirkadianen Rhythmen.

Das pathogenetische Potential dieser Faktoren ist nicht hinreichend untersucht.

Im Rahmen von Krankheitsprozessen ist von einer quantitativen (Schwellenwerte und Maxima) und qualitativen (Beginn, Anstieg) Abweichung im Melatoninsystem auszugehen.

Melatonin ist jedoch nur ein Teil der zirkadianen Veränderungen und muss im Zusammenhang mit hormonellen (z.B. Cortikosteroide) und Aktivitäten in bestimmten Hirnteilen (z. B. Nc. suprachiasmaticus) betrachtet werden.

Durch standardisierte Anwendung von blauem Licht geeigneter Stärke und Wellenlänge können die Chronotypen besser differenziert und möglicherweise Störungen in diesem Wechselspiel charakterisiert werden.

Die Haut im Spannungsfeld der positiven und negativen UV-Wirkungen

Prof. Dr. med. Jörg Reichrath

Leitender Oberarzt und ständiger Vertreter des Klinikdirektors

Klinik für Dermatologie, Venerologie und Allergologie

Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg/Saar, Deutschland

1 Einleitung

Hohe UV-Exposition bewirkt vorzeitige Hautalterung und ist ein wichtiger Risikofaktor für die Entstehung von „hellem“ (epitheliale) Hautkrebs (Basalzellkarzinome, Plattenepithelkarzinome der Haut). Deshalb stellen Maßnahmen zum Sonnenschutz einen wichtigen Bestandteil der Programme zur Prävention von Hautkrebs dar. Allerdings konnte weniger intensive, chronische Sonnenlichtexposition (im Gegensatz zu kurzzeitiger intensiver Sonnenlichtexposition) nicht als Risikofaktor für die Entwicklung des malignen Melanoms identifiziert werden. Wir wissen heute, dass ca. 90% des vom menschlichen Organismus benötigten Vitamin D in der Haut unter UV-B-Einwirkung gebildet werden muß – ein ernsthaftes Problem da ein Vitamin D Mangel entgegen der früheren Ansicht nicht ausschließlich für den Kalzium- und Knochenstoffwechsel von Bedeutung ist. Neben zahlreichen weiteren positiven Effekten (u.a. auf Muskulatur und Herz-Kreislaufsystem; protektive Wirkung gegen Infektions- und Autoimmunerkrankungen) wird der kutanen Vitamin D – Synthese inzwischen auch eine krebsprotektive Wirkung zugeschrieben. In diesem Beitrag wird das Spannungsfeld zwischen positiven und negativen Effekten der UV-Strahlung unter Berücksichtigung relevanter Forschungsergebnisse erörtert.

2 Kutane Vitamin D Synthese und UV-Protektion: wieviel Sonnenlicht braucht der Mensch?

2.1 Sonnenlicht und Hautkrebs

Hohe UV-Exposition bewirkt vorzeitige Hautalterung und stellt einen wichtigen Faktor für die Entstehung von „hellem“ (epitheliale) Hautkrebs (Basalzellkarzinome und Plattenepithelkarzinome der Haut) dar. Unabhängige Untersuchungen haben

übereinstimmend einen Zusammenhang zwischen der Entwicklung des malignen Melanoms und kurzzeitiger, intensiver UV-Exposition gezeigt, insbesondere nach Sonnenbränden in der Kindheit [1]. Deshalb stellt der UV-Schutz einen essentiellen Bestandteil von Hautkrebs-Präventionsprogrammen dar. Im Gegensatz zu kurzzeitiger intensiver Sonnenlichtexposition konnte weniger intensive, chronische Sonnenlichtexposition allerdings nicht als Risikofaktor für die Entwicklung des malignen Melanoms identifiziert werden, in einigen Studien wurde hier sogar ein protektiver Effekt gefunden. Es wurde auch darüber spekuliert, inwieweit diese Zusammenhänge die Berichte über ein erhöhtes Melanomrisiko nach Anwendung von Sonnenschutzmitteln erklären. Allerdings zeigte eine umfassende Analyse der Literatur, basierend auf 14 publizierten Studien, kein erhöhtes Risiko für die Entwicklung von Melanomen nach Sonnenschutzmittelanwendung [2].

2.2 Die Haut als Syntheseort von Vitamin D – nicht nur wichtig für Knochen- und Kalziumstoffwechsel sondern auch zum Schutz vor Krebs und anderen Erkrankungen

Ca. 90% des vom Organismus benötigten Vitamin D muß in der Haut unter UV-B-Einwirkung gebildet werden. Deshalb stellt ein konsequenter UV-Schutz ein ernsthaftes Problem dar, da ein Vitamin D Mangel entgegen der früheren Ansicht nicht ausschließlich für den Kalzium- und Knochenstoffwechsel von Bedeutung ist. Neben zahlreichen weiteren positiven Effekten (u.a. auf Muskulatur und Herz-Kreislaufsystem; protektive Wirkung gegen Autoimmunerkrankungen, Infektionserkrankungen) wird Vitamin D inzwischen auch eine krebsschutzprotektive Wirkung zugeschrieben [3-5]. Epidemiologische Untersuchungen zeigen, daß mit zunehmender Entfernung des Wohnorts vom Äquator das Risiko ansteigt, an verschiedenen malignen Tumoren (u.a. Mamma-, Ovarial-, Kolon-, und Prostatakarzinom) zu versterben. Ein Zusammenhang dieser Beobachtung mit erniedrigten Vitamin D Serumspiegeln wurde nachgewiesen. Die Entwicklung unseres Verständnisses über die Rolle von Vitamin D bei Krebserkrankungen zeigt auffällige Parallelen zu der Entwicklung unseres Verständnisses von der Rolle von Vitamin D bei der Rachitis. Bei beiden Erkrankungen gingen epidemiologische Beobachtungen zur Sonnenlichtexposition weiteren experimentellen und klinischen Studien voran und wurden schließlich durch diese bestätigt.

Inzwischen konnte gezeigt werden, dass im Gegensatz zu früheren Annahmen Haut, Kolon, Mamma, Prostata und zahlreiche weitere Gewebe die enzymatische Maschinerie besitzen um 25(OH)D zu seinem aktiven Metaboliten 1,25(OH)₂D zu konvertieren [6]. Heute wird 1,25(OH)₂D deshalb als ein in zahlreichen Geweben ortsständig zur lokalen Wachstumskontrolle produzierter Faktor angesehen. Konsequenterweise spricht eine große Anzahl von kürzlich publizierten Studien für einen protektiven Effekt von lokal produziertem 1,25(OH)₂D bei der Pathogenese unterschiedlicher Malignome. Es wurde auch über einen Zusammenhang zwischen dem Vitamin D Stoffwechsel der Haut und der Entwicklung des malignen Melanoms berichtet. Ein Polymorphismus des VDR-Gens korreliert mit einer ungünstigen Prognose des malignen Melanoms [7]. Erniedrigte 25-Hydroxyvitamin D Serumspiegel wurden bei Melanopatienten nicht gefunden [8]. Im Gegensatz zu zahlreichen internen Malignomen ist es beim Malignen Melanom bekannt, daß die Inzidenz mit der Nähe des Wohnortes zum Äquator zunimmt.

3 Zusammenfassung

Zusammengefasst kann nach dem heutigen wissenschaftlichen Kenntnisstand davon ausgegangen werden, dass bei einer maßvollen, nicht intensiven Sonnenlichteinstrahlung die protektiven gegenüber den mutagenen Effekten überwiegen. Es wurde postuliert, dass in letzter Konsequenz auch die Zahl der Krebstodesfälle durch vorsichtige Sonnenlichtexposition oder sicherer durch orale Gabe von Vitamin D reduziert werden könnte [5,9]. Deshalb sollten die dermatologischen Empfehlungen zum Sonnenschutz modifiziert werden. Wir wissen heute, dass in den meisten Regionen kurzzeitige und begrenzte Sonnenlichtexposition genügt um ausreichende Vitamin D Spiegel zu erzielen [3,10,11]. Die Exposition des Körpers in Badekleidung mit einer minimalen Erythemdosis (MED) Sonnenlicht entspricht in etwa der oralen Einnahme von 10.000 IU Vitamin D. Deshalb wurde von einigen Autoren die Exposition von weniger als 18% der Körperoberfläche (z.B. Hände, Arme und Gesicht) 2-3x/Woche mit einer Dosis von bis zu 1/3 oder 1/2 MED im Frühjahr, Sommer und Herbst als ausreichend angesehen (etwa 5 min für Personen mit Hauttyp II in Boston im Juli zur Mittagszeit). Bei längerer Sonnenlichtexposition sollte unbedingt ein ausreichender Sonnenschutz

durchgeführt werden um einem Sonnenbrand und anderen schädlichen Folgen exzessiver Sonnenlichtexposition vorzubeugen [3,9-11].

Es muß betont werden, dass insbesondere auch bei Bevölkerungsgruppen mit einem hohen Risiko der Entwicklung eines Vitamin D-Mangels (z.B. bettlägerige Menschen in Pflegeheimen, Menschen mit Hauttyp I, oder Patienten die unter immunsuppressiver Behandlung einen konsequenten Sonnenschutz betreiben müssen) der Vitamin D Serumspiegel konsequent überwacht werden sollte [3,9,10]. Ein Vitamin D Mangel sollte unbedingt behandelt werden, beispielsweise durch orale Vitamin D Substitution. Die einmal wöchentliche orale Gabe von 50.000 IU über insgesamt acht Wochen stellt eine effiziente und sichere Methode zur Behandlung des Vitamin D-Mangels dar. Eine Maßnahme zur Sicherstellung einer ausreichenden Vitamin D Versorgung, besonders bei bettlägerigen Patienten in Pflegeheimen, besteht in der monatlichen Gabe von 50.000 IU Vitamin D.

Wir und andere konnten zeigen, dass konsequenter UV-Schutz zu Vitamin D-Mangel führt [9-14]. Deshalb ist eine Überwachung des Vitamin D-Status, (insbesondere des 25(OH)D₃-Serumspiegel) in allen Patientenkollektiven zu fordern, die eine konsequente UV-Protektion betreiben müssen. Im Falle eines Vitamin D-Mangels sollte eine orale Substitution von Vitamin D erfolgen. Diese Zusammenhänge sind gerade für den Dermatologen von ganz besonderer Bedeutung und müssen auch im Rahmen der Hautkrebs-Präventivprogramme berücksichtigt werden.

Literatur

- [1]. Osterlind A, Tucker MA, Stone BJ, Jensen OM (1988). The Danish case-control study of cutaneous malignant melanoma. II Importance of UV-light exposure. *Int J Cancer*; 42:319-324.
- [2]. Bastuji-Garin S, Diepgen TL (2002). Cutaneous malignant melanoma, sun exposure, and sunscreen use: epidemiological evidence. *Br J Dermatol*;146 Suppl 61:24-30.
- [3]. Holick MF (2007). Vitamin D deficiency. *N Engl J Med*; 357(3):266-281.
- [4]. Garland CF, Comstock GW, Garland FC et al. (1989). Serum 25-hydroxyvitamin D and colon cancer: eight year prospective study. *Lancet*; 2(8673):1176-8.
- [5]. Grant WB (2002) An estimate of premature cancer mortality in the U.S. due to inadequate doses of solar ultraviolet-B radiation. *Cancer*; 94:1867-75.

- [6]. Reichrath J, Holick MF. Psoriasis and other skin diseases. In: Feldman D, Glorieux FH, Pike JW (Hrsg) Vitamin D. Academic Press, San Diego London Boston New York Sydney Tokyo Toronto, second edition, in press.
- [7]. Hutchinson PE, Osborne JE, Lear JT, Smith AG, Bowers PW, Morris PN, Jones PW, York C, Strange RC, Fryer AA (2000). Vitamin D receptor polymorphisms are associated with altered prognosis in patients with malignant melanoma. *Clin Cancer Res*;6(2):498-504.
- [8]. Reichrath J, Querings K (2004). No evidence for reduced 25-hydroxyvitamin D serum levels in melanoma patients. *Cancer Cause Control*, 15:97-98.
- [9]. Reichrath J. The challenge resulting from positive and negative effects of sunlight: how much solar UV-exposure is appropriate to balance between risks of vitamin D deficiency and skin cancer? *Progr Biophys Mol Biol*, in press.
- [10]. Reichrath J. Protecting against adverse effects of sun protection? *J Am Acad Dermatol* 2003; 49(6):1204-1206.
- [11]. Reichrath J (2004). UV protection and vitamin D deficiency in transplant recipients. *Arch Dermatol*, 140(8):1015-6.
- [12]. Querings K, Reichrath J (2004). A plea for detection and treatment of vitamin D deficiency in patients under photoprotection, including patients with xeroderma pigmentosum and basal cell nevus syndrome. *Cancer Cause Control*, 15(2):219.
- [13]. Holick MF, Matsuoka LY, Wortsman J (1995). Regular use of sunscreen on vitamin D levels. *Arch Dermatol*. 1995;131(11):1337-9.
- [14]. Holick MF (2005). Vitamin D: important for prevention of osteoporosis, cardiovascular heart disease, type 1 diabetes, autoimmune diseases, and some cancers. *South Med J*:98(10):1024-7.

Photobiology of Vitamin D for Human Health

Michael F. Holick, Ph.D., M.D.

Department of Medicine, Section of Endocrinology, Nutrition, and Diabetes
Vitamin D, Skin and Bone Research Laboratory
Boston University Medical Center, Boston, MA
Boston University School of Medicine
85 East Newton Street, M-1013

Sources of Support:

This work was supported in part by the UV Foundation and the Mushroom Council.

Introduction

Today vitamin D is known as the sunshine vitamin. Its origin dates back to 1822 when the Polish physician Sniadecki realized that children living in the inner-city of Warsaw Poland had a high incidence of the devastating bone deforming disease known as rickets, whereas children who lived on the farms in rural areas outside of Warsaw had little evidence of this disease.(1) He reasoned that the likely cause for rickets was lack of sun exposure in the poorly lit and dark alleyways that the children played in. Little attention was given to this insightful observation. In the mid-1800s cod liver oil was used as a home remedy to treat and cure rickets. In 1890 Palm (2) reported that his colleagues who had travel to India in the Orient rarely saw rickets whereas most children in London were plagued with disease. He concluded that the common denominator for why children living in squalor in India and the Orient were free of rickets was because of their exposure to sunlight. He advocated in 1890 sunbathing for the prevention and treatment of rickets. However it was inconceivable to the thought leaders how sun exposure on the skin could have any impact on the health of the skeleton and these observations were dismissed. In 1919 Huldshinsky (3) found that exposing children to radiation from his sun quartz lamp (mercury arc lamp) resulted in dramatic healing of the rickets. Finally in 1921 Hess and Unger (4) reported that exposing rachitic children to sunlight on the roof of their New York City Hospital resulted in marked radiologic improvement in the children's rickets. At the

same time Mellanby (5) reported the prevention of rickets in puppies with cod liver oil. Originally it was thought that the antirachitic factor was vitamin A. However when cod liver oil was heated in the presence of oxygen to destroy all vitamin A activity it retained its antirachitic activity leading to the conclusion that the antirachitic factor was a new vitamin. McCollum called this nutritional factor vitamin D.(6) It was quickly realized that the antirachitic factor in cod liver oil was either similar to or identical to the antirachitic activity produced in the skin from sun exposure.

When yeast were exposed to ultraviolet radiation the yeast had antirachitic activity. Hess and Weinstock (7) and Steenbock and Black (8) demonstrated that exposure of a variety of food substances such as cottonseed oil, lettuce, and milk also resulted in them possessing antirachitic activity. It was initially assumed that the antirachitic activity in ultraviolet irradiated yeast, cod liver oil, and pig skin were all identical. However the 1930s it was realized that the antirachitic vitamin D from yeast was ineffective in preventing the development of rickets chickens whereas vitamin D obtained from ultraviolet irradiated pigskin was effective in preventing rickets in chickens. (9,10) It was Windaus who structurally identified the antirachitic factor from pigskin as vitamin D₃ which differed from the structure of vitamin D in the yeast in that vitamin D₃ had a side chain that was identical to that of cholesterol whereas the vitamin D from yeast had a side chain identical to ergosterol and known as vitamin D₂.(9,10) (Figure 1)

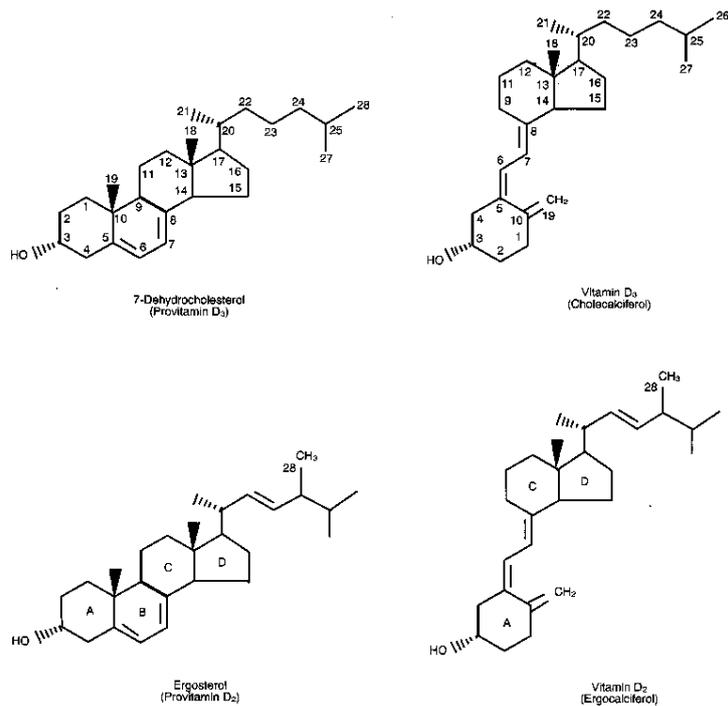


Figure 1: Chemical structures of vitamin D₂ and vitamin D₃ and their respective precursors, ergosterol and 7-dehydrocholesterol. Holick copyright 1994 with permission.

Photobiology of Vitamin D in Early Life forms

Vitamin D is one of the oldest hormones and has been made in the earliest life forms for more than 500 million years. The phytoplankton species *E. huxleyi* that has existed in the Sargasso Sea unchanged for more than 500 million years was found to have ergosterol which is the precursor for vitamin D₂. When exposed to simulated sunlight this primitive organism photosynthesized previtamin D₂ which rapidly converted to vitamin D₂. Yeast and various fungal species including edible mushrooms also contain large amounts of ergosterol and when exposed to simulated sunlight they produce vitamin D₂. (9,10)

Although the function of ergosterol and vitamin D₂ is not known in phytoplankton it has been speculated that the reason early life forms, that depended on solar energy for their energy source, produced ergosterol was for it to act as a natural sunscreen. The ultraviolet absorption spectrum for ergosterol, previtamin D₂ and vitamin D₂ completely overlap the UV absorption spectra for DNA, RNA and proteins. (9)(Figure 2) Thus as phytoplankton were taking advantage of the visible radiation for

photosynthesis of carbohydrates they prevented solar ultraviolet radiation from penetrating into the cell by being enveloped by an outer layer of the UV absorbing ergosterol.

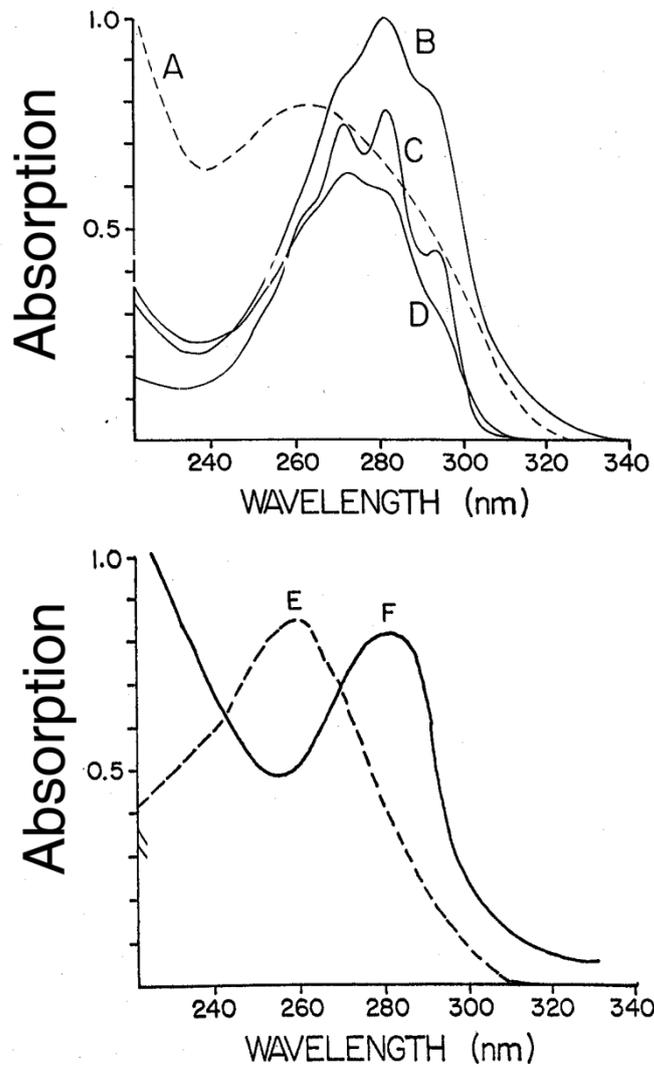


Figure 2: Ultraviolet absorption spectra for (A) previtamin D_3 , (B) tachysterol, (C) provitamin D_3 (7-dehydrocholesterol), (D) lumisterol, (E) DNA, and (F) albumin. Holick copyright 2007 with permission.

Photobiology of Vitamin D in Humans

The photosynthesis of vitamin D occurs in the skin of most vertebrates including reptiles, amphibians and mammals including humans. During exposure to sunlight radiation with wavelengths 290-315 nm (UVB) are absorbed by epidermal and dermal stores of 7-dehydrocholesterol. This absorption results in the splitting of the B ring resulting in the formation of previtamin D₃. Once formed previtamin D₃ which is thermodynamically unstable converts to vitamin D₃.(11)

The thermal isomerization of previtamin D₃ to vitamin D₃ in a test tube at body temperature (37°C) takes approximately 3 days to complete. At room temperature this process takes an even longer period of time. This appeared to be an inefficient process until it was observed that the conversion of previtamin D₃ to vitamin D₃ in lizard skin was 10 times faster than what occurred in a test tube.(12) Studies have revealed the mechanism for this catalytic isomerization process. Previtamin D₃ exists in two conformeric forms cis, cis (czc) and cis, trans (czt). The czt conformer is the most thermodynamically stable and thus is the major conformer that is formed during the irradiation of 7-dehydrocholesterol. However this conformer cannot convert to vitamin D₃. Only the thermodynamically less favorable czc conformer is able to isomerize to vitamin D₃. Thus as shown in Figure 3 the process of converting previtamin D₃ to vitamin D₃ takes several days to complete. (Figure 3)

It was demonstrated that similar to lizard skin when previtamin D₃ was produced in human skin it rapidly converted to vitamin D₃ that was approximately 10 times faster than what occurred in a test tube. Studies revealed that 7-dehydrocholesterol is incorporated into the lipid bilayer. It was hypothesized that being a planar structure 7-dehydrocholesterol upon absorbing ultraviolet B radiation was sterically limited and

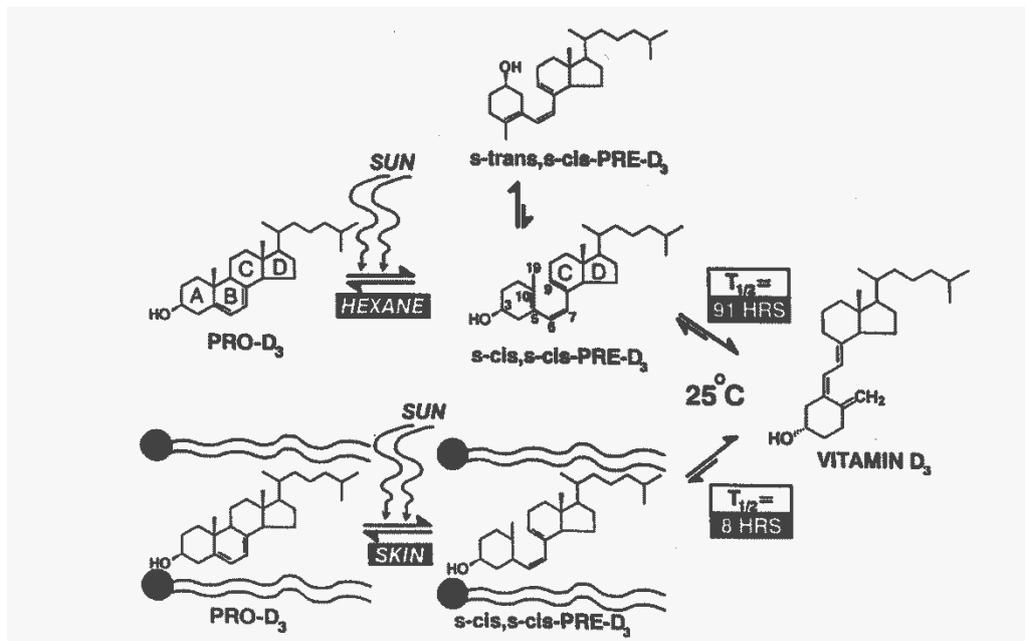


Figure 3: Photolysis of provitamin D_3 (pro- D_3) into previtamin D_3 (pre- D_3) and its thermal isomerization to vitamin D_3 in hexane and in lizard skin. In hexane, pro- D_3 is photolyzed to *s-cis,s-cis*-pre- D_3 . Once formed, this energetically unstable conformation undergoes a conformational change to the *s-trans,s-cis*-pre- D_3 . Only the *s-cis,s-cis*-pre- D_3 can undergo thermal isomerization to vitamin D_3 . The *s-cis,s-cis* conformer of pre- D_3 is stabilized in the phospholipid bilayer by hydrophilic interactions between the 3-hydroxyl group and the polar head of the lipids, as well as by van der Waals interactions between the steroid ring and side-chain structure and the hydrophobic tail of the lipids. These interactions significantly decrease the conversion of the *s-cis,s-cis* conformer to the *s-trans,s-cis* conformer, thereby facilitating the thermal isomerization of *s-cis,s-cis*-pre- D_3 to vitamin D_3 . Reprinted with permission from Holick et al. [12].

thus when the B ring opened it could only transform into the planar czc conformer which in turn rapidly converted to vitamin D_3 . Once formed vitamin D_3 which was no longer a planar structure could no longer remain in the lipid bilayer and thus was ejected from the plasma membrane into the extracellular space. (Figure 3) (12,13) It was speculated that this non-enzymatic catalytic reaction plays an important role in membrane permeability for early life forms including phytoplankton possibly for cations including calcium which was plentiful in the primordial oceans. (9,10) This could explain how the sunshine vitamin D played such an important role in calcium metabolism throughout vertebrate evolution. (10)

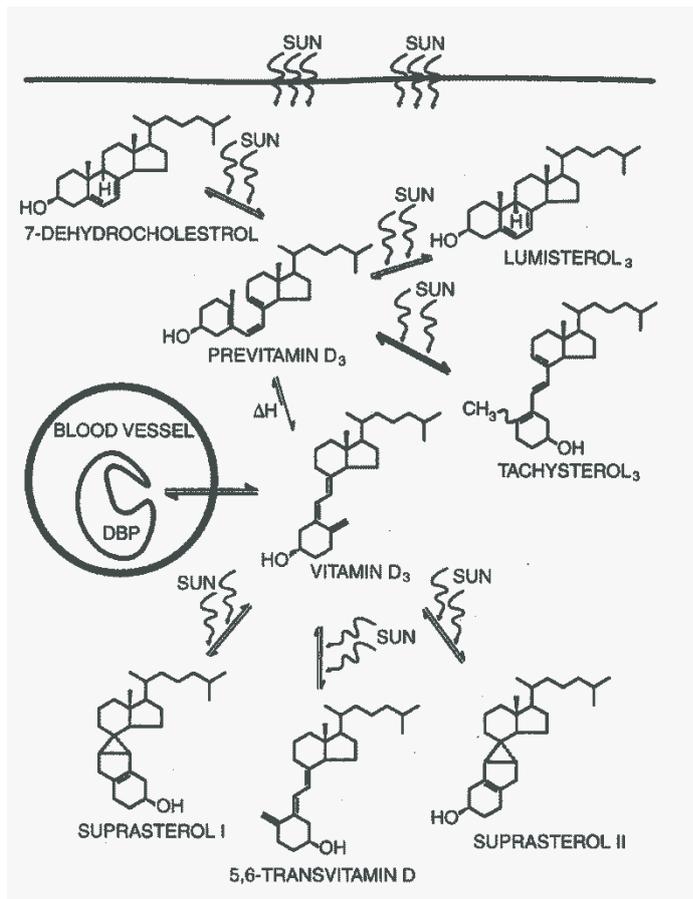


Figure 4: Photochemical events that lead to the production and regulation of vitamin D₃ in the skin. DBP is the plasma vitamin D binding protein. Holick copyright 2000 with permission.

Factors That Influence Vitamin D Production

Throughout human evolution sunlight played an important role in providing our ancestors with their vitamin D requirement which was essential for the maintenance of calcium homeostasis and a healthy strong skeleton. This is the likely reason for why very little vitamin D is found in natural foods. However as people migrated far north and south of the equator where the sun shines for no more than 6 months early humans compensated for the lack of sun exposure and vitamin D synthesis by eating parts of animals that contained vitamin D including fatty fish, seal and whale blubber and polar bear liver.

Our early ancestors had deep skin pigmentation in order to prevent damaging effects from excessive sun exposure. It was speculated that the dark skin pigmentation prevented excessive amounts of vitamin D from being produced in the skin. However

this hypothesis was challenged when it was demonstrated that increased exposure to sunlight did not result in excess production of vitamin D₃.(14,15)

Holick et al (15) reported that when human skin was exposed to simulated sunlight that initially 7-dehydrocholesterol was efficiently converted to previtamin D₃. However as soon as previtamin D₃ was produced it absorbed ultraviolet radiation which resulted in the formation of lumisterol and tachysterol. (Figure 5) When previtamin D₃ isomerized to vitamin D₃ during ultraviolet exposure vitamin D₃ isomerized to 5,6-transvitamin D₃ and 2 suprasterols. It was concluded that sunlight itself regulated the total production of vitamin D₃ in the skin by photolyzing previtamin D₃ and vitamin D₃ into compounds that had little biologic activity on calcium metabolism. This is the likely explanation for why there has never been a report of vitamin D intoxication in sun worshipers.

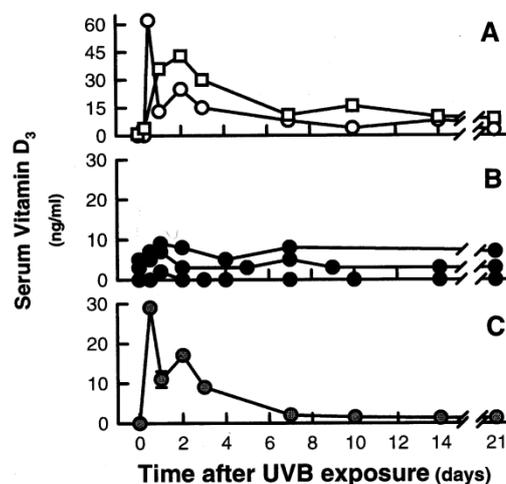


Figure 5: Change in serum concentrations of vitamin D in two lightly pigmented white (skin type II) (A) and three heavily pigmented black subjects (skin type V) (B) after total-body exposure to 54mJ/cm² of UVB radiation. (C) Serial change in circulation vitamin D after reexposure of one black subject in panel B to a 320mJ/cm² dose of UVB radiation. Reproduced with permission (17).

It had been hypothesized that as humans migrated north and south from the equator they would have had to lose their skin pigmentation in order to produce enough vitamin D. Indeed it has been observed that Neanderthals had a mutation in their pigment gene receptor that resulted in them having Celtic skin and being redheaded. (16) The likely reason for this dramatic change in skin pigmentation is due to the fact that melanin is an extremely effective sunscreen and that blacks living at the equator had so much skin pigment as they migrated north and south of the equator they would not have been able to make enough vitamin D to satisfy their requirement. Vitamin D deficiency during pregnancy would have led to infantile rickets. These infants being breast-fed by vitamin D deficient mothers would have developed severe rickets. One of the consequences is a flat and deformed pelvis which would have made child birthing for the next generation extremely difficult if not impossible. Thus within a few generations skin pigmentation had to have devolved in order for procreation of humans to have continued as they migrated far north and south of the equator.

Melanin pigmentation markedly reduces the production of vitamin D₃ in human skin by as much as 50 fold.(Figure 5) (17) Sunscreens were developed to absorb ultraviolet B radiation in order to prevent sunburning. A sunscreen with a sun protection factor of 30 by definition when topically applied properly absorbs approximately 98% of incident solar ultraviolet B radiation. It was demonstrated that the topical application of a sunscreen with SPF of as little as 8 reduced the production of previtamin D₃ by more than 95%.(18)(Figure 6)

The zenith angle of the sun plays a critical role in the cutaneous production of previtamin D₃. No more than approximately 1% of solar ultraviolet B radiation reaches the earth's surface at the equator at noon in the summer. The reason for this is that stratospheric ozone layer efficiently absorbs solar ultraviolet B radiation. This is the explanation for why living at higher latitudes, winter sunlight and early morning and late afternoon sunlight even in the summertime has a dramatic effect on reducing the production of previtamin D₃ in human skin.

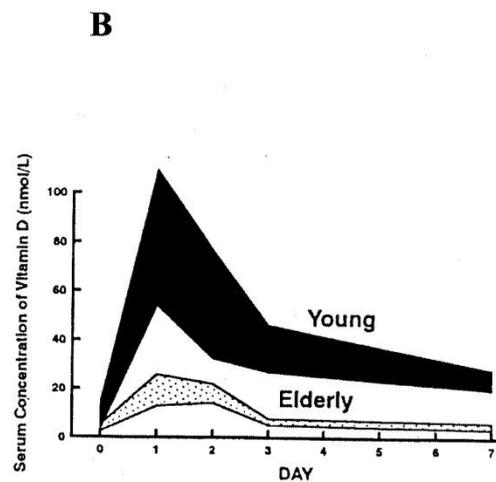
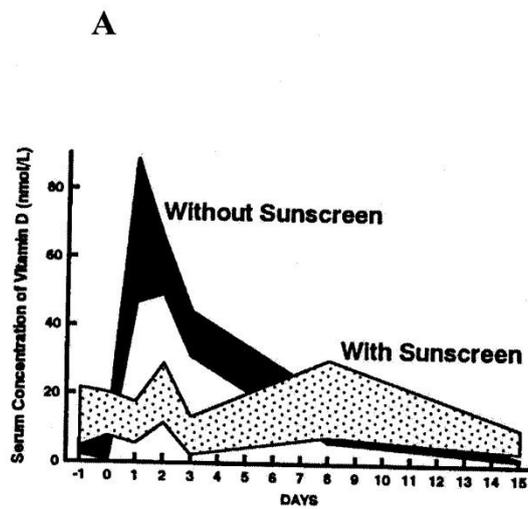


Figure 6A: Effect of sunscreen on vitamin D status. Circulating concentrations of vitamin D were measured in young adults after application of a cream either with a sun protection factor of 8 or without sunscreen (topical placebo cream) following a single exposure to one minimal erythemal dose of simulated sunlight. Reprinted with permission from Matsuoka et al.[18].

Figure 6B: Comparison of blood levels of vitamin D₃ in healthy young adults (20-30 years) compared to elderly adults (70+ years) after exposure of their whole body to a bathing suit to one erythemal dose of ultraviolet radiation. Holick copyright 2000 reproduced with permission.

During the winter from November-February people who live above $\sim 33^\circ\text{N}$ make very little if any vitamin D_3 in their skin no matter how long they are exposed to sunlight. The same is true for the Southern Hemisphere where very little if any vitamin D_3 is produced in the skin for people who live below $\sim 33^\circ$ South. (Figure 7)(19, 20) It has been suggested that the best time to be out of doors in the spring, summer and fall

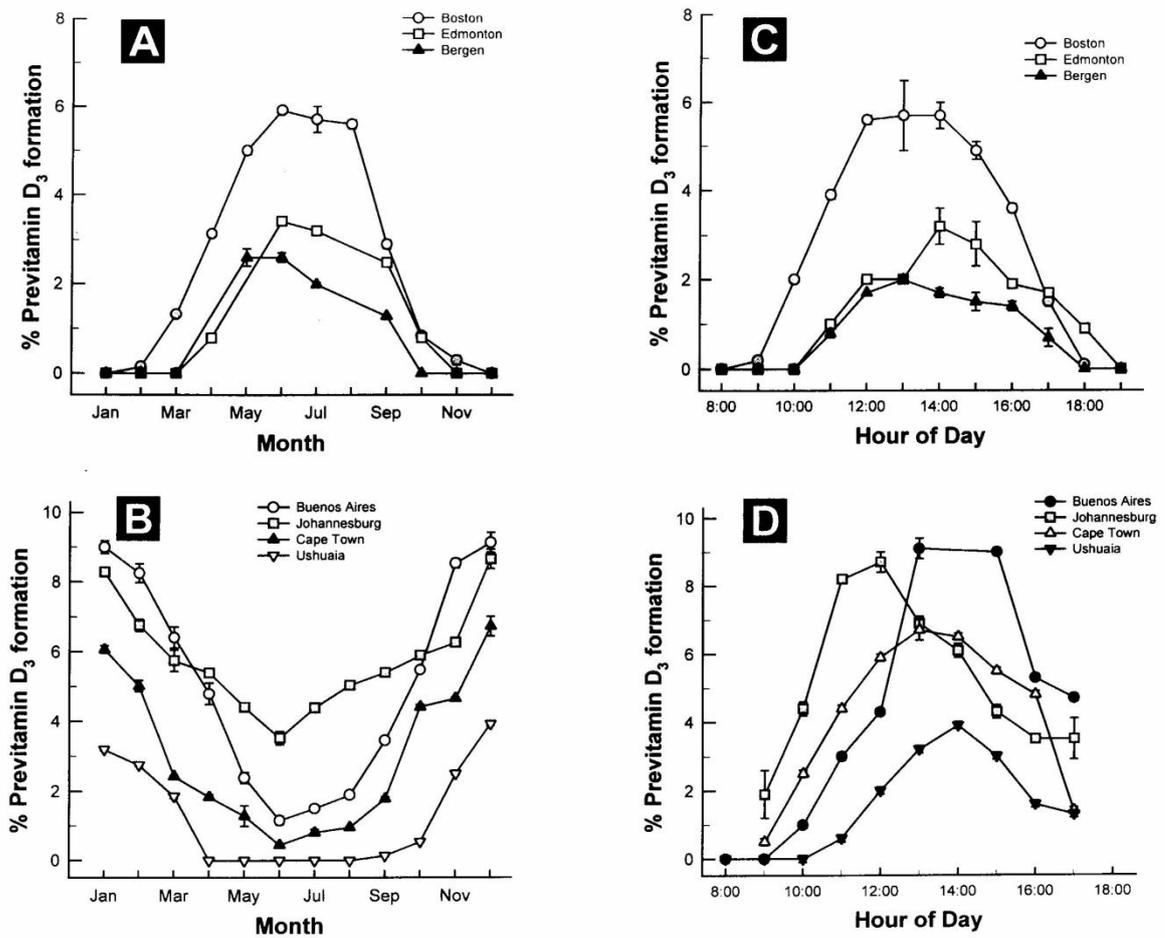


Figure 7: Influence of season, time of day, and latitude on the synthesis of previtamin D_3 in Northern (A and C) and southern hemispheres (B and D). The hour indicated in C and D is the end of the 1-hr exposure time. Holick copyright 1998 with permission.

is in the early morning and late afternoon since it is believed by many to be the least damaging to the skin. In fact very little if any vitamin D₃ is produced in the skin before 9 AM and after 3 PM even in the middle of the summer. (Figure 7) The reason is that the zenith angle of the sun is very oblique similar to winter sunlight and therefore almost all of the vitamin D₃ producing ultraviolet B radiation is absorbed by the ozone layer.

Altitude also influences the cutaneous production of previtamin D₃. The higher the altitude less of the vitamin D producing solar ultraviolet B radiation is being absorbed by the ozone layer. It was demonstrated that in India in November very little vitamin D₃ was produced from sun exposure in Agra whereas at the same latitude vitamin D₃ production was very robust at base camp of mount Everest.(Figure 8)(20)

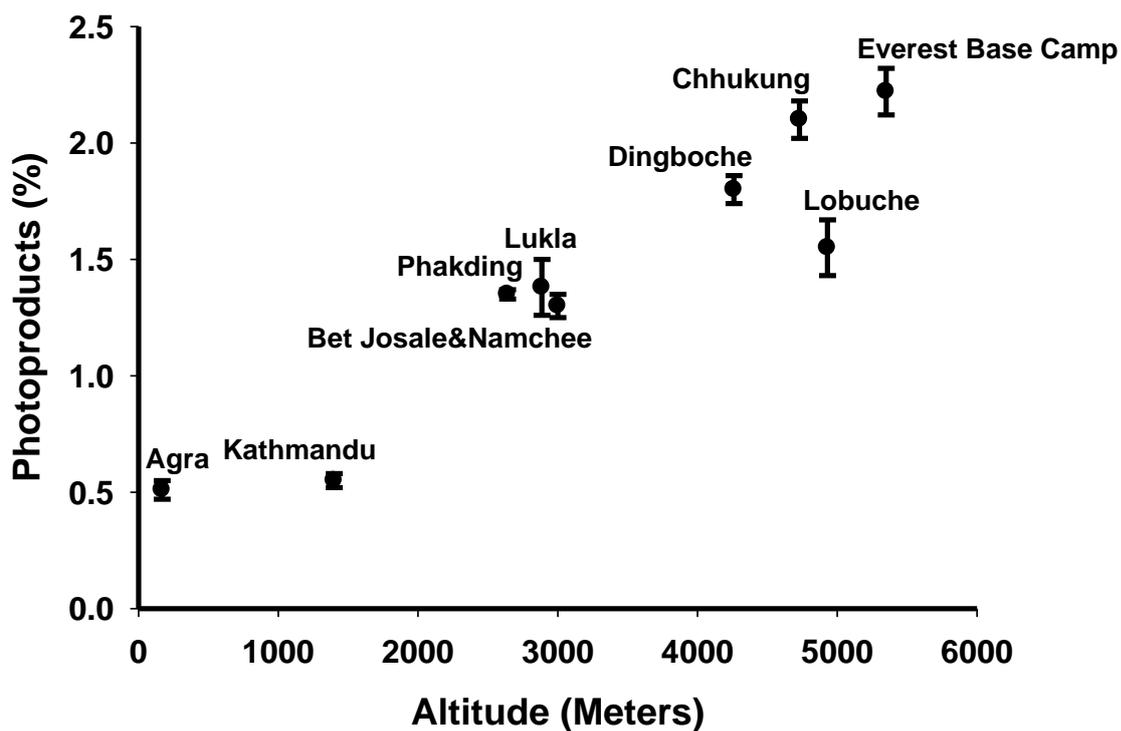
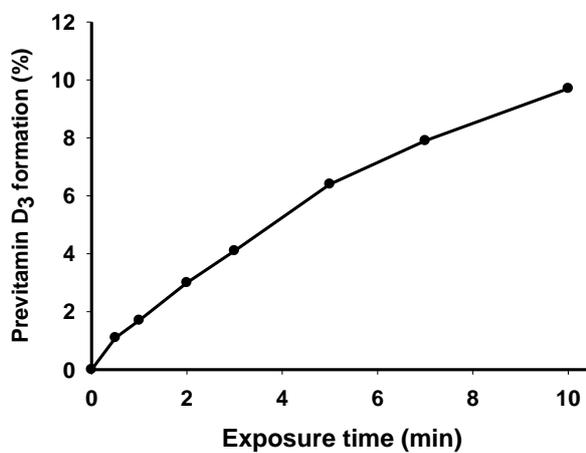
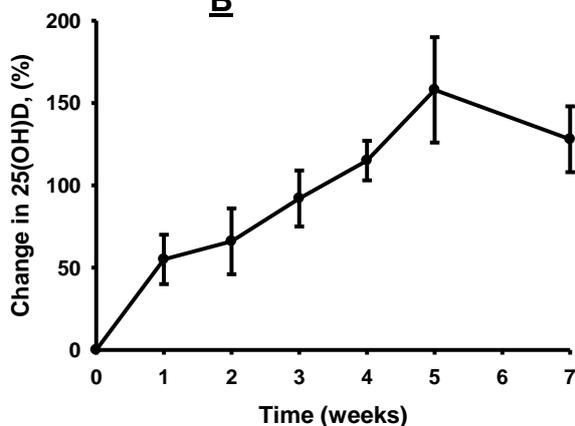


Figure 8: Ampoules containing 7-dehydrocholesterol in ethanol were exposed for one hour between 11:30 am and 12:30 pm at 27° N in India at various altitudes. The conversion of 7-dehydrocholesterol to previtamin D₃ and its photoproducts was determined by high performance liquid chromatography. Holick copyright 2007 with permission.

Aging has a marked influence on the cutaneous production of vitamin D₃. As the skin ages there is a substantial decline in the cutaneous levels of 7-dehydrocholesterol. By the age of 70 years there is approximately 25% of the 7-dehydrocholesterol that was present at the age of 20 years. This is the explanation for why it was observed that a 70-year-old had a 75% reduction in the cutaneous production of vitamin D₃ compared to a 20-year-old.(Figure 6) However because the skin has such a large capacity to produce vitamin D₃ elders exposed to sunlight can still make enough vitamin D₃ in their skin to satisfy their bodies requirement.(Figure 9) Studies performed in New Zealand, Europe and the United States revealed that elders

A**B**

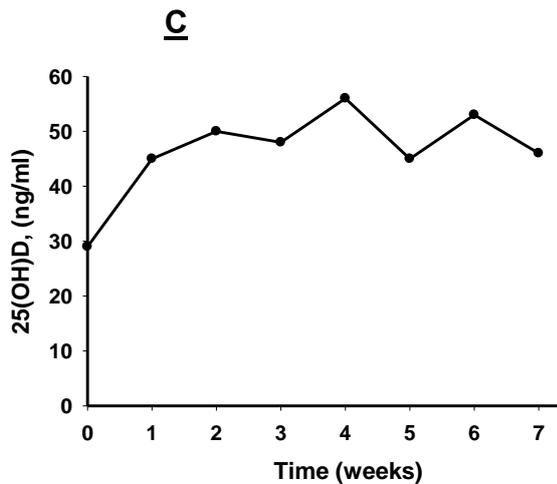


Figure 9: (A) Ampoules containing 7-dehydrocholesterol were placed in a tanning bed at various times and conversion of 7-dehydrocholesterol to previtamin D_3 was measured by high performance liquid chromatography. (B) Healthy adults were exposed to 0.75 MED in a tanning bed three times a week for seven weeks. Circulating concentrations of 25(OH)D were determined at baseline and once a week thereafter. (C) A 76 year old healthy male was exposed to tanning bed radiation equivalent to 0.75 MED three times a week for seven weeks. His circulating concentrations of 25(OH)D were obtained at weekly intervals. Holick copyright 2007 with permission.

exposed to sunlight were able to raise their blood levels of 25-hydroxyvitamin D [25(OH)D]. (21-23)(Figure 10) A study in a nursing home in the United Kingdom reported that installing ultraviolet B emitting lamps in an activity room in a nursing home was more effective than taking a vitamin D supplement in raising the blood level of 25(OH)D. (23)

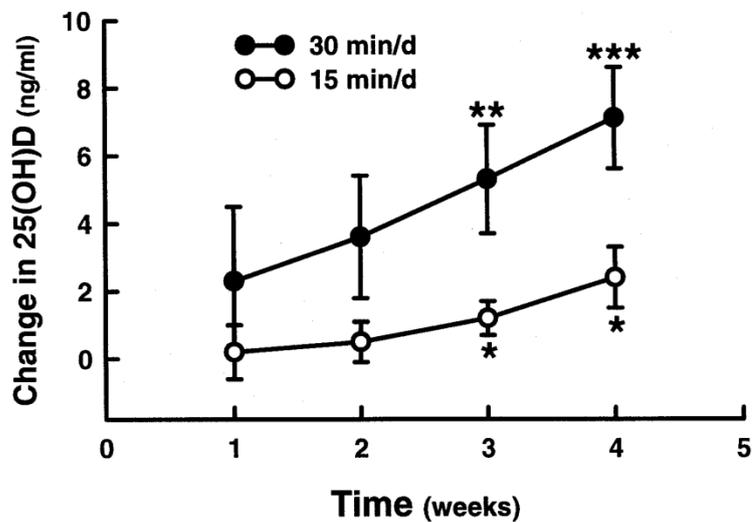


Figure 10: The effect of regular sun exposure of either 15 or 30 minutes daily sitting on a rest home veranda for a period of 4 weeks. Reproduced with permission (22).

Sun Exposure versus Vitamin D Supplement

It is now recognized that vitamin D deficiency is a worldwide epidemic.(24-26) The reason is that there is a lack of appreciation that essentially none of our foods naturally contain an adequate amount of vitamin D to satisfy a human's requirement. Studies have suggested that children require at least 1000 IU of vitamin D daily and adults need 2-3 times more, i.e. 2000-3000 IU daily. (27)

When healthy adults were exposed to a single 1, 1.5, or 3 minimal erythemal dose (MED) of ultraviolet radiation there was a gradual increase in the circulating concentrations of vitamin D₃ that peaked at 48 hours.(Figure 11)(28) The blood level of vitamin D₃ gradually declined and reached a higher plateau than baseline at 7 days that was maintained for at least 21 days. These data suggest that vitamin D₃ produced in the skin has a long-lasting effect on the vitamin D status. This was

confirmed by the demonstration that serum 25(OH)D levels gradually increased over a period of 3 days and was maintained for 21 days.(Figure 11)

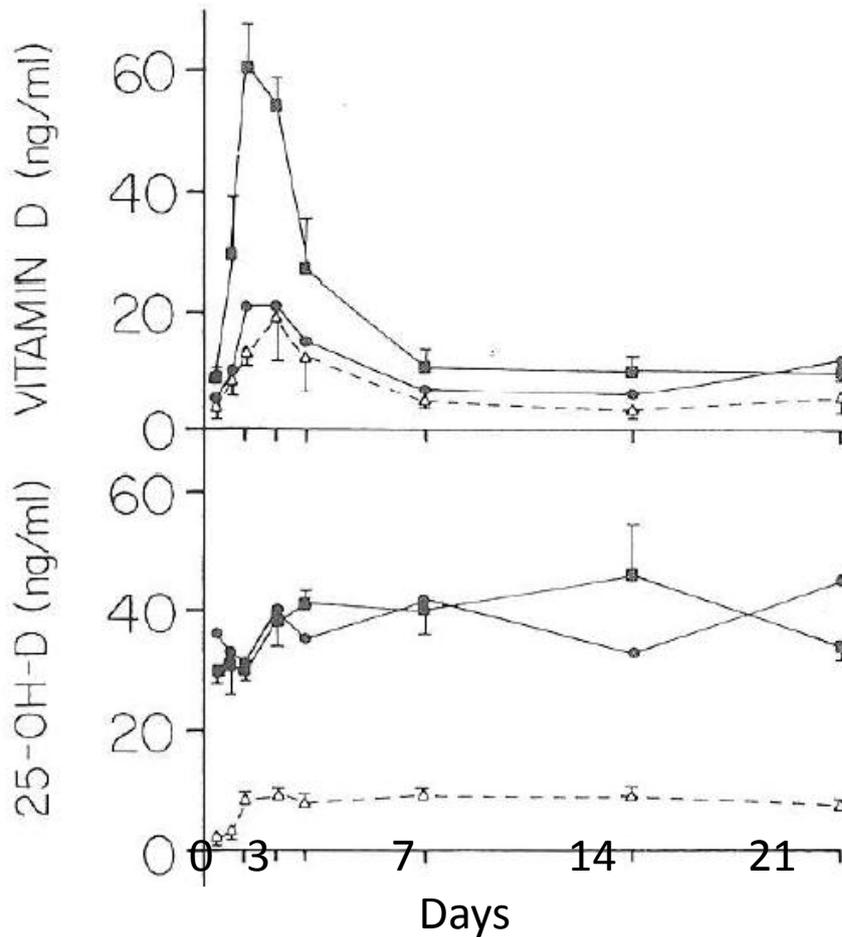


Figure 11: Changes in Serum Concentrations of Vitamin D and 25-hydroxyvitamin D [25(OH)D] after Exposure to Ultraviolet Radiation. Concentrations of vitamin and 25(OH)D were measured in three normal subjects exposed to three minimal erythemal doses of ultraviolet radiation(UVR)(solid squares,solid lines),in a representative normal subject exposed to one minimal erythemal dose of UVB (solid circles, solid lines),and in three vitamin-D-deficient patients exposed to one minimal erythemal dose of UVR(open triangles, dashed lines). Holick copyright 2012 with permission.

To compare the effectiveness of producing vitamin D₃ in the skin in comparison to taking an oral dose of vitamin D healthy subjects were either exposed to 1 MED of ultraviolet radiation in a tanning bed or given an oral dose of either 10,000 IU or 25,000 IU of vitamin D₂. Serum levels of vitamin D were determined. As can be seen in Figure 12 the blood levels of vitamin D quickly rose and quickly declined in the group that received the oral vitamin D supplement. In comparison subjects that were exposed to ultraviolet radiation gradually increase their blood level of vitamin D that was sustained for at least 72 hours. Based on this observation it was concluded that exposure of the whole body of an adult in a bathing suit to 1 MED of ultraviolet radiation is equivalent to ingesting approximately 15,000-20,000 IU of vitamin D.(Figure 12) (24)

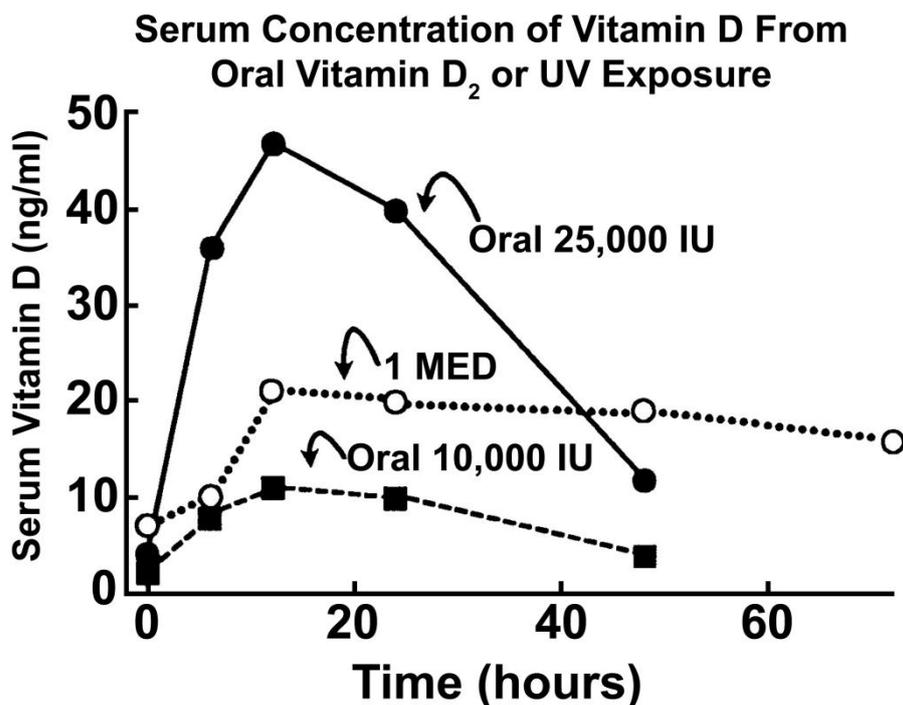


Figure 12: Comparison of serum vitamin D₃ levels after a whole-body exposure (in a bathing suit; bikini for women) to 1 MED (minimal erythemal dose) of simulated sunlight compared with a single oral dose of either 10,000 or 25,000 IU of vitamin D₂. Holick copyright 2007 with permission.

Conclusion

It is unfortunate that most humans have lost sight of the fact that sun exposure has been essential for good health in part due to the sun providing vitamin D₃ for maintaining calcium homeostasis and a healthy skeleton. Recent evidence suggests that this lack of appreciation of the beneficial effect of sunlight for producing vitamin D has led not only to widespread vitamin D deficiency worldwide but has resulted in an increased incidence of a wide variety of chronic diseases including type 1 diabetes, multiple sclerosis, rheumatoid arthritis, heart disease, type 2 diabetes, colon cancer, and breast cancer among other cancers, and increased risk for

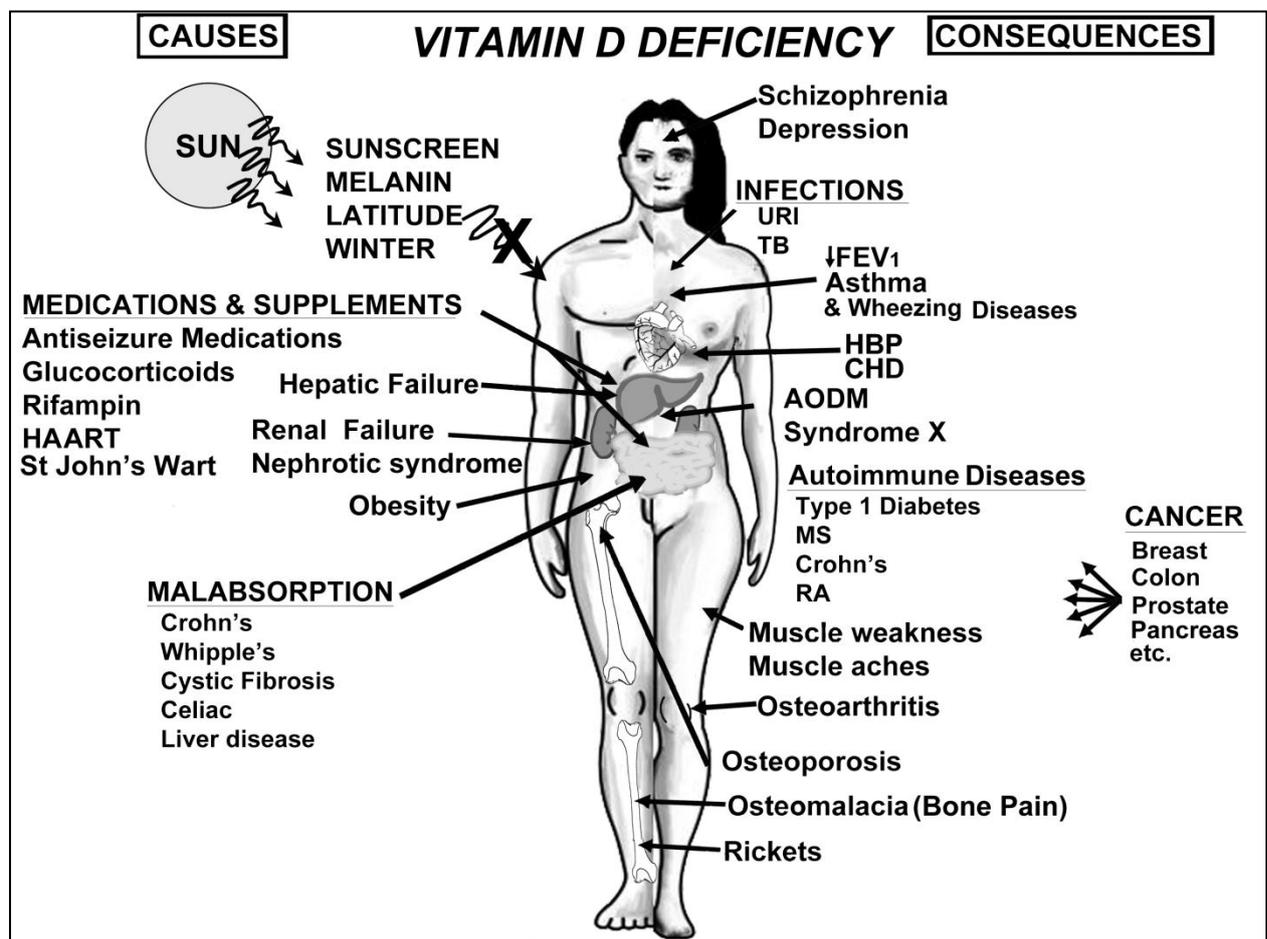


Figure 13: A Schematic Representation of the Major Causes for Vitamin D Deficiency and Potential Health Consequences. Holick copyright 2010 with permission.

infectious diseases including tuberculosis and influenza. Vitamin D deficiency has also been linked to increased risk for preeclampsia and C-section as well as asthma and wheezing disorders in infants and young children. (Figure 13)(24-27)

A comparison of blood levels of 25(OH)D from the National Health and Nutrition examination surveys from 1998, 1994 when compared to data collected from 2000 to 2004 revealed age adjusted mean 25(OH)D were 2-8 ng/ml lower in the 2000-2004 examination. It was concluded that this was due in part to decrease in milk consumption and obesity as well as decreased sun exposure and increased use of sun protection. (29) Even in the sunniest regions including the Middle East and India upwards of 90% of children and adults have been reported to be vitamin D deficient.(24,30,31) Even in Australia it has been reported that upwards of 50% of children and adults are at risk for vitamin D deficiency.(32)

There needs to be a change in attitude by the World Health Organization and the dermatology community with regards to suggesting abstinence from any direct sun exposure because of concern for increased risk for skin cancer.(33) Sensible sun exposure i.e. sub-erythemal doses of sunlight on arms and legs during times of the year when vitamin D₃ production can occur should not be discouraged. Exposure to simulated sunlight for most skin types was more effective in raising blood levels of 25(OH)D than taking a 1000 IU vitamin D₃ supplement daily.(Figure 14) There is little evidence that sensible sun exposure significantly increases risk for nonmelanoma skin cancer. It should also be appreciated that the most deadly skin cancer melanoma occurs on the least sun exposed areas and occupational sun exposure reduces risk for this deadly cancer.(34)

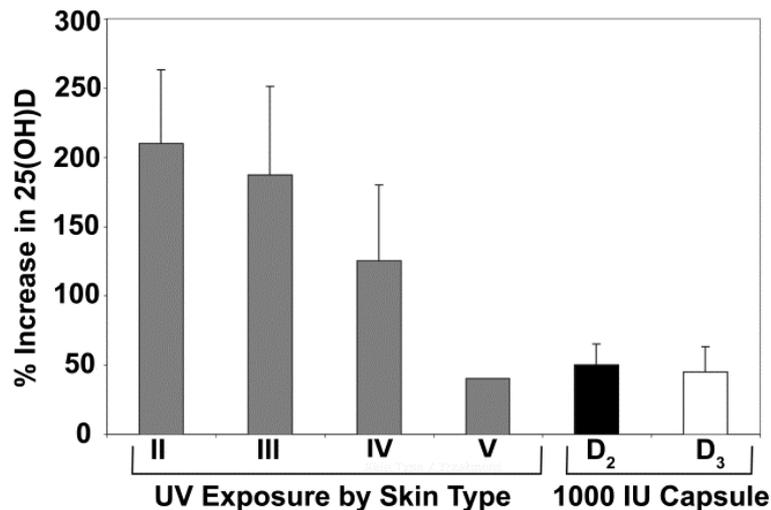


Figure 14: Comparison in the percent increase in serum 25(OH)D levels in healthy adults who were either in a bathing suit and exposed to suberythemal doses (0.5 MED) of ultraviolet B radiation once a week for three months compared to healthy adults who received either 1,000 units of vitamin D₂ or a 1,000 units of vitamin D₃ daily during the winter and early spring for a period of eleven weeks. Fifty percent increase represented ~ 10 ng/ml from baseline 18 ± 3 ng/ml to 28 ± 4 ng/ml. Skin type is based on the Fitzpatrick scale: type II always burns sometimes tans, type III always burns always tans, type IV sometimes burns always tans, type V never burns always tans. The data represents mean \pm SEM. Holick copyright 2008 with permission.

To combat the global vitamin D deficiency pandemic sensible sun exposure recommendations along with increasing food fortification with vitamin D and taking a vitamin D supplement should be encouraged.

References

1. Sniadecki J. 1939. Jerdrezej Sniadecki (1768–1838) on the cure of rickets. (1840) cited by W. Mozolowski. *Nature*. 143:121–121.
2. Palm TA. 1890. The geographic distribution and etiology of rickets. *Practitioner*. 45:270–342.
3. Huldschinsky K. 1919. Heilung von Rachitis durch Kunstliche Hohensonne. *Deutsche Med Wochenschr*. 45:712–713.
4. Hess AF, Unger LJ. 1921. The cure of infantile rickets by sunlight. *JAMA*. 77:39-41.
5. Mellanby, T. 1918. The part played by an "accessory factor" in the production of experimental rickets. *J. Physiol*. 52:11-14.
6. Holick, MF. 2006. Resurrection of vitamin D deficiency and rickets. *J Clin Invest*. 116(8):2062-2072.
7. Hess AF, Weinstock M. 1924. Antirachitic properties imparted to inert fluids and green vegetables by ultraviolet radiation. *J Biol Chem* 62:301–313.
8. Steenbock H, Black A. 1924. The reduction of growthpromoting and calcifying properties in a ration by exposure to ultraviolet light. *J Biol Chem* 61:408–422.
9. Holick, MF. 1989. Phylogenetic and evolutionary aspects of vitamin D from phytoplankton to humans. In: Pang PKT, Schreibman MP, editors. *Vertebrate endocrinology: fundamentals and biomedical implications*, vol. 3. Orlando, FL: Academic Press, Inc (Harcourt Brace Jovanovich).
10. Holick, MF. 2003. Vitamin D: A millennium perspective. *J Cell Biochem*. 88:296–307.
11. Holick MF, MacLaughlin JA, Clark MB, Holick SA, Potts JT Jr, Anderson RR, Blank IH, Parrish JA, Elias P. 1980. Photosynthesis of previtamin D₃ in human skin and the physiologic consequences. *Science*. 210:203-205.
12. Holick MF, Tian XQ, Allen M 1995 Evolutionary importance for the membrane enhancement of the production of vitamin D₃ in the skin of poikilothermic animals. *Proc Natl Acad Sci USA*. 92:3124–3126.
13. Tian XQ, Holick MF. 1999. A liposomal model that mimics the cutaneous production of vitamin D₃. *J Biol Chem*. 274:4174–4179.
14. Loomis, WF. 1967. Skin-Pigment Regulation of Vitamin-D Biosynthesis in Man. Variation in solar ultraviolet at different latitudes may have caused racial differentiation in man. *Science*. 157(3788):501-506.
15. Holick MF, MacLaughlin JA, Doppelt SH. 1981. Regulation of cutaneous previtamin D₃ photosynthesis in man: Skin pigment is not an essential regulator. *Science*. 211:590–593.

16. Lalueza-Fox, C, Rompler, H, Caramelli, D, Staubert, C, Catalano, G, Hughes, D, Rohland, N, Pilli, E, Longo, L, Condemi, S, de la Rasilla, M, Fortea, J, Rosas, A, Stoneking, M, Schonebery, T, Bertranpetit, J and Hofreiter, M. 2007. A Melanocortin 1 Receptor Allele Suggests Varying Pigmentation Among Neanderthals. *Science*. 38:1453.
17. Clemens TL, Henderson SL, Adams JS, Holick MF. 1982. Increased skin pigment reduces the capacity of skin to synthesise vitamin D₃. *Lancet*. 6:74–76.
18. Matsuoka LY, Ide L, Wortsman J, MacLaughlin J, Holick MF. 1987. Sunscreens suppress cutaneous vitamin D₃ synthesis. *J Clin Endocrinol Metab*. 64:1165–1168.
19. Webb AR, Kline L, Holick MF. 1988. Influence of season and latitude on the cutaneous synthesis of vitamin D₃: Exposure to winter sunlight in Boston and Edmonton will not promote vitamin D₃ synthesis in human skin. *J Clin Endocrinol Metab*. 67:373–378.
20. Holick, MF, Chen, TC and Sauter, ER. 2007. Vitamin D and Skin Physiology: A D-Lightful Story. *J Bone Miner Res*. 22(S2): V28-V33.
21. Chel VGM, Ooms ME, Popp-Snijders C, Pavel S, Schothorst AA, Meulemans CCE, Lips P. 1998. Ultraviolet irradiation corrects vitamin D deficiency and suppresses secondary hyperparathyroidism in the elderly. *J Bone Miner Res*. 13:1238–1242.
22. Reid IR, Gallagher DJA, Bosworth J. 1985. Prophylaxis against vitamin D deficiency in the elderly by regular sunlight exposure. *Age Ageing* 15:35–40.
23. Chuck A, Todd J, Diffey B. 2001. Subliminal ultraviolet-B irradiation for the prevention of vitamin D deficiency in the elderly: A feasibility study. *Photochem Photoimmun Photomed* 17(4):168–171.
24. Holick, M.F. Vitamin D and Health: Evolution, Biologic Functions, and Recommended Dietary Intakes for Vitamin D. *Clin Rev Bone Miner Metab*. 2009. 7(1):2-19.
25. Moan J, Porojnicu AC, Dahlback A, Setlow RB. 2008. Addressing the health benefits and risks, involving vitamin D or skin cancer, of increased sun exposure. *Proc Natl Acad Sci USA*. 105(2): 668–73.
26. Grant WB, Holick MF. 2005. Benefits and requirements of vitamin D for optimal health: a review. *Altern Med Rev*. 10:94–111.
27. Holick, MF, Binkley, NC, Bischoff-Ferrari, HA, Gordon, CM, Hanley, DA, Heaney, RP, Murad, MH and Weaver, CM. Evaluation, Treatment & Prevention of Vitamin D Deficiency: An Endocrine Society Clinical Practice Guideline. *J Clin Endocrinol Metab*. 2011. 96(7):1911-1930.
28. Adams, JS, Clemens, TL, Parrish, A. and Holick, MF. Vitamin-D synthesis and metabolism after ultraviolet irradiation of normal and vitamin –D-deficient subjects. *N Engl J Med*. 1982. 306:722-725.

29. Looker AC, Pfeiffer CM, Lacher DA, Schleicher RL, Picciano, MF, Yetley EA. 2008. Serum 25-hydroxyvitamin D status of the US population: 1988–1994 compared with 2000–2004. *Am J Clin Nutr.* 88(6):1519–27.
30. Holick, M.F. 2007. Vitamin D Deficiency. *New Engl. J. Med.* 357:266-81.31.
31. Marwaha, R.K., Tandon, N., Reddy, D., Aggarwal, R., Singh, R., Sawhney, R.C., Saluja, B., Ganie, M., and Singh, S. 2005. Vitamin D and bone mineral density status of healthy schoolchildren in northern India. *Am J Clin Nutr.* 82:477-482.
32. Daly, RM, Gagnon, C, Lu, ZX, Magliano, DJ, Dunstan, DW, Sikaris, KA, Zimmet, Ebeling, PR, and Shaw, JE. 2011. Prevalence of vitamin D deficiency and its determinants in Australian adults aged 25 years and older: a national, population-based study. *Clin Endocrinol.* DOI: 10.1111/j.1365-2265.2011.04320.x.
33. Wolpowitz, D and Gilchrest, BA. 2006. The vitamin D questions: how much do you need and how should you get it? *J Am Acad Dermatol.* 54:301-317.
34. Kennedy, C, Bajdik, CD, Willemze, R, de Gruijl, FR and Bavinck, JN. 2003. The influence of painful sunburns and lifetime of sun exposure on the risk of actinic keratoses, seborrheic warts, melanocytic nevi, atypical nevi and skin cancer. *J Invest Dermatol.* 120(6):1087-1093.

Leitfaden zur EU-Richtlinie „Künstliche optische Strahlung“

G. Ott, L. Udovicic, E. Romanus¹

¹Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, Deutschland

1 Hintergrund

Die europäische Richtlinie 2006/25/EG über „Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung)“ ist am 5. April 2006 in Kraft getreten [1]. Die Grundlage bildet die Richtlinie des Rates vom 12. Juni 1989 (89/391/EWG) „über die Durchführung von Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Arbeitnehmer bei der Arbeit“ (Arbeitsschutz-Rahmen-Richtlinie). Konkretisierungen zu bestimmten Gefährdungsfaktoren im Zusammenhang mit dieser Rahmen-Richtlinie werden in Form von Einzelrichtlinien vorgenommen. Die 19. Einzelrichtlinie zur künstlichen optischen Strahlung ist die letzte in einer Reihe von vier Richtlinien, in denen die Ermittlung und Bewertung von Risiken sowie die zu ergreifenden Schutzmaßnahmen bei Exposition gegenüber physikalischen Einwirkungen geregelt werden. Vorausgegangen sind Richtlinien zum Schutz gegen Vibrationen (2002/44/EG), Lärm (2003/10/EG) und elektromagnetische Felder (2004/40/EG). Die Mitgliedstaaten sind dazu verpflichtet, die EG-Arbeitsschutz-Richtlinie zu künstlicher optischer Strahlung (2006/25/EG) bis zum 27. April 2010 in nationales Recht umzusetzen. In Deutschland ist dies in Form einer Arbeitsschutz-Verordnung erfolgt [2].

Im Artikel 13 der Richtlinie wird die Kommission zur Erstellung eines praktischen Leitfadens verpflichtet. Der Leitfaden soll eine Hilfestellung geben, um die Richtlinie besser zu verstehen. Dies betrifft insbesondere die Bestimmungen zu Artikel 4 „Ermittlung der Exposition und Bewertung der Risiken“ und Artikel 5 „Maßnahmen zur Vermeidung oder Verringerung der Risiken“ sowie zu den Expositionsgrenzwerten nach Anhang I „Inkohärente optische Strahlung“ und Anhang II „Laserstrahlung“. Im Begründungsteil der Richtlinie wird im Erwägungsgrund 15 gefordert:

„Die Kommission sollte einen praktischen Leitfaden erstellen, um Arbeitgebern, insbesondere den Geschäftsführern von KMU zu helfen, die technischen Vorschriften dieser Richtlinie besser zu verstehen. Die Kommission sollte sich bemühen diesen Leitfaden so rasch wie möglich zu erstellen, um den Mitgliedstaaten den Erlass der zur Durchführung dieser Richtlinie erforderlichen Maßnahmen zu erleichtern.“

2 Erarbeitung des Leitfadens

Von der Kommission wurde beim Beratenden Ausschuss für Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz eine Arbeitsgruppe mit folgendem Auftrag eingesetzt:

- Unterstützung der Kommission bei der Ausarbeitung des Lastenheftes
- Unterstützung bei einer öffentlichen Ausschreibung und Auswahl des Auftragnehmers
- Begleitung bei der Erstellung des Leitfadens

Die Arbeitsgruppe trat am 18.04.2007 zum ersten Mal zusammen, um die Kommission bei der Ausarbeitung der Leistungsbeschreibung für die Ausschreibung zu unterstützen.

Nach Auswahl des Auftragnehmers Ende 2007, der Health Protection Agency (HPA, Großbritannien) wurde in weiteren Sitzungen die Entwicklung des Leitfadens begleitet. Im vorgegebenen Zeitplan wurde von der Health Protection Agency ein endgültiger Entwurf vorgelegt, in dem nur noch redaktionelle Änderungen erforderlich waren.

Auf Initiative eines Mitgliedstaates wurde gewünscht einen Anhang hinzuzufügen, der sich den Problemen des Gebrauchs von Substanzen widmet, die die Lichtempfindlichkeit von Menschen steigert.

Viele EU-Mitgliedstaaten haben die Bedeutung dieses Leitfadens bei der Anwendung der Richtlinie unterstrichen. Einige Mitgliedstaaten haben angegeben, dass ihre Gesetzgebung direkt auf diesen Leitfaden verweisen wird (oder auf einen Leitfaden, der von diesem abgeleitet ist). Die Autoren haben im Rahmen einer Expertengruppe des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales (BMAS) inhaltliche Zuarbeiten zu den nationalen Besonderheiten bei der Erstellung des Leitfadens geliefert und maßgeblich an der Überarbeitung der deutschen Übersetzung hinsichtlich einer einheitlichen und sachgerechten Verwendung von Begriffen mitgewirkt [3].

Es ist vorgesehen, dass die Europäische Kommission den Leitfaden in den 22 EU-Sprachen veröffentlichen wird. Seit Oktober 2011 liegt der Leitfaden in deutscher, englischer und französischer Sprachfassung vor [4].

3 Inhalte des Leitfadens

Mit der Europäischen Richtlinie 2006/25/EG „Künstliche optische Strahlung“ sind die Mindestanforderungen für den Schutz von Arbeitnehmern vor Gefährdungen durch die Einwirkung künstlicher optischer Strahlung (ultraviolette Strahlung, sichtbare Strahlung,

Infrarotstrahlung) während der Arbeit festgelegt. Die Richtlinie enthält die Grenzwerte für die Exposition gegenüber inkohärenter optischer Strahlung und Laserstrahlung. Die Einhaltung dieser Expositionsgrenzwerte stellt sicher, dass Arbeitnehmer, die künstlichen Quellen optischer Strahlung ausgesetzt sind, vor allen bekannten Gesundheitsschäden der Augen und der Haut geschützt sind. In der Richtlinie sind zudem die Pflichten des Arbeitgebers hinsichtlich der Ermittlung und Bewertung sowie, falls erforderlich, einer Messung und/oder Berechnung des Ausmaßes der Exposition gegenüber optischer Strahlung festgelegt. Wird im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung festgestellt, dass die Expositionsgrenzwerte möglicherweise überschritten werden, ist der Arbeitgeber verpflichtet, technische und/oder organisatorische Maßnahmen zur Vermeidung oder Verringerung der Exposition zu erarbeiten und durchzuführen. Die Anwendung der Richtlinie, insbesondere die Ermittlung der Exposition und die Bewertung der Risiken sowie die richtige Auswahl von Maßnahmen zur Vermeidung und Verringerung der Risiken erfordern häufig ein hohes Maß an Sachverstand und Erfahrung. Darüber hinaus werden sämtliche Quellen optischer Strahlung, auch beispielsweise Allgemeinbeleuchtung und Signalanzeigen, durch die Richtlinie erfasst. Damit sind kaum Arbeitsplätze vorstellbar, die von den Anforderungen der Richtlinie nicht betroffen sind. Also sieht sich nahezu jeder Arbeitgeber mit der Forderung zumindest nach einer Gefährdungsbeurteilung konfrontiert. Um diese Anforderungen der Richtlinie besser zu verstehen, wurde der "Unverbindliche Leitfaden zur Richtlinie 2006/25/EG über künstliche optische Strahlung" erarbeitet.

Wesentliche Inhalte des Leitfadens sind:

- Künstliche Quellen optischer Strahlung (inkohärente Quellen, Laser)
- Gesundheitsschäden aufgrund der Exposition durch optischer Strahlung
- Anforderungen der Richtlinie
- Anwendung der Expositionsgrenzwerte
- Gefährdungsbeurteilung
- Messung optischer Strahlung
- Einsatz von Herstellerdaten
- Schutzmaßnahmen
- Gesundheitsüberwachung
- 11 Anhänge, u.a. mit Beispielen zur Gefährdungsbeurteilung

3.1 Triviale Quellen

Die Richtlinie 2006/25/EG schließt keine Quellen künstlicher optischer Strahlung eindeutig aus. Bei einer großen Anzahl von Strahlungsquellen, wie z. B. bei normaler Beleuchtung oder Signallampen, handelt es sich um Quellen, von denen nur eine geringe Strahlung ausgeht oder der Abstand so groß ist, dass bei bestimmungsgemäßer Anwendung von diesen Quellen keine Gefährdung ausgeht.

Diese Quellen werden als triviale Quellen bezeichnet und als „sicher“ angesehen wenn:

- Die Strahlungsquelle nur einen Bruchteil ($\leq 20\%$) des Expositionsgrenzwerts erreicht (unbedeutende Bestrahlung) oder
- Beim Einsatz der Strahlungsquelle eine Grenzwertüberschreitung unwahrscheinlich ist (wahrscheinlich ohne Gesundheitsrisiko).

Beispiele von Quellen, die nur unbedeutende Bestrahlungen ergeben und daher als sicher gelten

Deckenbeleuchtung mit Leuchtstofflampen, über denen ein Diffusor angebracht ist
Computer oder ähnliche Bildschirmgeräte
Deckenbeleuchtung mit Kompakt-Leuchtstofflampen
Flutlicht mit Kompakt-Leuchtstofflampe
UVA-Insektenfalle
Deckenbeleuchtung mit Wolfram-Halogen-Strahlern
Wolframlampen am Arbeitsplatz (inkl. Vollspektrum-Tageslichtlampen)
Deckenbeleuchtung mit Wolframlampen
Büro-Kopiergeräte
Geräte für Whiteboard-Präsentationen (interaktive elektronische Tafel)
LED-Anzeigen
PDA
Fahrzeugblink- und Rückfahrlichter, Brems- und Nebelleuchten
Fotografische Blitzlichter
Gasbetriebene Deckenheizstrahler
Straßenbeleuchtung

Beispiele von Quellen, bei deren Einsatz der Strahlungsquelle eine Grenzwertüberschreitung unwahrscheinlich ist und somit unter vorhersehbaren Umständen wahrscheinlich kein Gesundheitsrisiko darstellen.

Quelle	Sicherer Einsatz unter vorhersehbaren Umständen
Deckenbeleuchtung mit Leuchtstofflampen ohne Diffusor	sicher bei normaler Beleuchtungsstärke ($\approx 600 \text{ lx}$)
Halogen-Metaldampf-/Quecksilberhochdruck-Flutlicht	sicher, sofern vordere Glasabdeckung intakt und Strahlung nicht im direkten Blickfeld liegt
Schreibtisch-Projektor (Beamer)	sicher, sofern nicht direkt in den Strahl geblickt wird
Niederdruck-UVA-Strahler (Schwarzlicht)	sicher, sofern Strahlung nicht im direkten Blickfeld liegt
Jegliche Lasergeräte der „Laserklasse 1“ gemäß EN 60825-1	sicher, sofern Abdeckung intakt ist; evtl. nicht sicher, wenn Abdeckung entfernt wird
Jegliches Produkt der „freien Gruppe“ gemäß EN 62471	sicher, sofern Strahlung nicht im direkten Blickfeld liegt; evtl. nicht sicher, wenn Abdeckung entfernt wird
Fahrzeugscheinwerfer	sicher, sofern ein längerer Direktblick in die Strahlung vermieden wird

Bei diesen Beispielen ist zu beachten, dass die Beurteilung der aufgeführten Quellen unter bestimmten Annahmen erfolgt ist und eine Übertragung auf die eigene Quelle, nicht ohne Prüfung erfolgen sollte. Dazu ist es erforderlich, die Vorgehensweise bei den ausgearbeiteten Beispielen im Anhang D näher zu betrachten z. B. ist bei UV-A Insektenfallen neben den Leistungsdaten der Strahlenquelle auch die Aufenthaltsbereiche von Personen zu beachten.

3.2 Gefährdungsbeurteilung

Zu den Pflichten des Arbeitgebers gehört eine umfassende Gefährdungsbeurteilung, bei denen alle mit der Arbeit verbundenen Gefährdungen berücksichtigt werden müssen. Der Leitfaden beschreibt dazu eine Vorgehensweise in folgenden Schritten vor:

- **Schritt 1:** Identifizierung der Gefahren und gefährdeten Personen. Dabei sind sämtliche Betriebszustände zu berücksichtigen, einschließlich Wartung und Reparatur
- **Schritt 2:** Einschätzung und Priorisierung der Risiken. Dabei sollte zunächst geprüft werden, ob eine triviale Quelle vorliegt. In anderen Fällen ist die Ex-

position mit den zulässigen Grenzwerten zu vergleichen und zu untersuchen, ob mehrere Strahlungsquellen vorhanden sind.

- **Schritt 3:** Entscheidung über Präventivmaßnahmen. Der Leitfaden gibt Hinweise zu Schutzmaßnahmen, die zur Minimierung des Expositionsrisikos bei künstlicher optischer Strahlung eingesetzt werden können.
- **Schritt 4:** Umsetzung der Präventivmaßnahmen. Es ist zu prüfen, ob bis zur Umsetzung der Präventivmaßnahmen die Arbeit unter Auflagen weitergeführt oder nicht weitergeführt werden kann.
- **Schritt 5:** Überwachung und Überarbeitung, d. h. die Wirksamkeit der Maßnahmen ist zu überprüfen und eine erneute Bewertung in festgelegten Zeitabständen oder nach Änderung der Ausgangssituation durchzuführen.

Der Leitfaden liefert einen Überblick über Tätigkeiten, bei denen Arbeitnehmer den Risiken einer Exposition gegenüber künstlicher optischer Strahlung ausgesetzt sein können. Dies können Tätigkeiten sein, bei denen die optische Strahlung notwendiger Bestandteil eines Arbeitsvorgangs ist (z. B. in der Lasermaterialbearbeitung) sowie solche, bei denen Strahlung nur als Nebenprodukt entsteht (z. B. beim Schweißen).

3.3 Herstellerangaben und Messung

Bei der Gefährdungsbeurteilung können die Herstellerangaben dem Arbeitgeber bei der Einschätzung der Gefährdung sowie der Bestimmung der erforderlichen Schutzmaßnahmen eine wichtige Unterstützung bieten. Dabei kann die Sicherheitsklassifizierung von Lasern und inkohärenten optischen Strahlungsquellen sehr hilfreich sein.

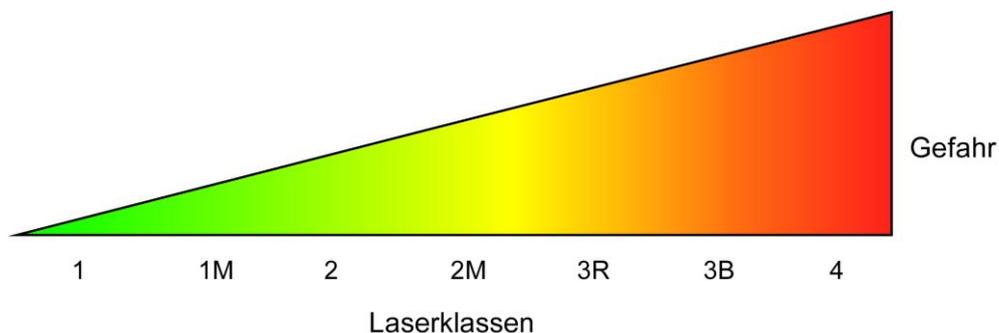


Abb. 1: Laserklassen nach DIN EN 60825-1 mit zunehmender Gefährdung

Nicht in allen Fällen sind die Herstellerangaben für eine Gefährdungsbeurteilung hinreichend, sodass eine Messung der optischen Strahlung notwendig wird. Die dazu erforderlichen Messgeräte sind relativ teuer und können nur mit entsprechender Sachkenntnis eingesetzt werden. Bei falscher Bedienung können Fehler entstehen, die zu äußerst ungenauen Daten bei der Gefährdungsbeurteilung führen. Falls die eigene Ausstattung mit qualifizierter Messtechnik nicht ausreichend ist und die Erfahrung im Einsatz der Geräte fehlt, sollte externe Unterstützung in Anspruch genommen werden.

3.4 Anhänge

In den Anhängen des Leitfadens werden die Eigenschaften der optischen Strahlung, ihre biologische Wirkung auf das Auge und die Haut sowie der Gebrauch von Substanzen, die die Lichtempfindlichkeit von Menschen verstärken, erläutert. Den umfangreichsten Teil des Leitfadens umfassen ausgearbeitete Beispiele für einige künstliche Quellen optischer Strahlung. Es werden zunächst die Gefährdungsbeurteilungen von 20 unterschiedlichen Quellen vorgestellt, die an den meisten Arbeitsplätzen in Büros und Geschäften eingesetzt werden, von der Schreibtischleuchte bis zum Bildschirm eines Laptop-Computers. Es folgt die Darstellung einiger von der Exposition gegenüber künstlicher optischer Strahlung betroffener Tätigkeiten, wie z. B. in der Glas- und Stahlverarbeitung, bei Laser-Shows oder in der Lasermaterialbearbeitung, und es werden deren Besonderheiten sowie Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt. Am Ende des Leitfadens sind die Anforderungen weiterer europäischer Richtlinien hinsichtlich der künstlichen optischen Strahlung dargestellt. Weiterhin sind relevante europäische und internationale Normen, Leitfäden, Fachzeitschriften sowie Internetadressen wichtiger nationaler, europäischer und internationaler Organisationen, die für den Schutz vor optischer Strahlung relevant sind, zusammengestellt.

4 Fazit

Der Leitfaden bietet für Arbeitgeber, insbesondere von kleinen und mittelständischen Unternehmen, eine gute Hilfestellung zur Anwendung der Europäischen Richtlinie 2006/25/EG „Künstliche optische Strahlung“. Von wesentlicher Bedeutung sind die Auslegungen zu den trivialen Quellen. Für die Praxis von großem Nutzen sind die im Anhang aufgeführten beispielhaften Gefährdungsbeurteilungen für verschiedene Anwendungen von optischen Strahlungsquellen.

5 Zusammenfassung

Die europäische Richtlinie 2006/25/EG über „Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung)“ ist am 5. April 2006 in Kraft getreten. In Artikel 13 der Richtlinie wird die Kommission zur Erstellung eines praktischen Leitfadens verpflichtet. Der Leitfaden soll eine Hilfestellung geben, um die Richtlinie besser zu verstehen. Dies betrifft insbesondere die Bestimmungen zu Artikel 4 „Ermittlung der Exposition und Bewertung der Risiken“ und Artikel 5 „Maßnahmen zur Vermeidung oder Verringerung der Risiken“ sowie zu den Expositionsgrenzwerten nach Anhang I „Inkohärente optische Strahlung“ und Anhang II „Laserstrahlung“. In den Anhängen des Leitfadens werden die Eigenschaften der optischen Strahlung, ihre biologische Wirkung auf das Auge und die Haut sowie der Gebrauch von Substanzen, die die Lichtempfindlichkeit von Menschen verstärken, erläutert. Weiterhin sind umfangreiche ausgearbeitete Beispiele für einige künstliche Quellen optischer Strahlung enthalten und Tätigkeitsbereiche beschrieben, bei denen künstliche optische Strahlungsquellen zur Anwendung kommen.

Literatur

- [1] Richtlinie 2006/25/EG des Europäischen Parlaments und Rates vom 5. April 2006 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung) (19. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG), ABl. EG L 114 vom 27. 4. 2006, S. 38 – 59, http://bb.osha.de/docs/RL_2006_25_EG_Opt_DE.pdf
- [2] Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 2006/25/EG zum Schutz der Arbeitnehmer vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung und zur Änderung von Arbeitsschutzverordnungen vom 19. Juli 2010. BGBl. I (2010) Nr. 38 vom 26. Juli 2010 <http://www.gesetze-im-internet.de/ostrv/index.html>
- [3] Udovicic, L.: Europäischer Leitfaden zur Richtlinie 2006/25/EG über künstliche optische Strahlung, sis, Jahrgang 61, Heft 6, Seite 267-268
- [4] Ein unverbindlicher Leitfaden zur Richtlinie 2006/25/EG über künstliche optische Strahlung 2011, <http://bookshop.europa.eu/de/ein-unverbindlicher-leitfaden-zur-richtlinie-2006-25-eg-ueber-kuenstliche-optische-strahlung-pbKE3010384/;pgid=y8dIS7GU>

Die Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung

Harald Siekmann

IFA, Eichendorffstraße 35, 53227 Bonn

1 Einleitung

Es gibt eine Reihe von Arbeitsplätzen, an denen optische Strahlung (ultraviolette, sichtbare oder infrarote Strahlung) auf Arbeitnehmer einwirken kann. Dazu gehören Elektro- und Gasschweißen, Arbeiten an Glas- und Metallschmelzen, der Betrieb von Gasbrennern, der Einsatz von UV- und IR-Strahlern zur Trocknung von Lacken, Farben und Klebern, zur Rissprüfung und zur Sterilisation sowie der Umgang mit Lasergeräten [1]. Sofern die Exposition von Beschäftigten durch optische Strahlung zu stark ist, können Schädigungen an den Augen (Hornhaut-/Bindehautentzündung, Linsentrübung, Netzhautverbrennung), an der Haut (Sonnenbrand, Hautalterung, Hautkrebs) und am gesamten Körper (Schädigung des Immunsystems) auftreten.



Bild 1: UV-, sichtbare und IR-Strahlenemissionen beim Schweißen

Umfassende Regelungen zum Schutz vor den Gefährdungen durch optische Strahlung gab es bisher nur auf dem Gebiet Laserstrahlung. Dort ist seit längerem die Unfallverhütungsvorschrift BGV B2 „Laserstrahlung“ [2] in Kraft, die erfolgreich dazu beigetragen hat, dass Unfälle mit Laserstrahlung vergleichsweise selten auftreten. Im Juli 2010 wurde die Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV) [3]

erlassen. Sie betrifft außer Laserstrahlung auch Expositionen durch inkohärente optische Strahlung aus künstlichen Quellen an Arbeitsplätzen.

2 Arbeitsschutzverordnung künstliche optische Strahlung (OStrV)

2.1 Geltungsbereich

Die Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV) setzt die EU-Richtlinie 2006/25/EG „Künstliche optische Strahlung“ [4] in nationales Recht um. Sie gilt für Expositionen von Arbeitnehmern durch optische Strahlung aus künstlichen Quellen an Arbeitsplätzen im Wellenlängenbereich von 100 nm bis 1mm. Sie gilt sowohl für Expositionen durch inkohärente optische Strahlung als auch für Expositionen durch Laserstrahlung. In die Verordnung wurden Expositionen durch Sonnenstrahlung bei Arbeiten im Freien nicht einbezogen. Gefährdungen durch Sonnenstrahlung sind nach dem Arbeitsschutzgesetz [5] und nach der Arbeitsstättenverordnung [6] zu ermitteln und bewerten und es sind bei Bedarf geeignete Schutzmaßnahmen zu treffen.

2.2 Generelle Anforderungen der OStrV

Die OStrV verlangt vom Unternehmer im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung, Gefährdungen durch Expositionen Beschäftigter gegenüber optischer Strahlung an Arbeitsplätzen zu ermitteln, zu bewerten und bei Bedarf Maßnahmen zur Vermeidung oder Verringerung gefährlicher Expositionen festzulegen. Die festgelegten Expositionsgrenzwerte dürfen nicht überschritten werden.

2.3 Geringfügige Expositionen

Ein Problem ist der Anwendungsbereich der Arbeitsschutzverordnung OStrV. Die OStrV gilt „zum Schutz der Beschäftigten bei der Arbeit vor tatsächlichen oder möglichen Gefährdungen ihrer Gesundheit und Sicherheit durch optische Strahlung aus künstlichen Strahlungsquellen“. Es stellt sich die Frage: Was sind „tatsächliche“ und was sind „mögliche“ Gefährdungen? Nach §3 OStrV ist auf jeden Fall von einer Gefährdung auszugehen, wenn die festgelegten Expositionsgrenzwerte überschritten werden. Dies kann man als eine „tatsächliche“ Gefährdung auffassen. Aber wann eine „mögliche“ Gefährdung vorliegt, ist der Verordnung nicht so klar zu entnehmen. UV-Strahlung kann langfristig auch bei Expositionen, die unter den Grenzwerten liegen, zu Schäden (wie z.B. Hautkrebs) führen. Und geringfügige Expositionen durch optische Strahlung, beispielsweise durch künstliche Beleuchtung, schwache Wärmestrahlung, Displays und

Anzeigenleuchten, kommen praktisch überall vor, ohne dass hiervon Gefährdungen ausgehen. Auf solche geringfügigen Expositionen ist die OStrV nicht anzuwenden. Aber: Wo liegt die Grenze zwischen einer „möglichen Gefährdung“ und „keiner Gefährdung“, ab der eine detaillierte Gefährdungsbeurteilung nach OStrV durchzuführen ist? Falls schon jede kleinste Exposition zu ermitteln und zu bewerten wäre, würde dies einen extrem hohen Aufwand bedeuten, der nicht gerechtfertigt wäre. Es muss also für die praktische Umsetzung eine Schwelle für optische Strahlenexpositionen definiert werden, unterhalb der die OStrV nicht anzuwenden ist. Hierzu bietet sich das Konzept der „geringfügigen Expositionen“ an, das im Rahmen der Normung [7] entwickelt wurde. Als geringfügig sind Expositionen anzusehen, die so niedrig sind, dass sie mit großer Wahrscheinlichkeit die Expositionsgrenzwerte unterschreiten und dass durch sie keine Gefährdung von Beschäftigten zu erwarten ist. Beispiele sind Expositionen durch die übliche künstliche Beleuchtung, durch Bildschirme, Anzeigen und Signalleuchten. Liegen in einem Betrieb, z. B. an Büroarbeitsplätzen, nur solche geringfügigen Expositionen vor, dann ist die OStrV dort nicht anzuwenden [8]. Natürlich muss dies im Rahmen der nach dem Arbeitsschutzgesetz für alle Arbeitsplätze durchzuführenden Gefährdungsbeurteilung geprüft und dokumentiert werden. Konkrete Werte, wann nur „geringfügige“ Expositionen vorliegen, werden in der OStrV nicht genannt. Nach Erfahrungen des Instituts für Arbeitsschutz der DGUV (IFA) sind Expositionen durch optische Strahlung, die nicht höher als 10 - 20% der Expositionsgrenzwerte liegen, als geringfügig anzusehen und führen zu keiner akuten Gefährdung. Fälle, in denen man das Konzept der geringfügigen Expositionen anwenden kann und in denen es nicht angewendet werden sollte, sind in [8] beschrieben. Expositionen durch UV-Strahlung sollten langfristig in jedem Fall so gering wie möglich gehalten werden.

2.4 Ermittlung von Expositionen durch optische Strahlung

Im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung sind die an Arbeitsplätzen auftretenden Expositionen durch künstliche optische Strahlung zu ermitteln und zu bewerten. Der Unternehmer kann sich die notwendigen Informationen beim Hersteller oder Inverkehrbringer der verwendeten Arbeitsmittel oder mit Hilfe anderer zugänglicher Quellen beschaffen. Dazu gehören zum Beispiel Angaben der Strahlenemissionen der optischen Quellen in Bedienungsanleitungen und technischen Unterlagen. Auch eine Klassifizierung der Quellen nach einschlägigen Normen, wie DIN EN 12198-1 [9], DIN EN 62471 [10] oder DIN EN 16237 [11], kann die Gefährdungsbeurteilung erheblich vereinfachen [8]. Lässt sich jedoch mit den vorhandenen Informationen nicht sicher

feststellen, ob die Expositionsgrenzwerte nach § 6 OStrV eingehalten werden, ist der Umfang der Expositionen durch Berechnungen oder Messungen nach § 4 OStrV festzustellen. Messungen und Berechnungen müssen nach dem Stand der Technik fachkundig geplant und durchgeführt werden. Die eingesetzten Messverfahren und Messgeräte sowie eventuell erforderliche Berechnungsverfahren müssen den vorhandenen Arbeitsplatz- und Expositionsbedingungen angepasst und geeignet sein, die jeweiligen physikalischen Größen zu bestimmen. Die Messergebnisse müssen die Entscheidung erlauben, ob die Expositionsgrenzwerte eingehalten werden.



Bild 2: Exposition durch Wärmestrahlung an einem Metallschmelzofen

Das Messen optischer Strahlenexpositionen ist eine komplexe Aufgabe und erfordert entsprechende Fachkenntnisse und Erfahrungen (Fachkunde nach § 5 OStrV). Der Arbeitgeber kann damit fachkundige Personen beauftragen. Hilfen für die Planung und Durchführung von Messungen inkohärenter optischer Strahlung bieten die Normen der Internationalen Beleuchtungskommission CIE und des Europäischen Komitees für Normung CEN. Von besonderer Bedeutung sind die europäischen Normen DIN EN 14255, Teile 1 und 2 [7], in denen Verfahren zur Messung und Bewertung von ultravioletten, sichtbaren und infraroten Strahlenexpositionen durch künstliche Quellen an Arbeitsplätzen detailliert beschrieben sind. Werden Messungen nach den einschlägigen Normen durchgeführt, dann wird die Forderung der OStrV erfüllt, die anerkannten Regeln der Technik zu beachten. Für Berechnungen von Strahlenexpositionen gibt es bisher nur

wenige Hilfen, z.B. das Rechenprogramm Catrayon [12]. Wie Messungen und Berechnungen von optischen Strahlenexpositionen durchgeführt werden können, ist in [8] beschrieben.

2.5 Bewertung von optischen Strahlenexpositionen

Zur Bewertung sind die an Arbeitsplätzen ermittelten optischen Strahlenexpositionen mit den Expositionsgrenzwerten zu vergleichen. Die OStrV enthält keine eigenen Grenzwerte, sondern verweist in §6 auf die in der den Anlagen I und II der EU-Richtlinie 2006/25/EG für Expositionen durch inkohärente optische Strahlung und durch Laserstrahlung festgelegten Grenzwerte. Beim Vergleich der Expositionen mit den Grenzwerten ist zu berücksichtigen, wie zuverlässig die Expositionen ermittelt werden konnten. Liegt z. B. die ermittelte Exposition knapp unter dem Grenzwert (z. B. bei 90% des Grenzwertes) und ist die erreichte Messunsicherheit vergleichsweise groß (z. B. 30%), dann kann nicht mit ausreichender Sicherheit die Feststellung getroffen werden, dass der Grenzwert eingehalten wird. In diesem Fall ist die Ermittlung mit geringerer Messunsicherheit zu wiederholen oder die Exposition ist durch geeignete Maßnahmen zu verringern und danach sind die Ermittlung und Bewertung zu wiederholen.

2.6 Detaillierte Anforderungen nach OStrV

Neben den allgemeinen Anforderungen enthält die Arbeitsschutzverordnung OStrV in § 3(2) Einzelheiten, die bei der Gefährdungsbeurteilung zu berücksichtigen sind. Dazu gehören:

- Art, Ausmaß und Dauer der Exposition durch künstliche optische Strahlung
- der Wellenlängenbereich
- die Expositionsgrenzwerte
- alle Auswirkungen auf die Gesundheit und Sicherheit von Beschäftigten, die besonders gefährdeten Gruppen angehören.

Zu den besonders betroffenen Personen gehören Kinder und Jugendliche, soweit auf sie die Arbeitsschutzverordnung OStrV bei Lehrveranstaltungen anzuwenden ist, Personen mit einem empfindlichen Hauttyp sowie Personen, die genetisch- oder krankheitsbedingt besonders empfindlich auf Expositionen durch optische Strahlung reagieren.

- alle möglichen Auswirkungen auf die Sicherheit und Gesundheit von

Beschäftigten, die sich aus dem Zusammenwirken von künstlicher optischer Strahlung und fotosensibilisierenden chemischen Stoffen am Arbeitsplatz ergeben können. Die Aufnahme bestimmter chemischer Stoffe in den Körper kann die Fotosensibilität von Personen erhöhen. Solche Stoffe können in Kosmetika oder Medikamenten enthalten sein oder an Arbeitsplätzen in der Luft oder auf kontaminierten Oberflächen vorkommen. Ist der zu bewertende Arbeitsplatz mit chemischen Stoffen belastet, dann ist zu prüfen, ob darunter auch Stoffe sind, die die Fotosensibilität erhöhen. Eine Liste fotosensibilisierender Stoffe ist z. B. in der wissenschaftlichen Begründung zur Empfehlung der Strahlenschutzkommission „Schutz des Menschen vor den Gefahren der UV-Strahlung in Solarien“ [13] enthalten. Treten solche Stoffe am Arbeitsplatz auf, dann kann möglicherweise die Einhaltung der Expositionsgrenzwerte nach EU-Richtlinie 2006/25/EG zum Schutz nicht ausreichen. Es sollten dann Maßnahmen ergriffen werden, um diese Stoffe vom Arbeitsplatz zu entfernen.

- alle indirekten Auswirkungen auf die Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten, zum Beispiel durch Blendung, Brand- und Explosionsgefahr.

Strahlenquellen, die eine starke sichtbare Strahlung emittieren, können zu Blendungserscheinungen führen. Dies können z. B. Lampen zur Beleuchtung von Gebäuden, Sportanlagen, Bühnen oder Filmsets sein. Auch Fahrzeuglampen können blenden. Eine Blendung kann beim Geblendeten eine Verminderung der Sehfähigkeit verursachen. Bei einem Fahrzeugführer kann dies z. B. zum Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug und zu einem Unfall mit weitreichenden Folgen führen. Es müssen daher Maßnahmen zur Vermeidung von Blendungserscheinungen ergriffen werden, wenn durch die Blendung von Beschäftigten sekundäre Gefährdungen auftreten können. Hinweise auf Situationen, in denen Blendungserscheinungen auftreten können, und auf Verfahren zur Bewertung von Blendungen enthält die Empfehlung „Blendung“ [14] der Strahlenschutzkommission.

Starke Wärmestrahlung kann unter Umständen Stoffe entzünden oder Gas- bzw. Dampfgemische zur Explosion bringen. Dies ist zu beachten, wenn die Strahlung aus optischen Quellen mit Hilfe von Linsen, Spiegeln, etc. verstärkt wird. Es sollte auch vermieden werden, am Arbeitsplatz leicht entzündliche Stoffe und explosionsfähige Gemische aufzubewahren oder zu erzeugen. Bei der Gefährdungsbeurteilung ist dies zu prüfen. Gegebenenfalls muss externe Sachkunde eingeschaltet werden.

- die Verfügbarkeit und die Möglichkeit des Einsatzes alternativer Arbeitsmittel und Ausrüstungen, die zu einer geringeren Exposition der Beschäftigten führen (Substitutionsprüfung).

Sofern die Möglichkeit besteht, Arbeitsmittel einzusetzen, die keine Strahlenquellen enthalten, deren Emissionen zu Grenzwertüberschreitungen bei den Beschäftigten führen können, sollte diese Alternative gewählt werden. Dabei ist aber zu beachten, welche Gefährdungen durch alternative Arbeitsmittel entstehen können. Z. B. können Desinfektionen nicht nur mit UV-Strahlung sondern auch mit Hilfe chemischer Stoffe durchgeführt werden. Es ist dann im Einzelfall abzuwägen, welche Gefährdungen größer sind und welche Maßnahmen zur Reduzierung der Gefährdungen zur Verfügung stehen.

- Erkenntnisse aus arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchungen sowie hierzu allgemein zugängliche veröffentlichte Informationen
- Die Expositionen der Beschäftigten durch künstliche optische Strahlung aus mehreren Quellen
- Herstellerangaben zu optischen Strahlenquellen und anderen Arbeitsmitteln
- die Klassifizierung der Lasereinrichtungen und gegebenenfalls der in den Lasereinrichtungen zum Einsatz kommenden Laser nach dem Stand der Technik
- die Klassifizierung von inkohärenten optischen Strahlenquellen nach dem Stand der Technik, von denen vergleichbare Gefährdungen wie bei Lasern der Klassen 3R, 3B und 4 ausgehen
- die Arbeitsplatz- und Expositionsbedingungen, die zum Beispiel im Normalbetrieb, bei Einrichtungsvorgängen sowie bei Instandhaltungs- und Reparaturarbeiten auftreten können

In [8] werden Einzelheiten für detaillierte Gefährdungsbeurteilungen beschrieben.

2.7 Anwendung von Schutzmaßnahmen

Zeigt die Gefährdungsbeurteilung, dass an einem Arbeitsplatz ein oder mehrere Expositionsgrenzwert(e) überschritten werden können, dann sind Maßnahmen nach dem Stand der Technik durchzuführen, um Gefährdungen der Beschäftigten auszuschließen oder so weit wie möglich zu verringern. Dazu sind die Entstehung und die Ausbreitung künstlicher optischer Strahlung vorrangig an der Quelle zu verhindern oder auf ein Minimum zu reduzieren. Wie im Arbeitsschutz üblich haben technische

Maßnahmen Vorrang vor organisatorischen und individuellen Maßnahmen. Persönliche Schutzausrüstungen sind dann zu verwenden, wenn technische und organisatorische Maßnahmen nicht ausreichen oder nicht anwendbar sind.

Zu den Maßnahmen gehören insbesondere:

- alternative Arbeitsverfahren, welche die Exposition der Beschäftigten durch künstliche optische Strahlung verringern,
- Auswahl und Einsatz von Arbeitsmitteln, die in geringerem Maße künstliche optische Strahlung emittieren,
- technische Maßnahmen zur Verringerung der Exposition der Beschäftigten durch künstliche optische Strahlung, falls erforderlich auch unter Einsatz von Verriegelungseinrichtungen, Abschirmungen oder vergleichbaren Sicherheitseinrichtungen,
- Wartungsprogramme für Arbeitsmittel, Arbeitsplätze und Anlagen,
- die sicherheitsgerechte Gestaltung und die Einrichtung der Arbeitsstätten und Arbeitsplätze,
- organisatorische Maßnahmen zur Begrenzung von Ausmaß und Dauer der Exposition,
- Auswahl und Einsatz einer geeigneten persönlichen Schutzausrüstung,
- die Verwendung der Arbeitsmittel nach den Herstellerangaben.

Einzelheiten zur Anwendung geeigneter Schutzmaßnahmen bei Expositionen durch inkohärente optische Strahlung und durch Laserstrahlung sind in [8] zu finden.

Arbeitsbereiche, in denen die Expositionsgrenzwerte für künstliche optische Strahlung überschritten werden können, sind zu kennzeichnen. Bild 3 zeigt die Kennzeichen für Gefahren durch inkohärente optische Strahlung und durch Laserstrahlung. Sie können durch weitere Hinweise, z. B. auf die Art der Strahlung (UV-Strahlung, IR-Strahlung, Laserklasse und Wellenlänge bei Laserstrahlung), ergänzt werden.



Bild 3: Warnzeichen vor Gefahren durch inkohärente optische Strahlung (links) und durch Laserstrahlung

3 Probleme bei der Anwendung der Arbeitsschutzverordnung OStrV

Während der Bereich Laserstrahlung durch die Unfallverhütungsvorschrift BGV B2 schon seit längerem geregelt ist und der Arbeitsschutz dort – u. a. durch den Einsatz von Laserschutzbeauftragten - gut funktioniert, gibt es bei der Anwendung der OStrV für Expositionen durch inkohärente optische Strahlung noch eine Reihe von Problemen (siehe [8,15]). Neben der Frage, ab wann die OStrV bei geringfügigen Expositionen anzuwenden ist, gehören zu den Schwierigkeiten bei der Umsetzung u. a.

- **die Komplexität von Messungen und Berechnungen**

Messungen von optischen Strahlenexpositionen sind aufwändig und verlangen spezielle Kenntnisse; geeignete Messgeräte sind teuer. Nur größere Betriebe werden es sich leisten können, eigene Messgeräte zu beschaffen. Messgeräte, die eine ausreichende Genauigkeit aufweisen, sind häufig Labormessgeräte, die nicht für den rauen Einsatz an Arbeitsplätzen vorgesehen sind. Die spektrale Anpassung zur Nachbildung von Messgrößen wie E_{eff} , L_R oder L_B ist häufig nicht ausreichend. Ein großes Problem ist oft die Bestimmung der Aufenthaltsdauer der Beschäftigten im Strahlungsbereich. Hinweise, wie Expositionsmessungen durchzuführen sind und welche Messverfahren geeignet sind, enthalten die Normen DIN EN 14255 [7] und das Praxishandbuch [8].

- **das Fehlen fachkundiger Personen und Dienste**

Da eine Gefährdungsbeurteilung nach OStrV kompliziert sein kann, hat der Unternehmer die Möglichkeit, fachkundige Personen oder Dienste damit zu beauftragen. Allerdings gibt es in Deutschland zum jetzigen Zeitpunkt für inkohärente

optische Strahlung noch nicht genügend Fachkundige, die solche Aufgaben für alle betroffenen Betriebe übernehmen könnten. Es ist deshalb nötig, fachkundige Personen auszubilden und dafür entsprechende Ausbildungskurse anzubieten.

- **Lücken bei den Expositionsgrenzwerten**

Die Arbeitsschutzverordnung OStrV gilt zwar für den gesamten optischen Wellenlängenbereich von 100 nm bis 10^6 nm (1mm). Expositionsgrenzwerte sind aber für inkohärente optische Strahlung nur im Bereich zwischen 180 nm und 3.000 nm festgelegt. Für den Bereich zwischen 100 nm und 180 nm sowie zwischen 3.000 nm und 10^6 nm ist eine Bewertung von ermittelten Strahlenexpositionen nicht möglich. Für Laserstrahlung gilt dies für den Bereich von 100 nm bis 180 nm. Um dennoch eine Gefährdungsbeurteilung für solche optische Strahlenexpositionen durchführen zu können, für die Grenzwerte fehlen, wurden vom IFA Empfehlungen [8,16,17] dazu veröffentlicht. Für den Wellenlängenbereich zwischen 100 nm und 180 nm wird empfohlen, dort auch den Grenzwert von 180 nm Wellenlänge anzuwenden. Man überschätzt zwar die Wirkung von UV-Strahlung in diesem Bereich, liegt damit aber auf der sicheren Seite. Das Fehlen von Expositionsgrenzwerten für Wellenlängen zwischen 3.000 nm und 10^6 nm ist ein größeres Problem, da es auch durch Strahlung von Wellenlängen über 3.000 nm zu Verbrennungen von Augen und Haut kommen kann. Dies gilt insbesondere für thermische Strahlenquellen (Glühlampen, Metallschmelzen, Glasschmelzen), bei denen ein erheblicher Anteil bei Wellenlängen von über 3.000 nm emittiert wird. Hier wird vom IFA empfohlen, den Wellenlängenbereich bis zu 20.000 nm zu berücksichtigen. Zum Schutz der Haut vor Verbrennungen wird vom IFA darüber hinaus empfohlen, auch Expositionen mit einer Dauer von mehr als 10 s zu berücksichtigen, für die die EU-Richtlinie 2006/25/EG keine Grenzwerte enthält. Das IFA hat hierzu eine Grenzwertempfehlung für Expositionen bis zu 1.000 s entwickelt [8,16,17].

4 Technische Regeln zur OStrV

Die Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung enthält zwar die wesentlichen Rechtsvorschriften. Sie ist aber in vielen Teilen nicht detailliert genug, um in der Praxis Gefährdungsbeurteilungen durchführen und geeignete Schutzmaßnahmen festlegen zu können. Zwar stellt die EU mit dem Leitfaden [18] zu EU-Richtlinie 2006/25/EG eine ergänzende Hilfe zur Verfügung. Es ist aber vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) vorgesehen, zusätzlich zur OStrV Technische Regeln zu

erlassen, die die OStrV konkretisieren. Zurzeit werden die beiden Technische Regeln „Inkohärente optische Strahlung“ [19] und „Laserstrahlung“ [20] vorbereitet. Sie werden u.a. auf die Fragen eingehen, ab welcher Expositionshöhe die OStrV anzuwenden ist und wie Gefährdungsbeurteilungen beim Fehlen von Grenzwerten durchgeführt werden können. Sie werden aber auch auf bereits vorhandene bewährte Informationen zum Schutz vor Gefährdungen durch optische Strahlung beim Elektroschweißen [21], beim Gasschweißen [22] und bei Hitzearbeiten [23] hinweisen.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Es hat lange gedauert hat, bis Empfehlungen [24] zum Erlass rechtsverbindlicher Expositionsgrenzwerte für inkohärente optische Strahlung umgesetzt wurden. Mit der Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung OStrV liegen jetzt umfassende rechtsverbindliche Regelungen zum Schutz von Arbeitnehmern vor Gefährdungen durch inkohärente optische Strahlung und durch Laserstrahlung an Arbeitsplätzen vor. Das ist zu begrüßen. Es gibt eine große Zahl von nicht nur akuten sondern langfristigen Schädigungen durch optische Strahlung (Hautkrebs, Linsentrübungen), sowohl in der Bevölkerung als auch bei Arbeitnehmern. Neben der existierenden BK 2401 „Trübung der Augenlinsen durch Wärmestrahlung“ wird die Einführung einer neuen Berufskrankheit „Hautkrebs durch UV-Strahlung“ vorbereitet. Das zeigt einmal mehr, dass der Schutz auf diesem Gebiet verbessert werden muss. Die Arbeitsschutzverordnung OStrV kann dazu beitragen, die Zahl von Schädigungen durch künstliche optische Strahlung an Arbeitsplätzen zu verringern. Sie sollte daher in den Betrieben konsequent angewendet werden. Die Arbeitsschutzinstitutionen sollten dafür werben und den Betrieben bei der Anwendung der OStrV mit Hilfen zur Seite stehen. Dann bliebe als letzter offener Wunsch nur noch, dass es zukünftig endlich auch gelingen möge, detaillierte rechtsverbindliche Regelungen zum Schutz vor Gefährdungen durch Sonnenstrahlung für Arbeitsplätze im Freien zu erlassen.

Literatur

- [1] Aengenvoort, B.; Schwaß, D.: UV-Strahlenexpositionen an Arbeitsplätzen, BGIA-Report 3/2007, Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Oktober 2007, http://www.dguv.de/ifa/de/pub/rep/pdf/rep07/biar0307/rep2_07.pdf
- [2] BGV B2: Unfallverhütungsvorschrift Laserstrahlung, aktualisierte Fassung vom April 2007, Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medien

- [3] Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 2006/25/EG zum Schutz der Arbeitnehmer vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung und zur Änderung von Arbeitsschutzverordnungen vom 19. Juli 2010. BGBl. I (2010) Nr. 38 vom 26. Juli 2010
- [4] Richtlinie 2006/25/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. April 2006 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung) (19. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG). ABl. EU, L 114/38 vom 27.4.2006
- [5] Arbeitsschutzgesetz vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), zuletzt geändert durch Artikel 15 Absatz 89 des Gesetzes vom 5. Februar 2009 (BGBl. I S. 160) worden ist (ArbSchG)
- [6] Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung – ArbStättV) vom 12. August 2004 (BGBl. I S. 2179), zuletzt geändert durch Artikel 4 der Verordnung vom 19. Juli 2010 (BGBl. I S. 960)
- [7] DIN EN 14255: Messung und Beurteilung von personenbezogenen Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung;
Teil 1: Von künstlichen Quellen am Arbeitsplatz emittierte ultraviolette Strahlung;
Teil 2: Sichtbare und infrarote Strahlung künstlicher Quellen am Arbeitsplatz
- [8] Reidenbach, H.-D.; Brose, M.; Ott, G.; Siekmann, H.: Praxis-Handbuch optische Strahlung – Gesetzesgrundlagen, praktische Umsetzung und betriebliche Hilfen, Erich Schmidt Verlag, März 2012
- [9] DIN EN 12198-1: Sicherheit von Maschinen – Bewertung und Verminderung des Risikos der von Maschinen emittierten Strahlung – Teil 1: Allgemeine Leitsätze (enthält Änderung A1:2008), November 2008
- [10] DIN EN 62471: Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen, Februar 2009
- [11] DIN EN 16237: Klassifizierung nicht elektrisch betriebener Quellen inkohärenter optischer Strahlung; Entwurf Februar 2011
- [12] Programm Catrayon des französischen Arbeitsschutzinstituts INRS zur Berechnung optischer Strahlenexpositionen: <http://www.colloquium.fr/06IRPA/CDROM/docs/P-427.pdf>
- [13] Schutz des Menschen vor den Gefahren der UV-Strahlung in Solarien. Wissenschaftliche Begründung zur gleichnamigen Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet am 8. Juni 2001
- [14] Blendung durch natürliche und neue künstliche Lichtquellen und ihre Gefahren. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet am 16./17.02.2006
- [15] Siekmann, H.: Probleme mit der Gefährdungsbeurteilung bei Expositionen durch künstliche optische Strahlung, Technische Sicherheit 1-2/2012, Seite 43-46

- [16] Siekmann, H.: Lücken bei den Expositionsgrenzwerten für optische Strahlung, in: NIR 2011 - Nichtionisierende Strahlung in Arbeit und Umwelt, 43. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, TÜV-Verlag Rheinland, 2011
- [17] Expositionsgrenzwerte zum Schutz der Haut vor Verbrennungen durch Wärmestrahlung – Empfehlung des IFA, Januar 2011,
<http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/empfehlung--ir-expgrenzwerte.pdf>
- [18] EU-Kommission: Ein unverbindlicher Leitfaden zur Umsetzung der Richtlinie 2006/25/EG über künstliche optische Strahlung, Juni 2010,
<http://ec.europa.eu/social/main.jsp?catId=148&langId=en&pubId=5926&type=2&furtherPublications=yes>
- [19] Technische Regeln zur Verordnung über künstliche optische Strahlung (TROS) - Technische Regel „Inkohärente optische Strahlung“ (TROS IOS), in Vorbereitung
- [20] Technische Regeln zur Verordnung über künstliche optische Strahlung (TROS) - Technische Regel „Laserstrahlung“ (TROS LASER), in Vorbereitung
- [21] BG-Information BGI 553: Lichtbogenhandschweißer, Berufsgenossenschaft Holz und Metall
- [22] BG-Information BGI 554: Gasschweißer, Berufsgenossenschaft Holz und Metall
- [23] BG-Information BGI 579: Hitzearbeit, erkennen – beurteilen – schützen, Berufsgenossenschaft Holz und Metall
- [24] Siekmann, H.: Gefährdung durch ultraviolette Strahlung an Arbeitsplätzen, Die BG (1985), Seiten 178-193

UV-Eigenschutz der Haut

Peter Knuschke

1 Der natürliche Eigenschutz der Haut gegen UV-Strahlung

Nach einzelnen oder wiederholten UV-Bestrahlungen baut die Haut - abhängig vom Hauttyp - einen mehr oder minder starken natürlichen Eigenschutz auf. Die wesentlichen Komponenten sind die Lichtschwiele und die Melaninpigmentierung der Haut. Bei letzterer wird durch UV-Exposition(en) in speziellen Zellen, den Melanozyten, die Photosynthese von Melanin ausgelöst. Das photobiologische Wirkungsspektrum (Aktionsspektrum) entspricht dabei, wie Abbildung 1 zu entnehmen, etwa dem Aktionsspektrum des UV-Erythems (Sonnenbrand). Dieser Prozess setzt bei UV-Expositionen bezogen auf die minimale Erythemdosis (MED = individuelle Sonnenbrandschwelldosis) um 90 % der MED ein.

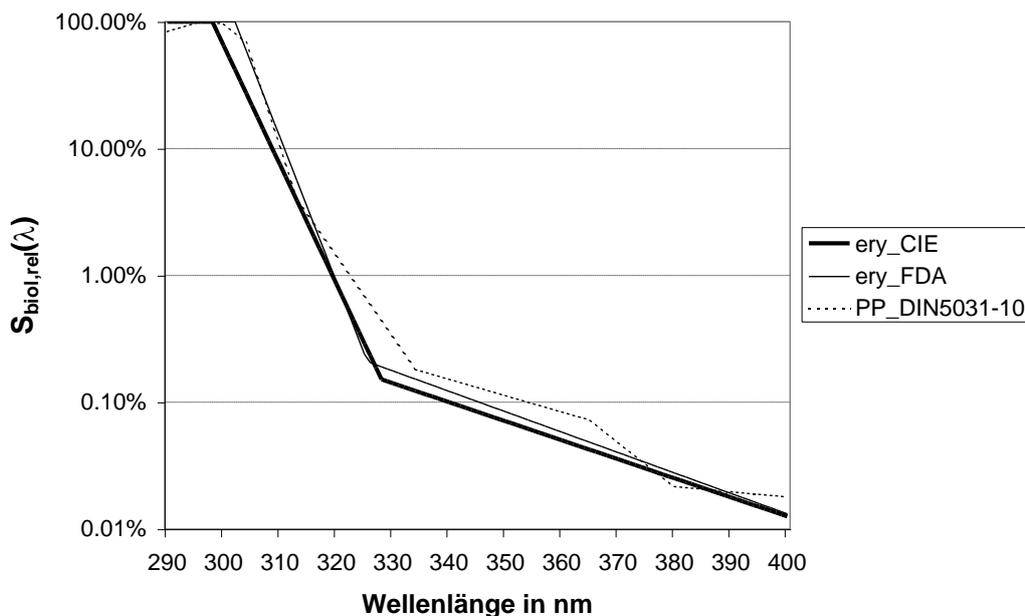


Abb. 1: Aktionsspektren für UV-Erythem $s_{er,rel}(\lambda)$ und Melaninphotosynthese $s_{pp,rel}(\lambda)$ (CIE 1999, FDA 1986, DIN 2012)

Die Melaninpigmentkörnchen lagern sich in der unteren Epidermis (Oberhaut) schirmartig schützend über den Kernen der dort neu gebildeten Zellen an. Der Farbstoff Melanin absorbiert im UVB-Bereich und schützt so die DNA in den Zellkernen in gewissem Umfang vor der UVB-Strahlung, die die DNA direkt zu schädigen vermag. Die Ausbildung bzw. Verstärkung des Schutzes durch Melaninpigmentierung erfolgt über 5-7 Tage nach der initialen UV-Exposition. Geschützt werden so die Zellen der unteren Epidermis und der darunter liegenden Cutis (Unterhaut)

Ein weiterer Eigenschutzmechanismus der Haut, die Lichtschwiele, ist weniger bekannt. Diese Lichtakantose – eine vermehrte Zellbildung unmittelbar beginnend nach der UV-Exposition – führt zur Verdickung der Epidermis und nachfolgend der Hornschicht. Die erhöhte Schichtdicke reduziert die Transmission für nachfolgend einfallende UVB- und UVA-Strahlung. Damit wird zusätzlich auch für weiter oberflächlich liegende Hautzellschichten ein begrenzter UV-Schutz ausgebildet.

Die Lichtschwiele wurde bereits von Miescher (1930) beschrieben. Der Effekt kann auch in einzelnen histologischen Untersuchungen an Biopsien (Hautentnahmeprobe) bestätigt werden (Abb. 2). Jedoch sind auf diese Weise keine Untersuchungen zur Bestimmung der Zeitverläufe von Aufbau und Beständigkeit des Eigenschutzes durch die Lichtschwiele in Untersuchungsgruppen durchzuführen, da das eine erhebliche Anzahl von Hautproben je Proband in einer Untersuchungsserie erfordert hätte.

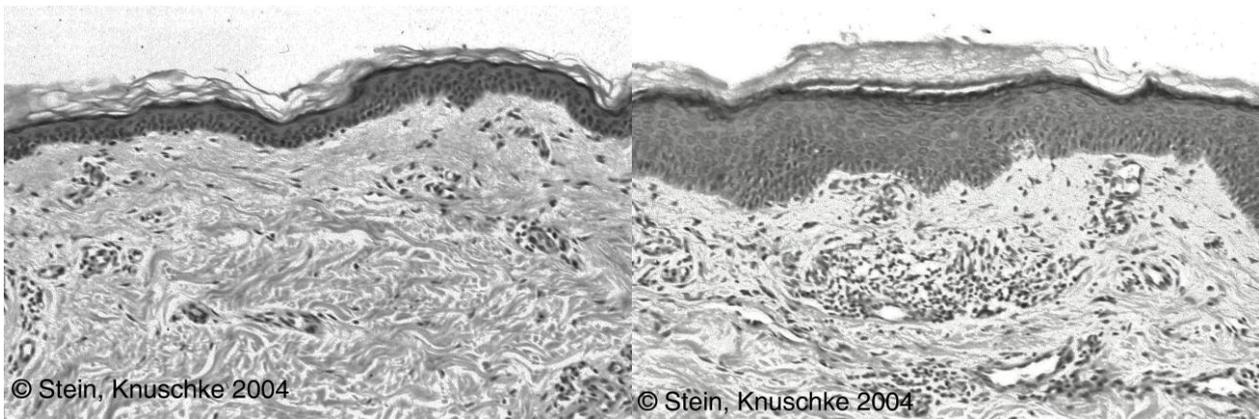


Abb. 2: Nichtexponierte Haut (links) und Haut mit Lichtschwiele der Epidermis (dunkel) und der Hornhaut (darüber) 14 Tage nach UV-Exposition mit 3x 1,4 MED pro Tag (rechts) (Knuschke et al. 2010)

Extremwerte des natürlichen Eigenschutzes der Haut gegenüber UV-Strahlung bei gesunden Hauttypen II-IV (Jung und Anton-Lamprecht 1971):

- 40x MED (lichtungewöhnte Haut) = maximal möglicher UV-Gesamteigenschutz

davon:

- 9x MED (lichtungewöhnte Haut) = maximaler UV-Eigenschutz durch Pigmentierung

- 4.5x MED (lichtungewöhnte Haut) = maximaler UV-Eigenschutz durch Lichtschwiele

(Studiendesign: über 20 Tage tägliche UV-Exposition mit je 1 MED,

die dem aktuellen Eigenschutz fortlaufend angepasst wurde)

Typische Werte des natürlichen Eigenschutzes der Haut (UV-Hauttyp II und III) gegenüber UV-Strahlung ab März bis Oktober am Rücken von Hautgesunden (Knuschke et al. 2010):

- Rückgang der MED (Anstieg der Hautempfindlichkeit) über den März hinaus bis Juni.
- Erhöhung des UV-Eigenschutzes von Juli bis September (u. a. durch Urlaubszeit) im Mittel auf 175 %.
- Erhöhung der MED von März bis September auf 150 % (= 1,5fache der März-MED), Rückgang zum Oktober schon auf 120 %.

2 Methoden zur Bestimmung des natürlichen UV-Eigenschutzes der Haut

Der zeitliche Verlauf des Gesamteigenschutzes nach UV-Exposition(en) aus Melaninpigmentierung und Lichtschwiele kann durch aufeinanderfolgende photodiagnostische Bestimmungen der minimalen Erythemdosis (MED) ermittelt werden.

Studien für eine Differenzierung, zu welchem Zeitpunkt welche Komponente des UV-Eigenschutzes bestimmend ist, lagen ebenso wenig vor, wie Studien, in welcher Form sich die Haut bezüglich Eigenschutzverhalten und Struktur darstellt, wenn zusätzlich Lichtschutzsubstanzen aufgetragen werden bzw. das unterbleibt.

Derartige Untersuchungen wären bisher untersuchungstechnisch, und für die Lichtschwiele speziell ethisch (Vielzahl von Hautprobe-Entnahmen), kaum zu realisieren gewesen.

Mit der Optischen Kohärenztomografie (OCT) als neuartigem Verfahren, lässt sich die Epidermis und die Hornschicht der Haut durch „optische Biopsie“ u. a. in deren Schichtdicke untersuchen. Diese OCT-Technik wurde von der Arbeitsgruppe Klinisches Sensing und Monitoring (Medizinische Fakultät/TU Dresden) speziell für nichttransparente Substrate, wie es die Haut darstellt, weiterentwickelt und u. a. für die Fragestellung der Objektivierung der Lichtschwiele gemeinsam mit der Arbeitsgruppe Experimentelle Photobiologie (Dermatologie/TU Dresden) optimiert (Abb. 3).

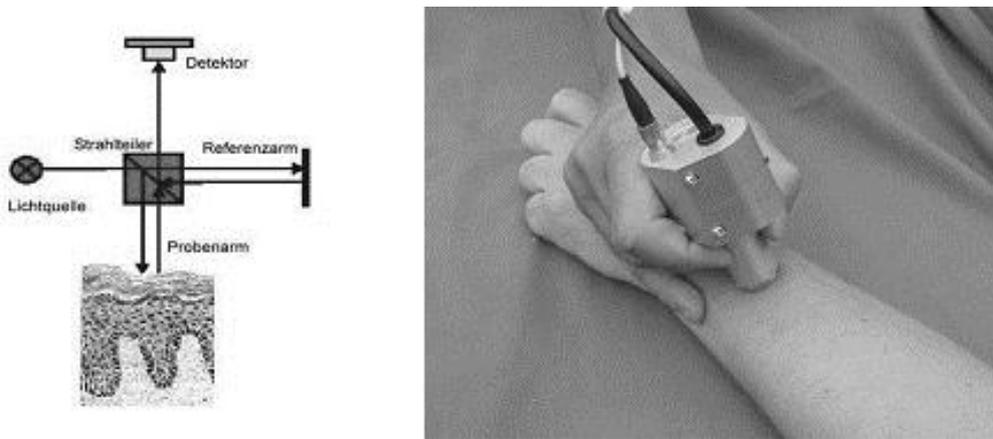


Abb. 3: OCT-Verfahren

Einerseits kann der Verlauf des UV-Gesamteigenschutzverhaltens der Haut aus Melanin-Pigmentierung und Lichtschwiele photodiagnostisch über die minimalen Erythemdosis (MED) mittels Solarsimulatorstrahlung (SSR) bestimmt werden.

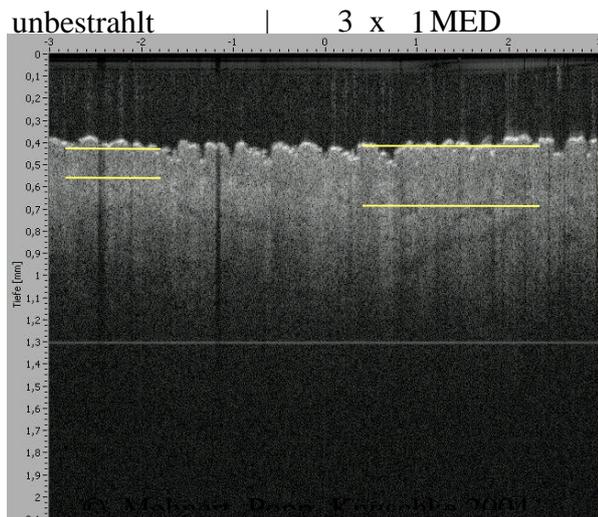


Abb. 4: Lichtschwiele nicht-invasiv durch OCT-Verfahren objektivierbar

Andererseits steht mit dem OCT-Verfahren eine Methode zur Verfügung, die es uns ermöglicht, *nicht-invasiv* Zeitverläufe der natürlichen UV-Eigenschutzkomponente Lichtschwiele über die Epidermis- und Hornschichtdicke zu ermitteln [Popp et al., 2005].

Der Pigmentierungsgrad der Haut kann durch chromametrische Messungen im $L^*a^*b^*$ -Farbsystem über den Verlauf der $+b^*$ -Komponente, der Rötungsgrad der Haut über die $+a^*$ -Komponente registriert werden.

3 Monitoring des natürlichen Eigenschutzes der Haut gegen UV-Strahlung

In BMBF- und BAuA-Forschungsprojekten (Knuschke und Krins 2000, Knuschke et al. 2004, 2007) konnte das erhöhte UV-Expositionsniveau pro Jahr für Berufsgruppen im Freien Beschäftigter gegenüber Innenbeschäftigten mittels UV-Personenmonitoring quantifiziert werden.

Bezüglich der photobiologischen Wirksamkeit von UV-Expositionen lagen aber im wesentlichen nur Untersuchungsdaten an lichtungewöhnter Haut vor.

Ziel eines weiteren BAuA-Forschungsprojektes „Untersuchung des Eigenschutzes der Haut gegen solare UV-Strahlung bei Arbeitnehmern im Freien“ war die Ermittlung quantitativer Daten zum Ausmaß des natürlichen Eigenschutzes der Haut gegenüber solarer ultravioletter Strahlung mit und ohne berufsbedingt erhöhter Exposition (Knuschke et al. 2010).

In drei Studien über je ein Jahr wurde der Verlauf der minimalen Erythemdosis sowie der der UV-Eigenschutzkomponenten Hautpigmentierung und Lichtschwielereaktion für ständig im Freien Beschäftigte sowie für Innenbeschäftigte (UV-Hauttyp II und orientierend für UV-Hauttyp III) ermittelt. Simultan wurde die solare UV-Personendosis, die für die UV-Eigenschutzreaktion relevant war, in einem kontinuierlichen UV-Personenmonitoring erfasst.

Die Untersuchungen erfolgten für drei Beschäftigtengruppen:

- Gruppe 1: ständig im Freien Beschäftigte, die die Arbeit im Sommerhalbjahr auch leicht bekleidet ausführen (Solarexposition von Gesicht, Hals, Armen, Händen und ggf. Oberkörper und Beinen);
- Gruppe 2a: Innenbeschäftigte (Solarexposition im Wesentlichen nur in der Freizeit sowie im Urlaub, weitgehender textiler Lichtschutz des untersuchten Rückens);
- Gruppe 2b: Innenbeschäftigte der Gruppe 2a (eine Rückenhälfte wurde regelmäßig mit den zeitgleichen solaren UV-Gesichtsexpositionen der im Freien Beschäftigten mit simulierter mitteleuropäischer Sommersonne (SSR) bestrahlt – als Simulation der ständig solarexponierten Haut ohne textilen Lichtschutz oder Lichtschutzpräparate
- Gruppe 3: ständig im Freien Beschäftigte (zur Verifizierung der Ergebnisse von Gruppe 1 und 2)

In einer weiteren Studie wurde die Ausbildung und zeitliche Beständigkeit des UV-Eigenschutzes der Haut (MED, Pigmentierungsgrad, Lichtschwielereaktion /

Epidermisdicke) nach sub-erythematöser UV-Einzelexposition und nach fünf seriellen sub-erythematösen UV-Expositionen über 2 Monate nachbeobachtet:

- Gruppe A: nach UV-Einzelexposition (1,8 SED)
- Gruppe B: nach seriellen UV-Exposition an fünf aufeinanderfolgenden Tagen (je 1,8 SED \approx 0,7 MED Hauttyp II)

4 Ergebnisse zu den UV-Eigenschutzreaktionen der Haut (Knuschke et al. 2010)

4.1 Jahresverlauf unter solarer UV-Exposition für Außen- sowie für Innenbeschäftigte

Die Eigenschutzreaktion der Haut auf solare UV-Strahlung wurde bei Außenbeschäftigten (Gruppe 1: Gärtner, Bauarbeiter; n = 12) bzw. auf solarsimulierte UV-Strahlung bei Innenbeschäftigten (Gruppe 2: n = 12) untersucht. Die an lichtungewöhnter Rückenhaut der Innenbeschäftigten applizierte solarsimulierte Strahlung entsprach im jahreszeitlichen Verlauf mittleren UV-Gesichtsdosen von Außenbeschäftigten (bezogen aus UV-Personenmonitoringuntersuchungen Knuschke et al. 2004, 2007). Die so simulierte Situation entspricht der von Berufsneueinsteigern bei Außentätigkeit. Simultan zu Gruppe 2 wurde eine Gruppe 3 (Gärtner, Bauarbeiter; n = 12) einbezogen, um die Ergebnisse aus Gruppe 1 und 2 zu Pigmentierungsgrad und Lichtschwielereaktion zu bestätigen.

Übereinstimmend bestätigte sich, dass durch die Tätigkeit der Außenbeschäftigten im Sommerhalbjahr im Freien lediglich ein UV-Eigenschutzfaktor ≤ 2 ausgebildet wird. Der Sommerurlaub bei Innenbeschäftigten mit zumeist höheren individuellen Sonnenexpositionen führte zu vergleichbaren UV-Eigenschutzreaktionen wie die bei Außenbeschäftigten über das gesamte Sommerhalbjahr.

4.2 Dosis-Wirkung-Beziehung der Lichtschwielereaktion und Konsequenz im solaren Alltag

Für die Lichtschwielereaktion konnte eine Dosis-Wirkungsbeziehung ermittelt werden. Es konnte nachgewiesen werden: Eine signifikante Zunahme der Epidermisdicke setzt erst bei UV-Expositionen von 1,0 MED (der jeweils aktuellen persönlichen Sonnenbrandschwelldosis) und höheren UV-Expositionen ein. Auch die Melaninphotosynthese, die Hautbräunung durch Melanineubildung, setzt erst in diesem UV-Expositionsniveau ein – also deutlich oberhalb von 1 SED.

Im Sommerhalbjahr in Deutschland liegt die UV-Personendosis pro Tag gemessen in Brustposition bei Außenbeschäftigten und damit auch in gleicher Größe für Gesicht und

Hände im Mittel bei 1 SED/d (Knuschke et al. 2004, 2007). Das erklärt die fehlende Lichtschwielereaktion und den geringen Eigenschutzaufbau sowohl bei den untersuchten Außenbeschäftigten als auch bei den Innenbeschäftigten, deren Rückenhaut ein Sommerhalbjahr analog den solaren UV-Werktagsexpositionen von Außenbeschäftigten bestrahlt wurden.

4.3 UV-Eigenschutzreaktion der Haut nach sub-erythematösen Expositionen

Für die Eigenschutzreaktion der Haut nach einmaliger, solarsimulierter, sub-erythematöser UV-Exposition bzw. nach fünf seriellen, sub-erythematösen UV-Expositionen von je 1,8 SED über einen Zeitraum von 8 Wochen konnte zusammengefasst werden:

Eine erythem-effektive Bestrahlung $H_{er} = 1,8$ SED an einem Tag auf zuvor lichtungewöhnte Haut appliziert, entspricht der Situation eines sonnigen Apriltages, dessen Temperaturen erstmals dünnere und kurzärmelige Kleidung zulassen – bei bereits relativ hohem Sonnenstand (Anmerkung: Längerfristige, mittlere solare Tagesexpositionen im Freien Beschäftigter liegen im Gesichtsbereich im Sommer bei 1 SED pro Tag (s. o.)).

Weiterhin ist die simulierte Situation auch mit UV-Expositionen durch künstliche UV-Strahlenquellen an Arbeitsplätzen (z. B. Streustrahlung) vergleichbar, die unterhalb der Erythem („Sonnenbrand“-)-Schwelle als Akutreaktion liegen (so vom Arbeitnehmer nicht bemerkt werden), aber den zulässigen 8-Stunden-Grenzwert für den Arbeitsplatz (EU-Richtlinie 2006) überschreiten.

Sub-erythematöse UV-Einzelexpositionen zeigen keine nachhaltigen Effekte.

Fünf serielle, sub-erythematöse UV-Expositionen führen zu einer über 8 Wochen beständigen Eigenschutzerklärung um 20 %. (Anmerkung: Das entspräche bei einer Lichtschutzcreme gerade mal dem nichtexistenten LSF 1,2!)

5 Schlussfolgerung

Es ist zu konstatieren, dass einerseits im Freien beschäftigte Arbeitnehmer einer erhöhten solaren UV-Exposition ausgesetzt sind. Andererseits hingegen, liegen in Deutschland die mittleren UV-Expositionen an Arbeitsplätzen im Freien in einem Bereich, der keine nennenswerten UV-Eigenschutzreaktionen der Haut nach sich zieht. Die UV-Eigenschutzreaktionen setzen erst mit Erreichen und Überschreiten der Sonnenbrandschwelldosis mit ≥ 1 MED ein.

Es ist ein effektiver Schutz von Haut und Augen bei beruflicher Tätigkeit im Freien vorzusehen. (Hinweis: Aber auch bei nichtberuflichen Aktivitäten im Freien!)

Dazu müssen in ausgewählten Branchen exemplarisch die Effektivität und die Kosten technischer sowie organisatorischer Maßnahmen zur Reduzierung solarer UV-Strahlenexposition untersucht werden. Weiterhin sind individuelle Komponenten zur Reduktion der persönlichen UV-Expositionen von Haut und Augen als persönliche Schutzausrüstungen zu bewerten. Solche Untersuchungen sollen zu einer Versachlichung der Diskussion zum Schutz vor solarer UV-Strahlung beitragen und eine Grundlage für eine Auswahl von Schutzmaßnahmen bilden.

Diese Punkte wurden im Rahmen eines im Abschluss befindlichen BAuA-Projektes F 2036 „Schutzkomponenten zur Reduzierung solarer UV-Expositionen bei Arbeitnehmern im Freien“ untersucht.

Literatur

- **CIE Standard (1999)**: Erythema Reference Action Spectrum and Standard Erythema Dose. CIE S 007/E-1998, CIE, Vienna, Austria. ISO 17166:1999
- **DIN 5031-10** (2012), Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik — Teil 10: Photobiologisch wirksame Strahlung, Größen, Kurzzeichen und Wirkungsspektren
- **EU-Richtlinie 2006**: Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rats über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung) (19. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG) L 114/38 DE Amtsblatt der Europäischen Union 27.4.2006
- **FDA 1986** (U.S. Food and Drug Administration). Policy on maximum timer intervals and exposure schedule for sunlamps, August 21, 1986, Department of Health and Human Services. Food and Drug Administration, Center for Devices and Radiological Health, Rockville, MD.
- **Jung, E. G.**, Anton-Lamprecht, I.: Untersuchung über Albinismus. Arch. Derm. Forsch. 240 (1971), 123-137
- **Knuschke, P.**, Krins, A.: UV-Personendosimetrie Teil B: Mit Verwendung des Polysulfonfilms als UV-Sensor. Hannover: Universitätsbibliothek und Technische Informationsbibliothek **2000**. (F00B1544). Schlussbericht BMBF-Vorhaben 07UVB54B.
- **Knuschke, P.**, Kurpiers, M., Koch, R., Kuhlisch, W., Witte, K.: Mittlere UV-Expositionen der Bevölkerung. Hannover: Technische Informationsbibliothek **2004**, 20-21 und Anhang 4. (F05B898). Schlussbericht BMBF-Vorhaben 07UV-B54C/3
- **Knuschke, P.**, Unverricht, I., Ott, G., Janssen, M.: Personenbezogene Messung der UV-Exposition von Arbeitnehmern im Freien. Dortmund/Berlin/Dresden: Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin **2007**, Forschung F 1777; ISBN 978-3-88261-060-4

- **Knuschke, P.**, Unverricht, I., Aschoff, R., Cuevas, M., Janßen, M., Koch, E., Krüger, A., Ott, G., Thiele, A.: Untersuchung des Eigenschutzes der Haut gegen solare UV-Strahlung bei Arbeitnehmern im Freien. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Forschung, F 1986; Dortmund/Berlin/Dresden **2010**; ISBN 978-3-88261-121-2
- **Miescher, G.**: Das Problem des Lichtschutzes und der Lichtgewöhnung. Strahlentherapie 35 (**1930**), 403-443
- **Popp, A.**, Wendel, M., Knels, L., Knuschke, P., Mehner, M., Koch, T., Boller, D., Koch, P., Koch, E.: Common-path Fourier domain optical coherence tomography of irradiated human skin and ventilated isolated rabbit lungs. Proceedings SPIE, 5861 (**2005**), 145-153 (ISSN 1605-7422)

In vitro Bestimmung der Schutzwirkung von Sonnenschutzmitteln

Dieter Kockott

Vogelsbergstr. 27, 63456 Hanau

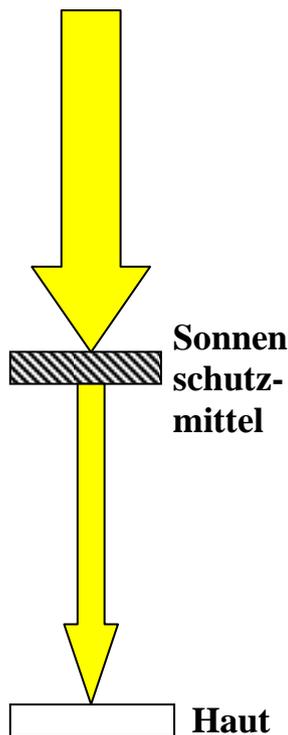
1 Einleitung

Der Schutz der Haut vor Sonnenstrahlung ist in vielen Fällen notwendig. Unsere Vorfahren haben sich durch Kleidung geschützt und/oder waren von Natur aus geschützt durch eine höhere Pigmentierung der Haut und durch den Eigenschutz der Haut infolge der Ausbildung der sog. „Lichtschwiele“ bei allmählicher Steigerung der Sonnenexposition im Verlauf der Jahreszeiten.

Der sog. „moderne Mensch“ lebt und arbeitet dagegen üblicherweise die längste Zeit des Jahres in Innenräumen, um sich dann im Urlaub spärlich bekleidet möglichst lange der Sonne in äquatorialen Gegenden auszusetzen! Natürlich ist das ein Extrembeispiel, es zeigt aber die Notwendigkeit für Sonnenschutzmittel, wenn wir das eben grob geschilderte Verhalten unserer Zeitgenossen als gegeben ansehen.

2 Prinzipielle Beschreibung des Problems

Die Sonnenstrahlung trifft auf das Sonnenschutzmittel, das einen Teil der Sonnenstrahlung absorbiert und/oder streut. Der verbleibende Teil der Sonnenstrahlung erreicht die Haut und löst dort verschiedene Reaktionen aus. Mit der physikalischen Beschreibung der folgenden drei Parameter werden wir uns befassen: Sonnenstrahlung, Sonnenschutzmittel und Haut.

Sonnenstrahlung**1. Sonnenstrahlung auf der Erdoberfläche**

- als Funktion des Sonnenstandes (Tageszeit, Jahreszeit, geographischer Ort)
- als Funktion der O₃-Konzentration
- als Funktion der Atmosphärenparameter (T, r.F., Sichtweite, Bewölkungsgrad)
- Referenz-Sonnenspektrum zur Simulation der Sonnenstrahlung

2. Absorption und Streuung

- Schutz vor erythemwirksamer Strahlung (SPF)
- Schutz vor UV-A Strahlung (PF_{UVA})

3. Wirkungsspektrum $s_{er}(\lambda)$ für das UV-Erythem

Wirkungsspektrum $s_{PPD}(\lambda)$ für PPD(persistent pigment darkening)

Wirkungsspektrum $s_{rad}(\lambda)$ für die Bildung von freien Radikalen in der Haut

2.1 Sonnenstrahlung

Die extraterrestrische Sonnenstrahlung ist aus Satellitenmessungen gut bekannt. Die Sonnenstrahlung auf der Erdoberfläche ist jedoch im Wesentlichen von den folgenden Parametern abhängig:

- geographischer Ort
- Jahreszeit und Tageszeit
- Ozonkonzentration in der hohen Atmosphäre
- Sichtweite
- Wassergehalt der Atmosphäre
- Bewölkungsgrad und –art

Für die Zwecke der Materialprüfung und auch bei der Prüfung der Schutzwirkung von Sonnenschutzmitteln hat man sich auf eine „Standard-Sonne“ geeinigt, die das Maximum der Sonnenstrahlung auf der Erdoberfläche beschreibt nämlich bei senkrechtem Sonnenstand und bei wolkenlosem Himmel mit großer Sichtweite. Aus historischen Gründen werden noch immer in verschiedenen Branchen leicht

unterschiedliche Spektralverteilungen für die „Standard-Sonne“ benutzt. Es ist Aufgabe der internationalen Normung, wie z.B. ISO und CIE, zu einer einheitlichen „Standard-Sonne“ zu kommen. Bei der Prüfung von Sonnenschutzmitteln werden meist die Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke der Sonnenstrahlung $S_{\lambda}(\lambda)$ im nördlichen Australien zur dortigen Sommersonnenwende benutzt [1].

a. Sonnenschutzmittel

Die Schutzwirkung eines Sonnenschutzmittels wird beschrieben durch das Absorptions- und Streuvermögen des Sonnenschutzmittels. In der Praxis interessiert nur die durch das Sonnenschutzmittel hindurchgehende Strahlung, unabhängig davon, ob Absorption oder Streuung die Ursache der Reduzierung der Bestrahlungsstärke sind. Das hat messtechnische Konsequenzen bezüglich der korrekten Erfassung der Streustrahlung.

Bei der rein physikalischen Betrachtung der Schutzwirkung eines Sonnenschutzmittels werden notwendigerweise chemische und physiologische Wechselwirkungen zwischen Sonnenschutzmittel und Haut nicht berücksichtigt.

b. Haut

Wenn Sonnenstrahlung auf die Haut trifft, ist der primäre Schritt die Absorption von Photonen. Das führt neben der Erwärmung zu einer Reihe von Folgeprozessen. Aus praktischen Gründen hat man sich zunächst auf die markante äußerlich erkennbare Wirkung, nämlich das UV-Erythem (Sonnenbrand), konzentriert, das ca. 24 Stunden nach der Exposition zu erkennen ist. Die Schutzwirkung eines Sonnenschutzmittels wird daher aus historischen Gründen zunächst als Schutz vor erythemwirksamer Strahlung verstanden. Die spektrale Wirkung der Strahlung bezüglich des UV-Erythems wird durch das Wirkungsspektrum $s_{er}(\lambda)$ [2] beschrieben.

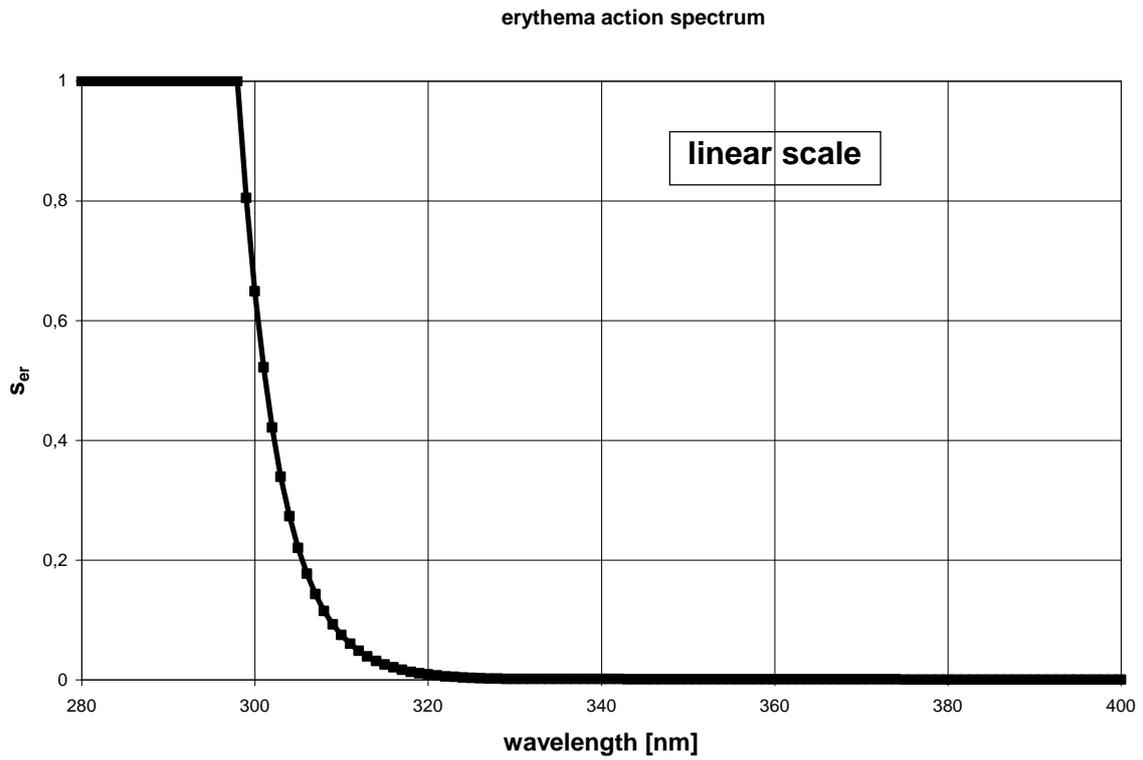


Abb. 1: Wirkungsspektrum $s_{er}(\lambda)$ des UV-Erythems (lineare Darstellung)

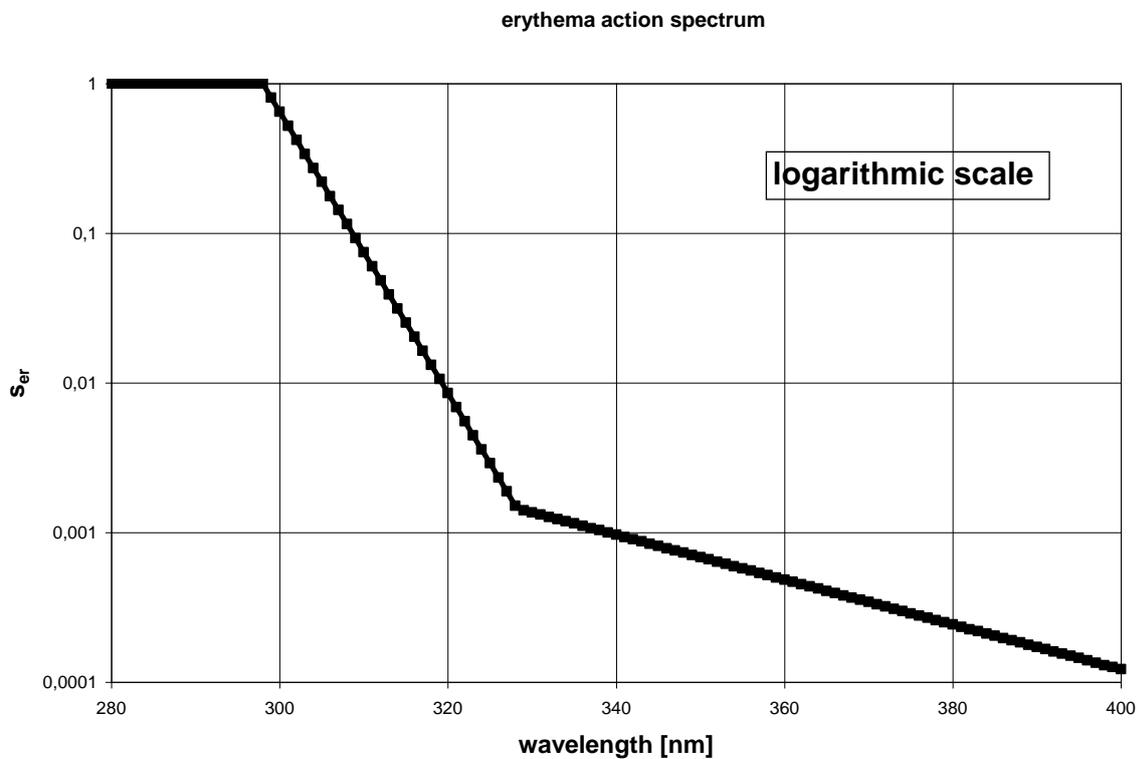


Abb. 2: Wirkungsspektrum $s_{er}(\lambda)$ des UV-Erythems (halblogarithmische Darstellung)

Daneben sind auch noch andere Wirkungsspektren von Interesse, z.B. $s_{PPD}(\lambda)$ [3] für die bleibende Pigmentdunkelung PPD (persistent pigment darkening)

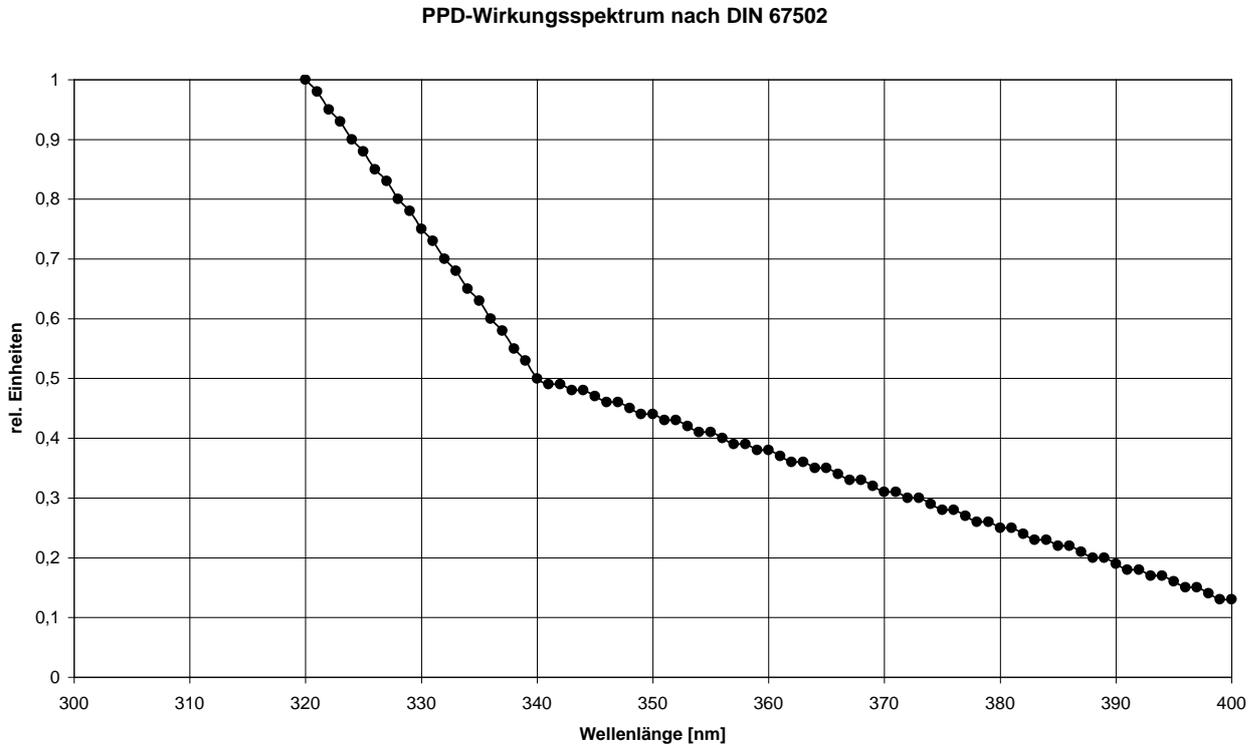


Abb. 3: Wirkungsspektrum $s_{PPD}(\lambda)$ für die bleibende Pigmentdunkelung PPD (persistent pigment darkening)

Mit den drei Funktionen spektrale Bestrahlungsstärke der Sonnenstrahlung $S_{\lambda}(\lambda)$, Wirkungsspektrum der betrachteten Hautreaktion $s(\lambda)$ und spektraler Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ des Sonnenschutzmittels bei vorgegebener Auftragsmenge steht das physikalische Handwerkszeug zur Verfügung zur Berechnung von Schutzfaktoren von Sonnenschutzmitteln.

3 in vitro Bestimmung der Schutzwirkung eines Sonnenschutzmittels

3.1 in vitro SPF

Theoretisch ist klar, was man machen muss: Man braucht die Spektralverteilung der „Standard-Sonne“ $E_{\lambda}(\lambda)$, das genormte Wirkungsspektrum für das Erythem $s_{er}(\lambda)$ und den spektralen Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ des Sonnenschutzmittels bei einer vorgegebenen Auftragsmenge auf einem UV-durchlässigen Probenträger. Dann ist

$$\text{SPF} = \frac{\int S_{\lambda}(\lambda) s_{er}(\lambda) d\lambda}{\int S_{\lambda}(\lambda) \tau(\lambda) s_{er}(\lambda) d(\lambda)} \quad \text{Gl. 1}$$

Das messtechnische Problem liegt in der korrekten Messung von $\tau(\lambda)$. In welchen Bereichen von $\tau(\lambda)$ bewegen wir uns bei den üblichen Sonnenschutzmitteln? Für diese Abschätzung nehmen wir an, dass der spektrale Transmissionsgrad in dem interessierenden Wellenlängenbereich der erythemwirksamen Strahlung unabhängig von λ sei. Dann ist $\text{SPF} = 1/\tau$

SPF	τ	A = log 1/τ
10	0,1	1
20	0,05	
30	0,033	
40	0,025	
50	0,02	
100	0,01	2

Das heißt, der spektrale Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ muss im Bereich von 0,1 bis 0,01 sicher gemessen werden.

Gl. 1 lässt auch einen anderen Weg zur Bestimmung des in vitro SPF zu: In Analogie zur in vivo Bestimmung des SPF wird die „Standard-Sonne“ $S_{\lambda}(\lambda)$ mit den hohen Anforderungen an die Simulation der kurzwelligen Kante der Spektralverteilung experimentell realisiert. Mit einem Empfänger, dessen spektrale Empfindlichkeit gut an das Wirkungsspektrum $s_{er}(\lambda)$ angepasst ist, wird die erythemwirksame Bestrahlungsstärke integral hinter einem Probenträger ohne und mit Sonnenschutzmittel gemessen. Das Verhältnis der beiden gemessenen erythemwirksamen Bestrahlungsstärken liefert den SPF nach Gl. 1 genau wie bei der in vivo Ermittlung. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass man Änderungen des SPF im Laufe der Bestrahlung sehr einfach messen und damit eine mögliche Photoinstabilität von Sonnenschutzmitteln bestimmen kann (s. 3.3). Neben diesem messtechnischen Aspekt gibt es noch das Problem der reproduzierbaren Auftragung einer dünnen Schicht des Sonnenschutzmittels auf den Probenträger. Dafür gibt es bis heute noch keine einfache und befriedigende Lösung.

Viele Rundversuche haben gezeigt, dass der in vitro SPF in ein und demselben Labor reproduzierbar bestimmt werden kann und dass bei geeigneter Wahl der Auftragsmenge auch akzeptable Korrelationen zu den in vivo Ergebnissen erreicht werden.

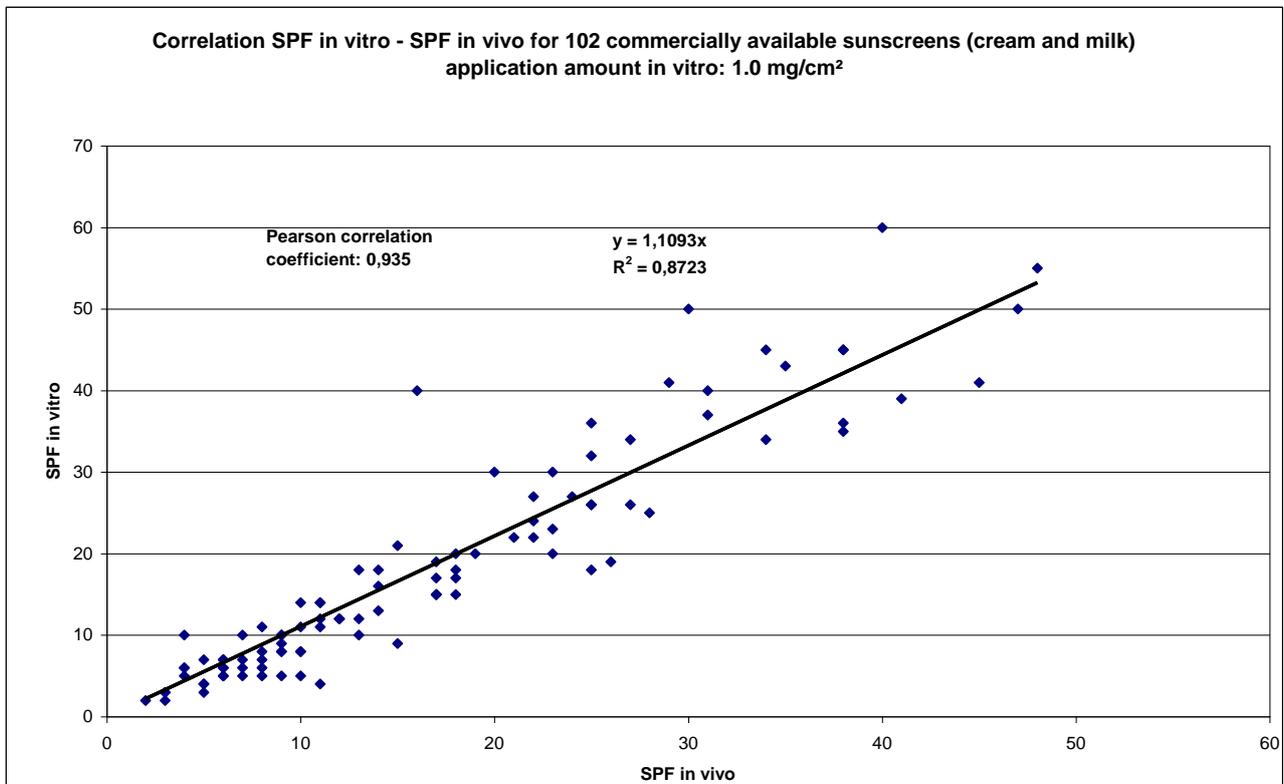


Abb 4: Korrelation zwischen $SPF_{in vivo}$ und $SPF_{in vitro}$ für ca. 100 Sonnenschutzmittel (Institut für experimentelle Dermatologie an der Universität Witten/Herdecke)

Abb. 4 zeigt als Beispiel die Korrelation zwischen in vivo und in vitro SPF bei ca. 100 kommerziell erhältlichen Sonnenschutzmitteln [4]. Es gibt aber auch Beispiele, wo ein solches Diagramm wie ein Sternenhimmel aussieht! Als wesentliche Ursachen für die sehr unterschiedlichen Ergebnisse in verschiedenen Laboratorien wurden die folgenden Punkte erkannt:

- Güte der verwendeten Spektralphotometer

bezüglich Wellenlängenskalierung, Auflösungsvermögen (<1 nm), Dynamikbereich (sichere Messung für $A \leq 2,2$) und korrekte Erfassung der Streustrahlung der Probe. Bezüglich Wellenlängenskalierung und Dynamikbereich gibt es Standardmaterialien, mit denen man die Anforderungen an das Spektralphotometer prüfen kann. Nach Einführung dieser Geräteprüfung hat sich die Einheitlichkeit der in vitro SPF-Ergebnisse aus verschiedenen Laboratorien gebessert, ist aber noch nicht zufriedenstellend. An einer

einfachen Prüfung der korrekten Erfassung der Streustrahlung der Probe wird z.Z. gearbeitet.

- Probenträger

Es werden Probenträger aus PMMA verwendet. Dieses Material ist hochgradig UV-durchlässig und auch bei UV-Bestrahlung stabil. Die Oberfläche ist aufgeraut. Damit soll die Oberflächenstruktur der Haut nachgeahmt werden. In jüngster Zeit werden spritzgegossene Probenträger benutzt, die produktionsbedingt eine einheitliche Oberflächenstruktur zeigen. In einer eben publizierten Arbeit werden Probenträger vorgestellt, deren Oberflächenstruktur derjenigen der Haut sehr nahe kommt [5].

- Präparation der Proben

In der Praxis hat sich die Auftragung des Sonnenschutzmittels mit dem Finger bewährt – wie es auch bei der Bestimmung des in vivo SPF praktiziert wird. Wichtig ist die Festlegung der Auftragsmenge und der Einzelheiten der Auftragung. Hierzu liegen von verschiedenen Seiten Untersuchungen vor. An einer einheitlichen und praxisgerechten Methode wird gearbeitet.

Die genannten Probleme sind die Ursache dafür, dass in nationalen und internationalen Rundversuchen noch keine hinreichend einheitlichen Ergebnisse erzielt wurden. Daher gibt es z.Z. Noch keine Norm zur in vitro Bestimmung des SPF.

3.2 UVA-Schutz

Ursprünglich waren Sonnenschutzmittel nur zum Schutz vor erythemwirksamer Strahlung ausgelegt. Seit einigen Jahren weiß man jedoch, dass auch Bestrahlungen im UVA zu Hautschädigungen führen können. Daher ist es die Aufgabe von Sonnenschutzmitteln, auch für einen Schutz vor UVA-Strahlung zu sorgen. Stellvertretend für die Wirkungen infolge einer UVA-Bestrahlung wird als biologischer Endpunkt das PPD (persistent pigment darkening) benutzt, dessen Wirkungsspektrum $S_{PPD}(\lambda)$ bekannt ist (s. Abb. 3). In Analogie zu Gl. 1 ist dann der Schutzfaktor im UVA

$$PF_{UVA} = \frac{\int S_{\lambda}(\lambda) S_{PPD}(\lambda) d\lambda}{\int S_{\lambda}(\lambda) \tau(\lambda) S_{PPD}(\lambda) d\lambda} \quad \text{Gl. 2}$$

Dieser Schutzfaktor wird zur Charakterisierung des UVA-Schutzes herangezogen, obwohl er korrekt sich nur auf das PPD bezieht. Bezüglich der Messung von $\tau(\lambda)$ gelten die gleichen Bemerkungen wie bei der Bestimmung des in vitro SPF. Die Unsicherheiten bezüglich der Auftragsmenge und der Auftragstechnik werden gemindert durch einen Bezug auf den separat bestimmten in vivo SPF. Das Verfahren besteht aus folgenden Schritten:

- Messung von $\tau(\lambda)$ bzw. von $A(\lambda) = \log 1/\tau(\lambda)$ und Berechnung eines in vitro SPF nach Gl. 1. Wenn der in vitro SPF mit dem in vivo SPF übereinstimmt, wird $\tau(\lambda)$ zur Berechnung des PF_{UVA} nach Gl. 2 benutzt.
- Wenn das nicht der Fall ist, werden die folgenden Schritte gemacht, wobei man annimmt, dass die Differenz von in vivo SPF und in vitro SPF durch unterschiedliche Schichtdicken verursacht wird.
- iterative Bestimmung eines Faktors c , so dass $\tau^*(\lambda) = 1/10^{cA(\lambda)}$ zur Berechnung eines in vitro SPF nach Gl. 1 führt, der gleich dem in vivo SPF ist.
- Berechnung von PF_{UVA} nach Gl. 2 unter Verwendung von $\tau^*(\lambda)$.

Dieses Verfahren ist kein „reines“ in vitro-Verfahren, sondern nimmt Bezug auf eine vorhergehende in vivo-Bestimmung des SPF. Es setzt - stillschweigend - die Gültigkeit des Lambert-Beer'schen Gesetzes voraus, das nur für reine Lösungen gilt. Die Sonnenschutzmittel verhalten sich aber wegen der hohen Streuung des Lichts beim Durchgang durch das Sonnenschutzmittel sicher nicht wie reine Lösungen. Trotzdem wird dieses Verfahren in der Praxis erfolgreich angewendet. In der kurz vor der Publikation stehenden ISO/FDIS 24443:2012 wird diese physikalische Unkorrektheit erwähnt, und der Faktor c auf Werte von $0,8 \leq c \leq 1,6$ begrenzt.

Auf der Grundlage verschiedener Rundversuche gab es zunächst im Jahre 2005 eine deutsche Norm DIN 67502, die dann später auf internationaler Ebene durch eine zusätzliche Bestrahlung der Proben ergänzt wurde (s. Abschnitt 3.3). Die demnächst erscheinende ISO/FDIS 24443:2012 beschreibt detailliert den heutigen Stand der Technik bei der Bestimmung des UVA-Schutzes.

Der UVA-Schutz PF_{UVA} eines Sonnenschutzmittels soll mindestens 1/3 des SPF betragen. Das ist zunächst eine willkürliche und keine physikalisch begründete Festsetzung. Sie spiegelt aber die dermatologischen Erfordernisse wider und liegt im Rahmen der z.Z. möglichen Realisierung.

3.3 Photoinstabilität der Sonnenschutzmittel

Wie stabil sind Sonnenschutzmittel bezüglich ihrer Schutzwirkung, wenn sie der Sonnenstrahlung ausgesetzt werden? Da es sich bei den in Sonnenschutzmitteln verwendeten UV-Absorbern oft um organische Verbindungen handelt, ist nach aller Erfahrung mit einer Änderung der Schutzwirkung bei Sonnenbestrahlung - also bei bestimmungsgemäßem Gebrauch - zu rechnen. Erste Arbeiten zu diesem Thema wurden 1998 publiziert [6]. Sie sind inzwischen von anderer Seite mehrfach bestätigt worden. Dabei wird die Probe permanent mit sonnenähnlicher Strahlung wie bei der Bestimmung des in vivo SPF bestrahlt, und es wird laufend die erythemwirksame Bestrahlungsstärke hinter der Probe gemessen. Daraus kann man den SPF_t zur Zeit t nach Beginn der Exposition berechnen. Die Exposition wird beendet, wenn hinter der Probe eine erythemwirksame Bestrahlung (Dosis) von 1 MED erreicht wird. Das entspricht genau dem Verfahren bei der in vivo-Bestimmung des SPF.

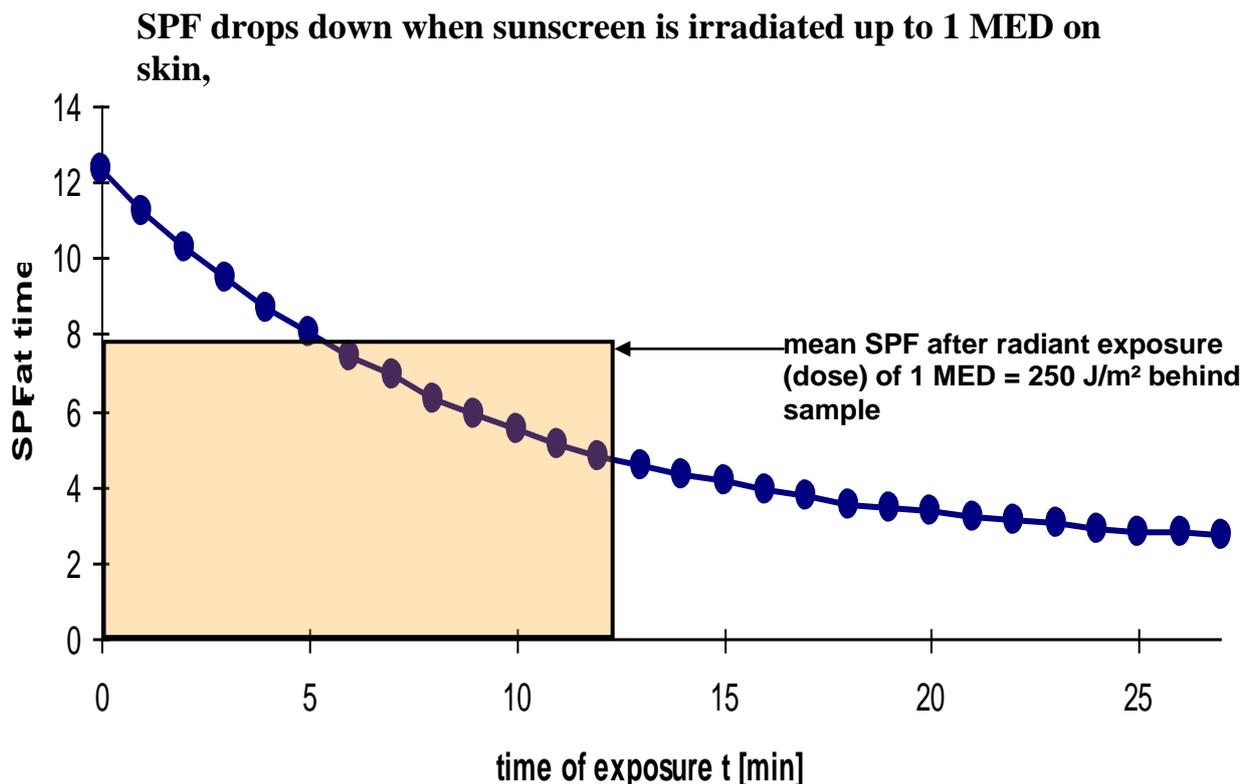


Abb. 5: Änderung des SPF während einer Bestrahlung

Abb. 5 zeigt ein Beispiel. Bei der in vivo-Bestimmung des SPF wird automatisch eine mögliche Änderung des SPF während der Bestrahlung berücksichtigt. Bei der in vitro-

Bestimmung wird der $SPF_{in\ vitro}$ rechnerisch ermittelt (s. Abb. 5). Eine Bestimmung des $SPF_{in\ vitro}$ ohne eine Bestrahlung ist nicht sinnvoll, da sie bei photoinstabilen Sonnenschutzmitteln zu einem $SPF_{in\ vitro}$ führen würde, der unrealistisch hoch ist. Die Bestrahlung bis zu 1 MED hinter der Probe führt aber - insbesondere bei hohen SPF - zu einer längeren Prüfzeit bei der Bestimmung des $SPF_{in\ vitro}$. Es wird z.Z. darüber diskutiert, ob man aus wirtschaftlichen Gründen auch mit kürzeren Bestrahlungszeiten auskommen kann. Die Photoinstabilität ist natürlich auch bei der Bestimmung des UVA-Schutzes ein Thema. In ISO/FDIS 24443:2012 ist daher eine Bestrahlung des Sonnenschutzmittels eingeschlossen.

4 Andere Hautreaktionen infolge einer Bestrahlung

Die bisher diskutierten zwei Hautreaktionen sind sog. biologische Endpunkte, d. h. es sind visuell erkennbare Reaktionen, die am Ende einer langen Kette von Einzelprozessen stehen. Die davon abgeleiteten Schutzfaktoren von Sonnenschutzmitteln beziehen sich naturgemäß allein auf diese beiden biologischen Endpunkte. In zunehmendem Maße interessieren aber die molekularen Prozesse, die bei oder nach einer Bestrahlung in der Haut ablaufen. Der primäre Prozess ist die Absorption von Photonen in der Haut, die in der Mehrzahl der Fälle zur Erwärmung führt. Solange dabei die physiologischen Temperaturgrenzen nicht überschritten werden, ist das für die Diskussion von Hautschädigungen und deren Vermeidung uninteressant. Wichtig sind die photochemischen Primärprozesse, die sich z. B. in der Bildung von freien Radikalen äußern. Mit moderner ESR-Spektroskopie kann man die Zahl der freien Radikale pro Volumeneinheit messen, die sich infolge der Bestrahlung bilden. Wenn die Bestrahlung in mehreren schmalen Wellenlängenbereichen erfolgt und jeweils anschließend ESR-Messungen gemacht werden, erhält man das Wirkungsspektrum bezüglich der Radikalbildung in der Haut. Die Beschreibung der experimentellen Einzelheiten würde den Rahmen dieses Vortrags sprengen, daher an dieser Stelle nur der Hinweis auf die Literatur [7]. Als Bestrahlungstechnik wurde die Kantenfiltermethode angewendet, die sich bei der Bestimmung von Wirkungsspektren bei organischen Werkstoffen bewährt hat.

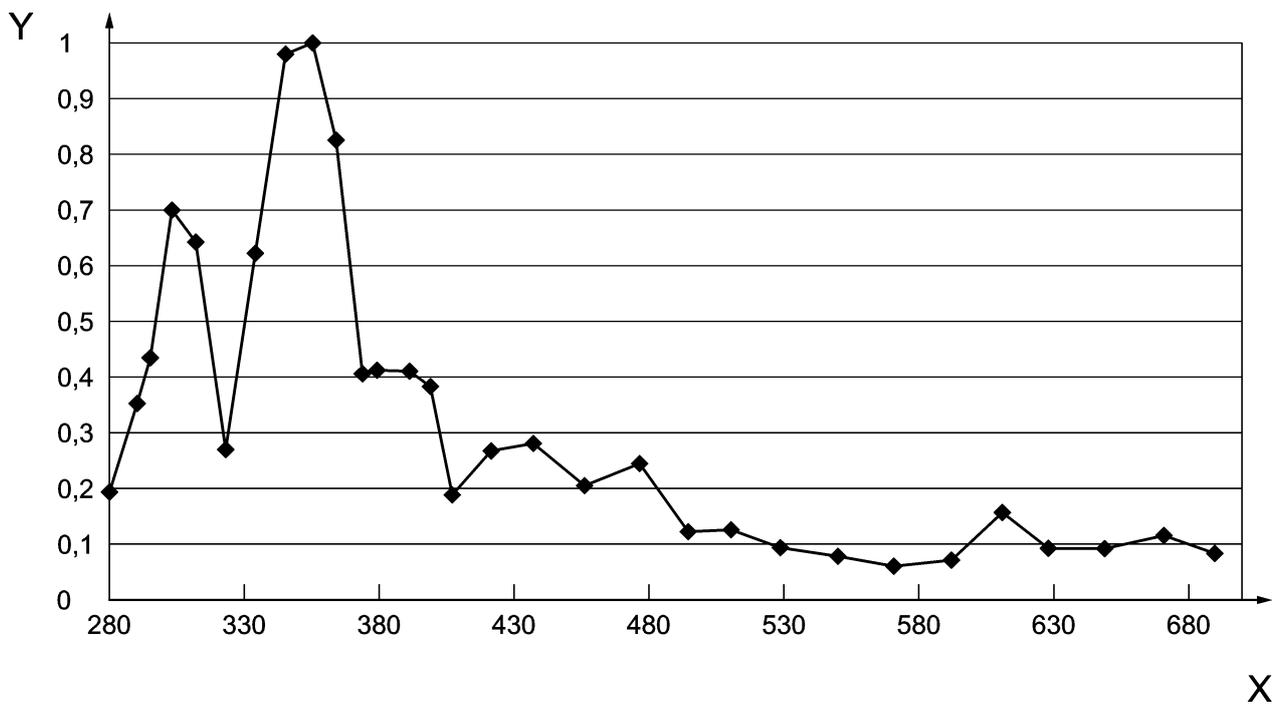


Abb. 6: Wirkungsspektrum $s_{rad}(\lambda)$ für die Bildung freier Radikale in der Haut

Abb. 6 zeigt das Wirkungsspektrum für die Radikalbildung in der Haut für den Wellenlängenbereich $280 \leq \lambda \leq 700$ nm. Dieses Wirkungsspektrum unterscheidet sich wesentlich von den Wirkungsspektren für das Erythem oder für PPD. Das ist auch nicht überraschend, denn mit dem Wirkungsspektrum der Radikalbildung wird der Primärprozess erfasst, während die Wirkungsspektren für Erythem und PPD sich auf biologische Endpunkte beziehen, die erst nach vielen Zwischenschritten erreicht werden. Bei dem Wirkungsspektrum für die Radikalbildung fällt auf, dass nicht nur die UV-Strahlung für die Radikalbildung verantwortlich ist, sondern auch die sichtbare Strahlung zur Radikalbildung beiträgt. Wenn man die Spektralverteilung der Sonnenstrahlung mit ihrer deutlich höheren Bestrahlungsstärke im sichtbaren Bereich im Vergleich zur UV-Strahlung berücksichtigt, dann erhält man als rechnerisches Ergebnis, dass bei Sonnenstrahlung die Zahl der erzeugten Radikale pro Volumeneinheit etwa zu gleichen Teilen auf UV und VIS entfällt. Genau dieses rechnerische Ergebnis wurde experimentell bestätigt.

Die Erzeugung von Radikalen bedeutet nicht zwangsläufig irgendeine Art von Schädigung. Im Gegenteil: Viele Lebensprozesse laufen radikalisch ab. Es kommt auf die Zahl der erzeugten Radikale pro Volumeneinheit an. Über eine „Schwellenmenge“ und damit über eine „Schwellendosis“ der Sonnenstrahlung kann man z.Z. nur spekulieren. Ein möglicher Ansatz ist vielleicht folgender: Die Produktion von Vitamin D₃ in der Haut ist ein lebensnotwendiger Prozess, und die Natur hat es vermutlich so eingerichtet, dass er nicht

gleichzeitig gesundheitsschädigend ist. Das Wirkungsspektrum der Vitamin D₃-Bildung und die notwendigen Bestrahlungsstärken zur Produktion der lebensnotwendigen Menge von Vitamin D₃ sind bekannt. Daraus kann man einen Grenzwert der Radikalkonzentration errechnen, oberhalb dessen möglicherweise Schäden zu erwarten sind. Spekulation – aber begründet.

In jedem Fall eröffnet das hier vorgestellte Wirkungsspektrum für die Radikalbildung in der Haut Türen zu neuen Forschungsgebieten und auch zu sehr praktischen Anwendungen, z.B. für zukünftige Sonnenschutzmittel und deren Schutz vor überhöhter Radikalbildung in der Haut.

Literatur

- [1] G. Bernhard, B. Mayer, G. Seckmeyer, A. Moise: Measurements of spectral solar UV irradiance in tropical Australia”, J. Geophys. Res: 102, 8719-8730, 1997
- [2] CIE 007/E-1998
- [3] DIN 67502
- [4] H. Tronnier, B. Garbe, D. Kockott, U. Heinrich: „On the influence of the application amount of sun protection products on their efficacy and photostability”, Publikation von DERMATRONNIER Institut für experimentelle Dermatologie Universität Witten/Herdecke
- [5] Y. Miura, T. Hirao, M. Hatao: “Influence of application amount on sunscreen photodegradation in in vitro sun protection factor evaluation: Proposal of a skinmimicking substrate”, to be published in Photochemistry and Photobiology in 2 012
- [6] D. Kockott: “In vitro-Bewertungen von Sonnenschutzmitteln”, Kosmetische Medizin 19, 290-293 (1998)
- [7] L. Zastrow, N. Groth, F. Klein, D. Kockott, J. Lademann, R. Renneberg, L. Ferrero: „The missing link – light-induced (280-1600 nm) free radical formation in human skin”, Skin Pharmacology and Physiology 2009; 22:31-44

Fluoreszenzdiagnostik und Photodynamische Therapie

Aktinischer Keratosen in der hautärztlichen Praxis

Hans Meffert, Elisabeth Rowe, Helmut Piazena und Gerhard Kolde

Dermatologisches Zentrum Berlin, Potsdamer Chaussee 80, 14129 Berlin

1 Einleitung

Das 18. Jahrhundert war fast schon zu Ende gegangen, als der Medizinstudent Oscar Raab im Münchener Labor des Pharmakologen Hermann von Tappeiner mit einer gelben Akridin-Farbstoff-Lösung experimentierte. Von dieser war bekannt, dass sie Bakterien und Einzeller abzutöten vermag. Völlig unerwartet zeigte es sich, dass die unterschiedliche Helligkeit in unterschiedlichen Teilen des Labors diesen Effekt maßgeblich modifizierte. Am hellen Fenster starben die Einzeller sehr viel schneller ab als in dunkleren Bereichen. Raab erstattete seinem Professor Bericht, der die Beobachtung des Studenten ernst nahm und zum Anlass intensiven Nachdenkens nahm [1, 2]. So wurde der Photodynamische Effekt entdeckt (Photo von Gr. *phos* – das Licht; dynamisch – von Gr. *dynamis* – die Kraft, die Stärke).

Als Photodynamische Therapie (PDT) wird die kombinierte therapeutische Anwendung eines photosensibilisierenden Farbstoffs und Licht – in Gegenwart von Sauerstoff – bezeichnet. Diverse Farbstoffe und Lichtqualitäten wurden hinsichtlich ihrer Eignung zur PDT geprüft. Oft erwies sich Protoporphyrin IX (PPIX), das Grundgerüst unseres roten Blutfarbstoffs, als besonders gut geeigneter Photosensibilisator (Proto von Gr. *protos* – erstes, wichtigstes; Porphyrin von Gr. *porphyra* – purpurrot).

90 Jahre nach der Entdeckung des photodynamischen Effekts war die Erkenntnis von Kennedy und Pottier bahnbrechend, dass es bei Hautkrebs weitaus günstiger ist, statt des Photosensibilisators PPIX dessen Vorstufe Aminolävulinsäure (ALA) in die Nähe der Krebszellen zu bringen [3].

Hier wird vor allem über die Fluoreszenzdiagnostik und PPT Aktinischer Keratosen berichtet (Aktinisch von Gr. *actis* – ein Strahl; Keratose von Gr. *keratos* – das Horn).

Eindringtiefe optischer Strahlung in die Haut (Photohauttyp II)

Nach H. Piazena 2010

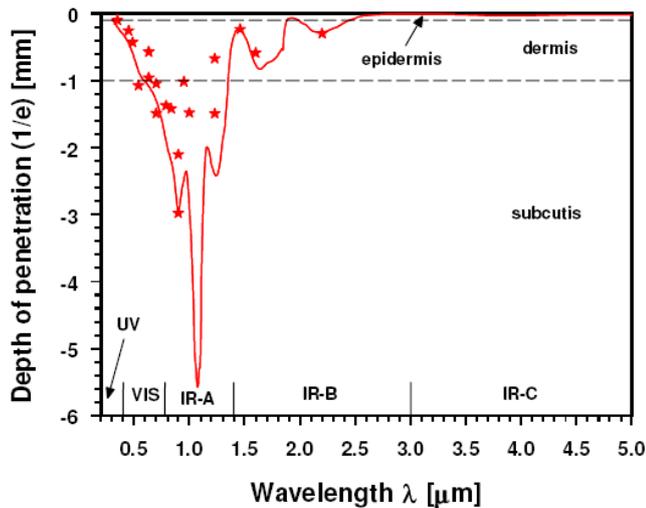


Abb. 1: Eindringtiefe optischer Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge

2 Fluoreszenzdiagnostik („Photodynamische Diagnostik“)

Auch im Gewebe kann PPIX zu einer charakteristischen purpur- oder korallenroten Fluoreszenz angeregt werden. Das ermöglicht Fluoreszenzdiagnostik, wodurch die Lokalisation und Ausbreitung der Krebszellen besser als durch das klinische Bild beurteilt werden können.

Eine wesentliche Voraussetzung, sowohl für Fluoreszenzdiagnostik als auch für PDT, ist ausreichend tiefes Eindringen der anregenden Strahlung in die Haut inklusive deren Krebszellen enthaltenden Strukturen. Die Abhängigkeit der Eindringtiefe von der Wellenlänge ist in Abbildung 1 dargestellt. Die hier besonders interessierenden Aktinischen Keratosen befinden sich ausschließlich in der Epidermis und können durch langwelliges Ultraviolett-A (UV-A), besser noch durch violettes Licht zur Fluoreszenz angeregt werden.

Spektrale Verteilung der Bestrahlungsstärke zur Fluoreszenzdiagnostik

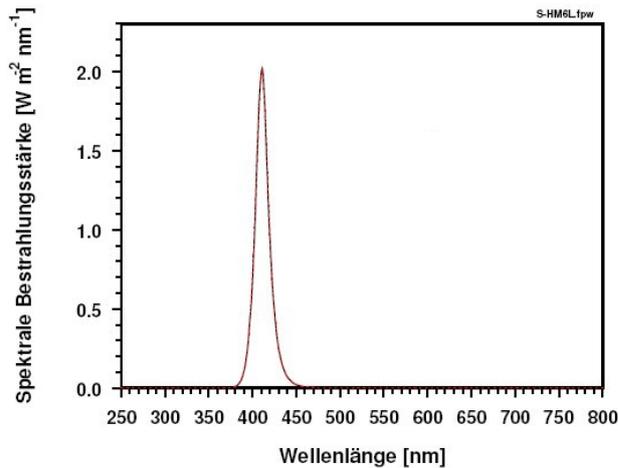


Abb.2: Emission des zur Fluoreszenzdiagnostik verwendeten Geräts

Abbildung 2 zeigt die spektrale Verteilung der Emission des verwendeten Geräts zur Fluoreszenzdiagnostik, das mit violettes Licht emittierenden Dioden (LEDs) bestückt ist. Aktinische Keratosen sind mehr oder minder raue Gebilde, die in chronisch besonnten Regionen wie männliche Glatze und Stirn entstehen. Oft bilden sie regelrechte Krebsfelder. Letztere enthalten viele kleine Krebsläsionen, die sich unabhängig von einander und etwa zu gleichen Zeit entwickelten. Aktinische Keratosen sind nicht selten besser tast- als sichtbar. In Abbildung 3 ist ein Krebsfeld aus Aktinischen Keratosen im Bereich der männlichen Glatze dargestellt. Das Fluoreszenzfoto Abbildung 4 zeigt eine mit vielen Aktinischen Keratosen besetzte männliche Glatze.

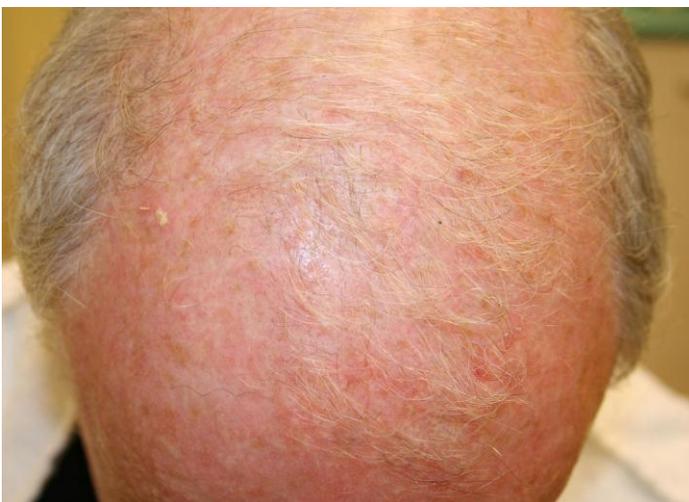


Abb.3. Aktinische Keratosen, Krebsfeld

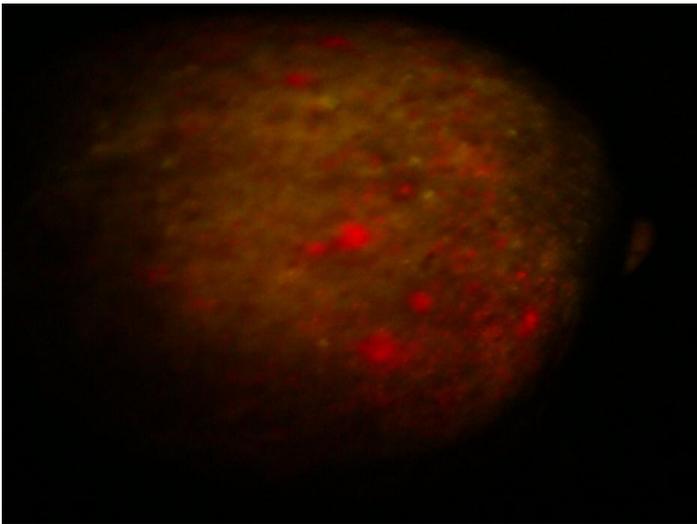


Abb. 4: Aktinische Keratosen auf männlicher Glatze. Fluoreszenzfoto

3 Praxis der Photodynamischen Therapie

Zur PDT liegen mehrere prospektive, randomisierte, doppelblinde, placebo-kontrollierte Studien vor, beispielsweise die von Szeimies et al. [5]. Wir führen Fluoreszenzdiagnostik und Photodynamische Therapie (PDT) innerhalb eines Arbeitsgangs durch.

Zunächst wird ALA oder deren Methylester (Metvix®) in Form einer Salbe oder Lösung auf die befallene Haut gebracht. Diese Vorstufen des Photosensibilisators Protoporphyrin IX (PPIX) dringen in die Haut ein, werden bevorzugt von sich rasch teilenden Zellen aufgenommen und dort zu PPIX metabolisiert. Dann wird die behandelte Haut mit einem lichtdichten Verband bedeckt.

Drei Stunden später wird der Verband abgenommen. Das auf der Hautoberfläche verbliebene PPIX wird mit einem in 0,9 %-iger Kochsalzlösung getränkten Wattebausch abgewischt. Zur Fluoreszenzdiagnostik wird die behandelte Haut im Licht einer Speziallampe (siehe Abbildung 4) betrachtet. Die Krebszellen enthaltenden Strukturen fluoreszieren purpur- bis korallenrot. Unmittelbar danach werden die Krebszellen durch Licht (VIS) nahezu selektiv zerstört.

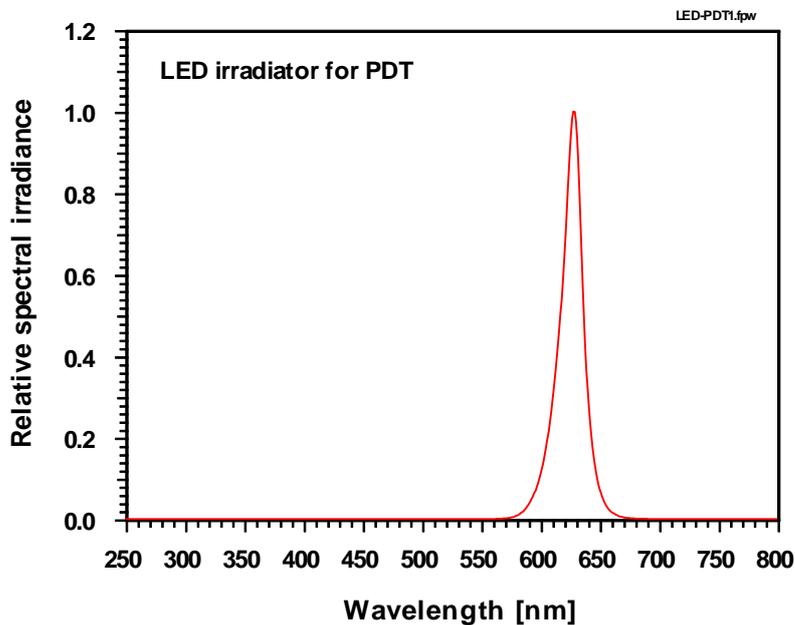


Abb.5: Emission einer maximal bei etwa 630 nm emittierende LED-Lichtquelle zur Photodynamischen Therapie

Zur Belichtung sind Lichtquellen mit unterschiedlichen Charakteristika In Gebrauch. Neben maximal bei etwa 630 nm emittierenden LEDs sind auch breitbandige Lichtquellen üblich. Seit einigen Jahren bevorzugen wir mit Gelbfiltern versehene Therapiegeräte, die zusätzlich zu VIS auch Nahes Infrarot (IR-A) emittieren (siehe Abbildung 6).

Lichtquelle zur Photodynamischen Therapie sog. Breitbandgerät

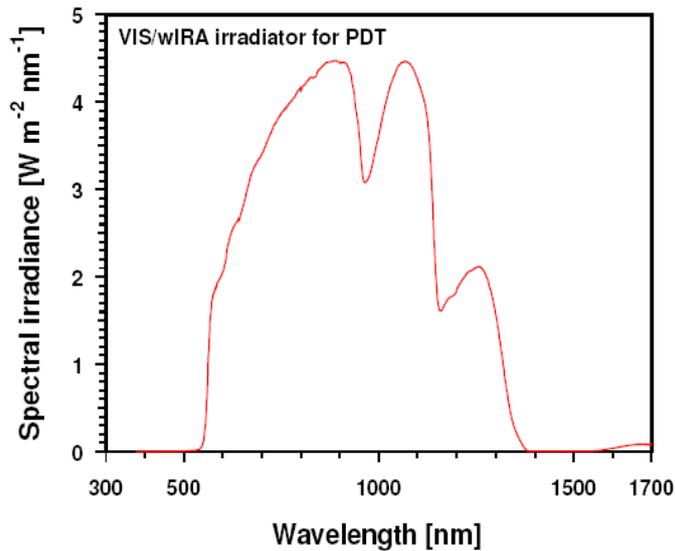


Abb. 6. Emission eines mit Gelbfilter versehenen Therapiegeräts, das zusätzlich zu VIS auch Nahes Infrarot (IR-A) emittiert

Zunehmender Beliebtheit zur PDT erfreut sich unter skandinavischen Kollegen die natürlichste aller Lichtquellen – die Sonne [5]. In Abbildung 6 ist beispielhaft ein in Berlin registriertes Solarspektrum dargestellt.

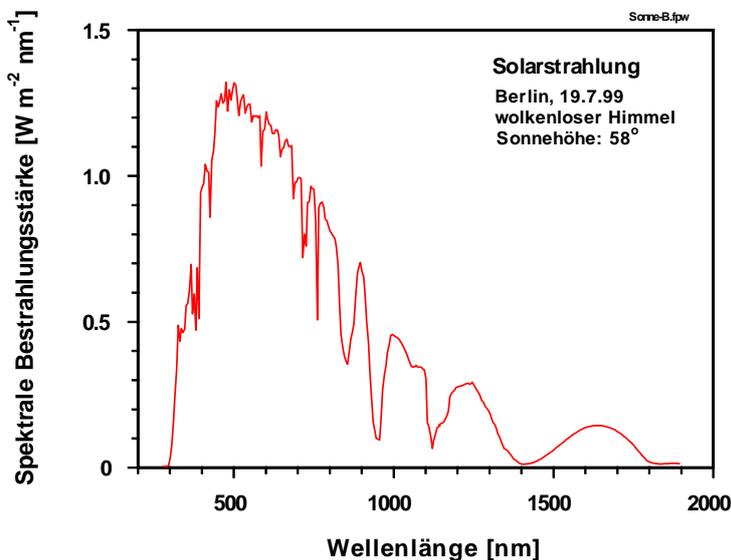


Abb. 7. Spektrum der Sonneneinstrahlung am Mittag bei wolkenlosem Himmel im Hochsommer in Berlin [4]

3.1 Vorläufige Ergebnisse

Die hier vorgelegten Ergebnisse müssen als vorläufig eingestuft werden, weil ein Teil der Patienten bisher nicht nachuntersucht werden konnte. *Bis dato* wurden 364 Patienten unter der Diagnose Aktinische Keratosen photodynamisch therapiert, davon 31 mit drei oder mehr Behandlungen. Komplette Rückbildung in 27 der 31 Fälle (87 %). Nur einmalig wurden 223 Patienten mit Aktinischen Keratosen photodynamisch therapiert. Komplette Rückbildung in 193 Fällen (86 %).

Bei den in gleicher Weise behandelten flachen Basalzellkarzinomen fielen die Ergebnisse deutlich ungünstiger aus: Von sieben dreimal oder häufiger behandelten Basalzellkarzinomen haben sich klinischer Bewertung zufolge nur vier komplett rückgebildet. Die restlichen Tumore wurden exzidiert und histologisch kontrolliert. Von 18 sehr flachen, nur einmal behandelten Basalzellkarzinomen haben sich klinischer Bewertung zufolge 15 der flachen Tumore komplett rückgebildet.

Der Erfolg der PDT hängt maßgeblich von der Gewebekonzentration des Photosensibilisators ab. Deshalb haben wir bei drei Patienten die PDT nach vorheriger Mikronadel-Perforation durchgeführt [6]. Die engmaschige oberflächliche Perforation der Haut mit sterilen Mikronadeln (Microneedling) ist ein neues Verfahren zur Behandlung von atrophen Narben und alternder Haut. Das schnelle und einfache Verfahren wird zunehmend auch eingesetzt, um schlecht penetrierende externe Wirkstoffe in die Epidermis und Dermis einzubringen. Alle Patienten waren zuvor mit üblicher PDT ohne ausreichenden Erfolg behandelt worden. Die Hautläsionen wurden mit dem Mikronadel-Stempel Dermastamp weitgehend unblutig perforiert. Die ALA-Nanoemulsion wurde unmittelbar danach aufgetragen. In der Fluoreszenzdiagnostik zeigte sich nach 3-stündiger Einwirkzeit eine intensive und homogene Darstellung der kanzerösen Läsionen. Die Bestrahlung erfolgte mit einem mit Gelbfiltern versehenen Therapiegerät, das zusätzlich zu VIS auch Nahes Infrarot (IR-A) emittiert (Gesamtdosis 240J/cm²) und musste bei keinem Patienten wegen Schmerzen abgebrochen werden. Ein bis drei Tage später entwickelten sich heftige, teils sogar pustulöse Erytheme. Nach 2 bis 4 Behandlungen waren die Läsionen bei allen Patienten klinisch und histologisch abgeheilt. Die kosmetische Ergebnisse waren exzellent. Dieses Verfahren scheint der bisher verwendeten Kürettage und Mikrodermabrasion überlegen und ist eine Alternative zu der aktuell erprobten Beimengung von Penetrationsvermittlern zum Photosensibilisator.

4 Schlussfolgerungen und Tipps für die Praxis

- PDT mit mit Gelbfiltern versehenen Therapiegeräten, die zusätzlich zu VIS auch Nahes Infrarot (IR-A) emittieren, hat sich auch in der Niederlassung sehr bewährt
- Zufriedene Patienten – zufriedene Ärzte
- Im Vergleich zu anderen Behandlungsarten: Der Arzt therapiert, der Patient wartet nur die Heilung ab
- Schmerzen ja, aber keine Narben
- Wiederholbar
- Personal- und arbeitsaufwendig, aber für die Betroffenen in mehrfacher Weise wohltuend.

Literatur

- [1] O. Raab, Über die Wirkung fluoreszierender Stoffe auf Infusorien. Z Biol 39, 524-546 (1900)
- [2] H. von Tappeiner, Über die Wirkung fluoreszierender Stoffe auf Infusorien nach Versuchen von O. Raab, Münch Med Wochensch 47, 5-7 (1900)
- [3] J. C. Kennedy, R. H. Pottier, Endogenous protoporphyrin IX, a clinically useful photosensitizer for photodynamic therapy. J. Photochem Photobiol. B: Biol 14, 275-292 (1992)
- [4] R.-M. Szeimies, P. Radny, M. Sebastian et al. Photodynamic therapy with BF-200 ALA for the treatment of actinic keratosis: results of a prospective, randomized, double-blind, placebo-controlled phase III study. Br J Dermatol 163, 386-294 (2010)
- [5] S. R. Wigell, M. P. Haedersdal, P. Eriksen, H. C. Wulf, Photodynamiv therapy of actinic keratoses with 8 % and 16 % methylaminolaevulinate and home-based daylight exposure: a double-blinded randomized clinical trial. Br J Dermatol 160, 1308-1314 (2009)
- [6] G. Kolde, E. Rowe, H. Meffert. Optimierung der photodynamischen Therapie durch Mikronadel-Perforation. J Deutsch Dermatol Ges 9, (Suppl. 5) 5-8 (2011).

Heliotherapie und Innere Medizin

Rolfdieter Krause

AG Medizinische Heliotherapie i.d. Abteilung f. Klinische Naturheilkunde
Charité – Universitätsmedizin Berlin, und
KfH Nierenzentrum B-Moabit, Kuratorium für Dialyse u. Nierentransplantation

Einführung und historische Aspekte

Heliotherapie in Form der Exposition von Sonnenstrahlung zur „Gesundheitsförderung“ wurde wohl schon vor 3.500 Jahren zur Zeit des Sonnenpharao Echnaton und seiner Gemahlin Nofretete angewendet. Ebenso wird überliefert, dass sich die Olympioniken des klassischen Altertums zur Steigerung der körperlichen Leistungsfähigkeit der Sonne exponierten.

Sonnenexposition als roborierende Maßnahme wurde es im 5. Jahrhundert v. Chr. von Hippokrates empfohlen. Mitte des 19. Jahrhunderts hatte der Leipziger Pädiater Schreiber die roborierenden Wirkungen im dortigen Klinikgarten wieder-entdeckt.

Rachitis und Höhensonne

Für die innere Medizin wurde die „Höhensonnenbehandlung“ 1919 vom Berliner Kinderarzt Huldchinsky vorgestellt und entwickelte sich zur Standardtherapie der Rachitis bis in die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts.

Tuberkulose

Die bekannteste Indikation der natürlichen Heliotherapie war die Therapie der Tuberkulose. Hierzu konnte von wenigen Jahren der Nachweis erbracht werden, dass tatsächlich über die UV-Strahlung induzierte Aktivierung des Vitamin D-Metabolismus ein antimikrobiell wirksames Protein, das Cathelicidin, freigesetzt wird, welches *M. tuberculosis* abtöten kann.

Geographische und saisonale Inzidenzen

In den vergangenen Jahrzehnten sind die Indikationen für Heliotherapie durch epidemiologische Beobachtungen erweitert worden. So wurde (i.d.R. in retrospektiven Analysen) festgestellt, dass bestimmte Erkrankungsmanifestationen in Äquatornähe seltener zu finden sind als bei den

Menschen, die in höheren Breitengraden leben, und dass es in den höheren Breitengraden saisonale Schwankungen gibt mit erhöhten Krankheits-Inzidenzen im Winterhalbjahr.

Sonnenstrahlung und Vitamin D

Neben möglichen Einflüssen der Umgebungstemperaturen wird heute überwiegend der durch den UV(B)-Anteil der Sonnenstrahlung aktivierte Vitamin-D-Metabolismus für diese Effekte verantwortlich gemacht. In fast allen Körperorganen/-zellen wurden Vitamin-D-Rezeptoren gefunden, über welche die organspezifischen Wirkungen direkt an der bzw. über die Zielzelle vermittelt werden. Neuere Untersuchungen konnten zusätzlich darauf hinweisen, dass auch der UV(A)-Anteil der Sonnenstrahlung systemische Wirkungen auslösen kann (z.B. Nitrid Oxid-Freisetzung in der Haut) sowie auch das sichtbare Licht über die Modulation serotonerger und noadrenerger Neurotransmitter.

Blut(hoch)druck

Bei seriellen UV(B)-Ganzkörper-Bestrahlungen (Krause et al. 1998) wie auch mit UV(A)-Ganzkörper-Exposition (Opländer et al. 2009) wurden Blutdrucksenkungen nachgewiesen. Dies steht in Übereinstimmung mit der Metaanalyse von Rostand (1997), dass die Hypertonieinzidenz mit Entfernung vom Äquator abnimmt.

Darüber hinaus werden die Blutspiegel von Renin und Angiotensin II mit über den lokalen Vitamin-D-Rezeptor gesteuert (Li 2010).

Herz-Kreislaufkrankungen

Ebenso gibt es seit längerem epidemiologische Daten über eine Saisonalität von kardiovaskulären Erkrankungen, die mit der UV-Exposition in Zusammenhang gebracht werden (Scragg 1981, 1995). So gibt es z.B. aus den USA (Spencer et al. 1998) und aus Kanada (Shasen et al. 1999) Berichte darüber, dass die Sterblichkeit an Myokardinfarkten im Januar besonders hoch sei. Auch hierfür wird die reduzierte Sonnenstrahlung, stärker als die niedrigeren Umgebungstemperaturen, als Ursache angesehen.

Diabetes mellitus

Auch der Typ I-Diabetes hat unterschiedliche geographische Inzidenzen. Bei Kindern und Jugendlichen fand sich eine Zunahme zu den höheren Breitengraden hin (Mohr et al. 2008). Ebenso wurde für den Typ II saisonale Unterschiede mit häufigeren Hypoglycämien im Winter festgestellt (Campell et al. 1975, Behall et al. 1984).

Lungenkrankheiten

Auch für pulmonale Erkrankungen wie virale oder bakterielle Infektionen oder allergische Reaktionen scheinen der Breitengrad und damit die (saisonale) UV-Exposition eine Rolle zu spielen. So fand sich in den USA ein Nord-Süd-Gefälle für allergische Reaktionen, die mit der Vitamin-D-vermittelten angeborenen Immunität in Zusammenhang stehen könnte (Scheuber et al. 2008, Camargo et al. 2010). Da nach Ergebnissen unserer Berliner Arbeitsgruppe sich unter seriellen Ganzkörper-UV-Bestrahlungen auch positive Adaptationen im antioxidativen System fanden, könnten diese Änderungen ebenfalls mit in Betracht gezogen werden (Krause 2012).

Organ-Carcinome

Für mehrere Organkrebsformen, wie Prostata-Karzinom, Mamma-Karzinom, Colon-Karzinom gibt es gute epidemiologische Daten für ein Nord-Süd-Gefälle. Die ersten Beobachtungen stammen bereits aus den 1980er Jahren (Garland et al. 1998). Aus Norwegen gibt es dazu auch saisonale Beobachtungen mit günstigeren Prognosen, wenn im Sommer bzw. Frühherbst die Diagnose gestellt wurde (Moan et al. 2010).

Chronische Niereninsuffizienz

Eine deutliche Saisonalität des Vitamin-D-Status gibt es auch bei chronisch Nierenkranken und Dialysepatienten, obwohl insbesondere bei den älteren die urämische Haut nur reduziert auf UV-Strahlung reagiert. In eigenen Untersuchungen konnte unsere Berliner Arbeitsgruppe zeigen, dass sowohl unter seriellen Teilkörper- wie auch Ganzkörper-Bestrahlungen mit sonnenähnlichem UV-Spektren der Vitamin-D-Haushalt komplett normalisiert werden kann. Dabei fanden sich etliche der bereits beschriebenen vitamin-D-

vermittelten Effekte: Anstieg der Knochendichte (DE-QCT) und Abnahme des (sekundären, renalen) Hyperparathyreoidismus, Verbesserungen der Blutdruckregulation und der Herzfrequenz-Variabilität sowie der körperlichen ergometrischen Leistungsfähigkeit (Krause 2010).

Klimatherapie

Viele der bisher beschriebenen Reaktionen sind seit Jahrhunderten auch bekannt von Klimakuren an der See, im Mittel- und Hochgebirge. Auch hier spielt die vermehrte oder stärkere UV-Exposition eine wichtige Rolle. So können entsprechende Klima-/Heliotherapie-Kuren z.B. ganzjährig im Hochgebirge oder am Toten Meer durchgeführt werden (Schuh 2012).

Literatur

MF. Holick (Hrsg.): Vitamin D - Physiology, Molecular Biology, and Clinical Applications. Humana Press/Springer Science +Business Media 2010.

J. Reichrath, B. Lehmann, J. Spitz (Hrsg.): Vitamin-D-Update 2012. Dustri-Verlag 2012.

R. Krause, R. Stange (Hrsg.): Lichttherapie. Springer Verlag 2012.

Thermische, schädigende und protektive Wirkungen von Infrarot-Hautbestrahlungen

H. Piazena^{1,2}, H. Meffert³, R. Uebelhack¹, W. Müller⁴, W. Pittermann⁵,
K. Jung⁶ und M. Kietzmann⁷

¹Charité, AG Medizinische Photobiologie, Weissenseer Weg 110, 10369 Berlin

²Technische Universität Berlin, FG Lichttechnik, Berlin, ³Dermatologisches Zentrum Berlin,

⁴Wetzlar, ⁵Düsseldorf, ⁶Gematria-Test Lab, Berlin, ⁷Tierärztliche Hochschule, Inst. F. Pharmakologie, Toxikologie und Pharmazie, Hannover

1 Einleitung

Infrarotbestrahlungen (IR-Bestrahlungen) der Haut gehören zu den ältesten Verfahren der Menschheit in Therapie und *Wellness*. Standen hierfür zunächst nur die Sonne, Feuer und erwärmte Körper als Quellen infraroter Strahlung zur Verfügung, so kann heute auf eine Vielzahl technischer Infrarotstrahler zurückgegriffen werden, die eine der gewünschten Anwendung entsprechende Selektion der Emissionsspektren innerhalb des Spektralbereiches infraroter Strahlung (IR-A, 0,78 – 1,4 µm; IR-B, 1,4 – 3,0 µm und IR-C, 3,0 – 1000 µm) gestatten. Von besonderer Bedeutung für eine Vielzahl therapeutischer Anwendungen [1-4] sind dabei die auf *Manfred von Ardenne* und *Erwin Braun* zurückgehenden technischen Lösungen zur Wasserfilterung kurzwelliger Infrarot-Strahlung (wIRA), mit denen das Spektrum der auf die Erdoberfläche einfallenden solaren IR-Strahlung nachempfunden wurde, die durch atmosphärisches Wasser und Wasserdampf gefiltert wird und hierdurch gegenüber anderen IR-Quellen bei gleichen Expositionsbedingungen zu einer geringeren thermischen Belastung des Gewebes führt [5].

Einzelne Überdosierungen von Haut und Gewebe können Hitzeschmerz und akute thermischen Schäden wie Verbrennungen, Wärmeurtikaria (*urticaria thermalis*) und Kreislaufkollaps verursachen. In zahlreichen Fällen häufiger Infrarot-Bestrahlung mit großer Bestrahlungsstärke und Dosis wurden auch unterhalb der Grenzen von Hitzeschmerz und akuten Wirkungen chronische Hautschäden wie das *Erythema ab igne* beobachtet, auf dem vereinzelt Plattenepithelkarzinome entstehen können [6-11].

Für Anwendungen infraroter Strahlung in Therapie und *Wellness* mit dem Ziel der Gewebeerwärmung ergibt sich hieraus die Notwendigkeit zur Begrenzung von IR-Hautexpositionen. Allerdings zeigen sich die hierzu zur Verfügung stehenden Grenzwerte auf Grund fehlender oder unzureichender spektraler Differenzierung und

Erwärmung verhindernder Beträge [12-21] wie auch auf Grund ihres ausschließlichen Bezugs auf die Akuteffekte Hitzeschmerz und Verbrennung [22] als wenig geeignet. Gesucht sind daher relevante und praktikable Kriterien und Bezugsgrößen, die zur Dosierung von IR-Hautbestrahlungen mit Gewebeerwärmung genutzt werden können.

Einfach messbare Parameter des thermischen Hautzustandes sind die Hautoberflächentemperatur und die stimulierte Hautrötung (IR- oder Wärme-Erythem). Ein Ziel der Untersuchungen bestand daher darin, zu prüfen, ob diese Größen zur Charakterisierung von IR-Hautbestrahlungen hinreichend und zur Dosierung geeignet sind.

Weitere Untersuchungen wurden angeregt durch Publikationen über mögliche negative Effekte kurzweiliger Infrarotstrahlung auf Hautalterungsprozesse durch direkte molekulare Wechselwirkungen und durch Entstehung freier Radikale. Zahlreiche dieser Publikationen erwiesen sich jedoch als methodisch fehlerhaft und in vielen ihrer Konsequenzen unbegründet. Ursächlich waren hierfür unzulässige Extrapolationen auf die optischen und thermischen Bedingungen und Prozesse im lebenden Gewebe bei *in vitro*- und *ex vivo*-Experimenten sowie unbegründete Anwendungen photobiologischer Gesetze (s. Literaturhinweise und Diskussion in [23-26]). Von dieser Fehlerhaftigkeit betroffen waren auch Arbeiten, die sich mit möglichen Schadwirkungen der solaren IR-Strahlung auf die menschliche Haut beschäftigten und in der Konsequenz in der Forderung nach aktivem Hautschutz gegenüber solarer IR-Strahlung mündeten [27-31]. Die Diskussion dieser Arbeiten erscheint als umso wichtiger, als dass andere Publikationen Hinweise auf protektive Effekte der solaren IR-Strahlung liefern, die sich für Strahlenschutzkonzepte als wesentlich erweisen könnten [32-41].

Neben der Untersuchung der photobiologischen Grundlagen sowie optischer und thermischer Effekte der IR-Strahlung im Gewebe als Voraussetzung für die korrekte Dosierung von IR-Hautbestrahlungen unter *in vitro*-, *ex vivo*- und *in vivo*-Bedingungen wurden daher in einer weiteren Studie die Akuteffekte wassergefilterter Infrarot-A-Strahlung (wIRA) auf Zelltod (Zytotoxizität), auf die Entzündungsreaktion, auf das Antioxidative Potential der Haut und auf die Bildung freier Radikale in der Epidermis/Dermis gemessen. Zur Erfassung des erwartungsgemäß ungünstigsten Falles erfolgten die Untersuchungen bei großer, jedoch noch physiologisch möglicher Bestrahlungsstärke. Im Speziellen sollte der Bestrahlungseffekt mit der Wirkung eines adäquaten, konvektiv übertragenen thermischen Reizes verglichen werden.

2 Material und Methoden

(1) *Berechnungen zur Wechselwirkung der IR-Strahlung mit dem Gewebe.* Die Berechnungen erfolgten für helle Haut nach dem zuvor beschriebenen Verfahren [24]. Berechnungsgrößen waren die spektrale diffuse Reflektanz der Haut und die Tiefe der spektralen Penetration in das Gewebe. Für sechs spektral unterschiedliche IR-Strahler (Mittagssonne an einem wolkenlosen Sommertag in Berlin, ein VIS/wIRA-Strahler, Typ *Photodyn 750* mit Filter BTE 31 und RG 780/3 (Hydrosun GmbH, Müllheim), zwei ungefilterte IR-Halogenlampen mit Korrelierten Farbtemperaturen von CCT = 3000 K sowie CCT = 1750 K und ein IR-C-Strahler mit der Temperatur von 708 K) wurden die Daten der spektralen skalaren Bestrahlungsstärke im Gewebe und hieraus die jeweiligen Absorptions- und Penetrationsprofile berechnet.

(2) *Experimentelle Untersuchungen.*

Bestrahlungstechnik. Eingesetzt wurden ein wIRA-Strahler (Typ *Photodyn 750* mit Filter RG 780/3 (Hydrosun GmbH, Müllheim), ein ungefilterter IR-Halogenstrahler (750 W, CCT = 1750 K, Philips) und ein IR-C-Strahler (708 K).

Messungen thermischer Effekte von IR-Hautbestrahlungen in vivo. Einbezogen wurden gesunde Probanden im Alter zwischen 18 und 69 Jahren, die sich in körperlicher Ruhe befanden. Bestrahlt wurde der Rücken mit Expositionsflächen von mehr als 10 cm × 10 cm, so dass die im Gewebe stimulierten Wärmetransportprozesse mit denen einer Ganzkörperexposition vergleichbar waren [42].

Zum Ausschluss interindividueller Unterschiede wurden die vergleichenden Untersuchungen zur Erfassung der Effekte des Strahlungsspektrums und der Bestrahlungsstärke auf den thermischen Zustand der Haut an jeweils den gleichen Probanden vorgenommen. Die Probanden befanden sich im körperlichen Ruhezustand und in einem Raum ohne Luftventilation, mit definierter Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Die Expositionen erfolgten unter Ausschluss von Luftventilationen für jeweils 30 Minuten mit konstanter inzidenter Bestrahlungsstärke, deren Beträge von Bestrahlung zu Bestrahlung durch Abstandsänderung variiert wurden. Die Lufttemperatur im Untersuchungsraum rangierte zunächst im Bereich von etwa $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

Zur Untersuchung der thermischen Wirkungen wassergefilterter IR-A-Strahlung unter Hitzestress wurden mit dem wIRA-Strahler zusätzlich Hautbestrahlungen bei Temperaturen der umgebenden Luft von bis zu etwa 45 °C in einer hierzu speziell gebauten Klimakammer vorgenommen. Hierdurch sollte auch eine Abschätzung des maxima-

len thermischen Effektes der Solarstrahlung unter den Bedingungen der Tropen ermöglicht werden.

BUS-Experimente. Die Experimente zur Untersuchung der Effekte von wIRA und konvektiv zugeführter Wärme auf Zelltod, Entzündung, Radikalbildung und Antioxidatives Potential wurden am *Bovine Udder System* (BUS-Hautmodell) vorgenommen, einem Euter, das einer unmittelbar zuvor geschlachteten Kuh entnommen und über die Blutbahnen mit Nähr- und Sauerstoff versorgt und intern temperiert wurde, so dass der aerobe Metabolismus der Haut über den Zeitraum des Experimentes hinweg (5 Stunden) aufrechterhalten werden konnte [43]. Nach erfolgter Hautexposition mit wIRA oder mit konvektiver Wärme, die durch einen Heizlüfter auf die Haut des Euters übertragen wurde, wurden Gewebeproben mittels Ganzhautbiopsien entnommen und bis zur Auswertung innerhalb der folgenden 24 Stunden in Trockeneis gelagert. Im Labor wurden untersucht:

- die Abnahme von MTT (Farbstoff zur Markierung lebender Zellen)/Formazan zur Erfassung des zytotoxischen Effektes mittels UV/VIS-Spektroskopie [44]
- die Änderung der Prostaglandin-2-Konzentration (PGE-2) zum Nachweis einer Entzündungsreaktion [44]
- die Anzahl induzierter freier Radikale in der Haut mittels Elektronen-Spin-Resonanz-Spektroskopie [45-47]
- die Änderung des Antioxidativen Potentials (SAP) der Haut mittels Elektronen-Spin-Resonanz-Spektroskopie [45-47].

Die Bestimmung dieser Parameter erfolgte in fünf unterschiedlichen Experimenten:

- (1): Referenzmessung bei einer Hautoberflächentemperatur von 26 °C, keine Bestrahlung, keine konvektive Wärmezufuhr oder Kühlung.
- (2): wIRA-Bestrahlung mit 1900 W m^{-2} ohne Luftkühlung des bestrahlten Gewebes, ansteigende Hautoberflächentemperatur von 28 °C bis auf 45 °C.
- (3): wIRA-Bestrahlung mit 1900 W m^{-2} mit Luftkühlung des bestrahlten Gewebes, ansteigende Hautoberflächentemperatur von 28 °C bis auf 37 °C.
- (4): keine Bestrahlung, konvektive Erwärmung der Haut auf 37 °C.
- (5): keine Bestrahlung, konvektive Erwärmung der Haut auf 45 °C.

Die Expositionen wurden jeweils über 30 Minuten hinweg vorgenommen.

Messtechnik. Für die experimentellen Untersuchungen wurden die folgenden Messgeräte eingesetzt:

- Hauttemperatur: IR-Thermometer (Typ *FLUKE 574*, Fluke Corp., Everett, USA)
- Hautfarbe: Farbmessgerät (Typ: *Spectropen*, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf)
- Hauttemperaturverteilung: Wärmebildkamera (Typ: *VARIOSCAN high resolution*, model 3021, Jenoptik, Jena)
- Spektrale Bestrahlungsstärke der IR-Strahler: Doppelmonochromator-Spektralradiometer mit Ulbricht'schen Kugeln als Messköpfe (*OL 754*, Optronic Inc., Orlando und *Spectro 320 D*, Instrument Systems, München), Messbereich: 0,2 – 1,7 μm .
- Bestrahlungsstärke: IR-Radiometer (Typ: *KRS-5*, Institut für Physikalische Hochtechnologie e.V., Jena)

3 Ergebnisse

3.1 Remission und Penetration infraroter Strahlung in Haut und Gewebe

Die Wechselwirkung infraroter Strahlung mit Haut und Gewebe resultiert in Absorption durch Chromophore und in Streuung an Streuzentren. Chromophore mit wesentlichem Einfluss im IR-Bereich sind Wasser, dessen Massenanteil im Weichgewebemasse bei annähernd 70 % liegt, Melanosomen in der Haut, Lipide, Proteine und Hämoglobin. Strahlungsstreuung findet an Dichteinhomogenitäten und an Fluktuationen der dielektrischen Konstante im Gewebe statt, aus denen sich lokale oder zeitliche Änderungen des Brechungsindex ergeben, sowie an zellulären Strukturen mit Durchmessern zwischen $10^{-2} \mu\text{m}$ und $10 \mu\text{m}$ wie Zellkernen, Mitochondrien, Proteinfasern, Molekülen und Zellen.

Im kurzwelligen Teilbereich infraroter Strahlung (IR-A) wird die Strahlungsschwächung durch Streuprozesse bestimmt, während im mittel- und langwelligen Teilbereich (IR-B und IR-C) Absorptionsprozesse dominieren, die hauptsächlich durch den mit zunehmender Wellenlänge starken Anstieg des spektralen Absorptionskoeffizienten des Wassers verursacht werden. Dies hat einerseits zur Folge, dass erhebliche Anteile kurzwelliger IR-Strahlung nach ihrer Wechselwirkung mit dem Gewebe remittiert werden, während die Remission mittel- und langwelliger IR-Strahlung mit etwa 4 – 7 % klein ausfällt (Abb. 1). Darüber hinaus resultiert die multiple Streuung kurzwelliger IR-Strahlung in einer längeren Aufenthaltsdauer der Photonen im Gewebe und in der Absorption in einem größeren Volumen, so dass IR-A bis in die *Subcutis* eindringt, während IR-B bereits in der Epidermis und in der Dermis und IR-C im *stratum corneum* und in der Epidermis absorbiert werden (Abb. 2) [24].

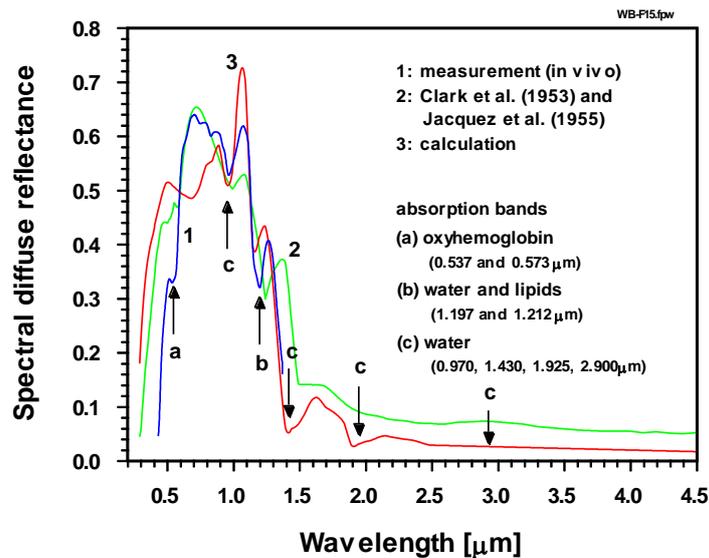


Abb. 1: Die spektrale diffuse Reflektanz heller Haut als Funktion der Wellenlänge nach Messungen am Unterarm eines unpigmentierten Probanden (in vivo, Hauttyp I, Kurve 1), nach Clark et al. [48] und nach Jacquez et al. [49] (Kurve 2) und nach Berechnung [24], Kurve 3).

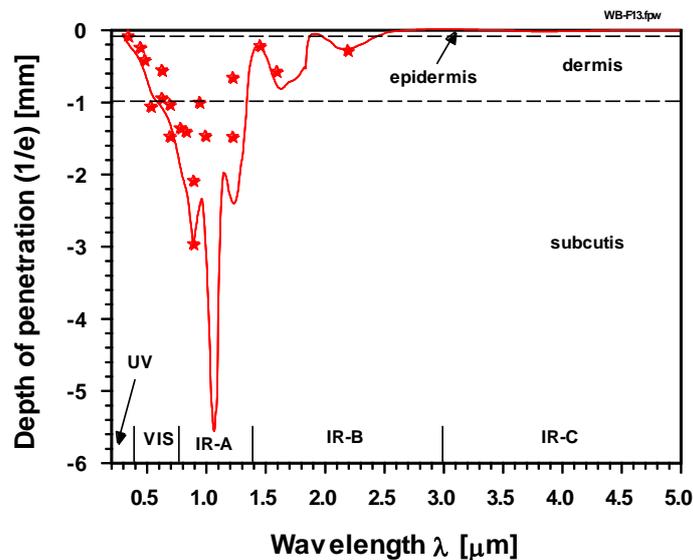


Abb. 2: Die spektrale Eindringtiefe optischer Strahlung in helle Haut als Funktion der Wellenlänge [24].

Da nach dem *Grotthus-Draper'schen* Gesetz nur absorbierte Strahlung zu einer biologischen Wirkung führt, sind Strahlungsverluste durch Reflektion und Remission wie auch durch Absorption in bedeckendem Gewebe bei der Dosierung von IR-Expositionen interner Gewebe- oder Zellstrukturen unter *in vivo*-Bedingungen zu berücksichtigen. Ebenso ergibt sich die Notwendigkeit der Einbeziehung dieser Strah-

lungsverluste in die Dosierung bei *in vitro*-Experimenten mit IR-Strahlung an isolierten Zellen oder Geweben, falls der Anspruch auf Übertragbarkeit der Daten auf die optischen Verhältnisse *in vivo* besteht.

Als Beispiel zeigt Abbildung 4 berechnete Strahlungsverluste durch Remission und die Eindringtiefen in das Gewebe für spektral unterschiedliche IR-Quellen (Abb. 3).

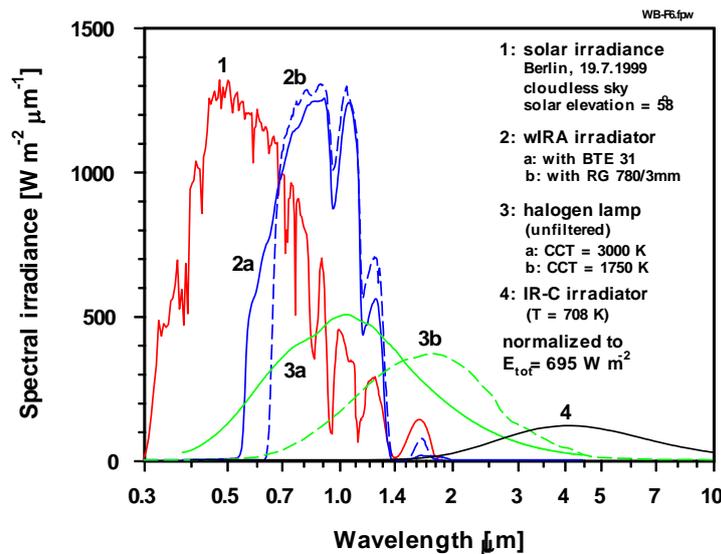


Abb. 3: Die spektrale solare Bestrahlungsstärke auf einer horizontalen Empfängerfläche in Berlin am Mittag des 19. Juli 1999 (Sonnenhöhe über dem Horizont $\approx 58^\circ$) und bei wolkenlosem Himmel (1) als Funktion der Wellenlänge und im Vergleich zu den Spektren der Bestrahlungsstärke eines wIRA-Strahlers (Typ Photodyn 750 mit Filter BTE-31 (2) und RG 780/3 mm (3), zweier ungefilterter IR-Halogenlampen (3a: CCT = 3000 K und 3b: CCT = 1750 K) sowie eines metallischen IR-C-Strahlers mit der Oberflächentemperatur = 708 K (4); CCT = Korrelierte Farbtemperatur.

Nach Abbildung 4 werden etwa 36 – 46 % der inzidenten IR-Komponente der die Erdoberfläche erreichenden Solarstrahlung wie auch beider wIRA-Strahler von der Hautoberfläche remittiert. Der Abfall der Bestrahlungsstärke infolge von Strahlungsabsorption findet dagegen maßgeblich in den tiefen Schichten der Dermis und in der Subcutis statt.

Für die ungefilterten IR-Halogenlampen ergaben sich je nach Farbtemperatur Strahlungsverluste durch Remission zwischen etwa 8 % und 17 % und für den IR-C-Strahler von etwa 5 %. Während die Penetration der Strahlung des IR-C-Strahlers auf das *stratum corneum* und auf die Epidermis beschränkt blieb, zeigte sich für die IR-Halogenlampen sowohl in den oberen als auch in den tiefer gelegenen Schichten

ein wesentlicher Abfall, der von der Strahlungstemperatur abhing und damit von den Relativanteilen mittel- und langwelliger IR-Strahlung im inzidenten Strahlungsspektrum. Letztere wurden in den oberen Hautschichten absorbiert, während die kurzwelligeren Anteile bis in die tieferen Schichten eindringen.

Hieraus ergibt sich, dass die im Gewebe stimulierten Effekte nicht nur von der Wellenlänge anhängen, sondern auch vom Ort im Gewebe infolge des sich mit der Eindringtiefe ändernden Spektrums. Das *van-Krefeld*'sche Additivitätsgesetz ist daher nur eingeschränkt zur Diskussion thermischer Effekte infraroter Strahlung im Gewebe anwendbar.

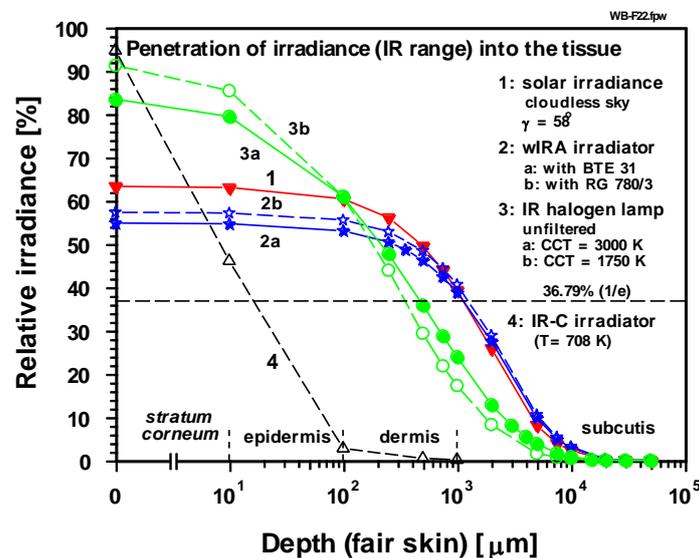


Abb. 4: Relative Bestrahlungsstärke der IR-Komponenten der in Abb. 3 dargestellten Strahler als Funktion der Eindringtiefe in helle Haut nach Schwächung der inzidenten IR-Strahlung (= 100 %) durch Remission und Absorption im bedeckenden Gewebe.

3.2 Hautoberflächentemperatur und Hautrötung bei IR-Expositionen mit unterschiedlichen Spektren, Bestrahlungsstärken und Milieutemperaturen

Die Absorption kurzwelliger IR-Strahlung erfolgt im Gewebe nicht nur in einem größeren Volumen als die Absorption mittel- und langwelliger IR-Strahlung, sondern auch in der Nähe der peripheren Blutbahnen und im Blut selbst. Gegenüber der Dissipation nach Absorption mittel- und langwelliger IR-Strahlung, die primär aus einem kleinen Volumen heraus über molekulare Schwingungen auf konduktivem Weg erfolgt, ergeben sich für die Energiedissipation nach Absorption kurzwelliger IR-Strahlung folgende Unterschiede:

- ein primärer konduktiver Wärmestrom aus einem größeren Volumen heraus
- ein primärer konvektiver Wärmetransport über die periphere Blutbahn nach Strahlungsabsorption im Blut sowie
- ein sekundär stimulierter konvektiver Wärmetransport über die Blutbahn nach primärer Erwärmung des die Blutbahnen umschließenden Gewebes.

Bei gleicher absorbierter Energie kurzwelliger IR-Strahlung fällt die lokale Erwärmung des Gewebes daher kleiner aus als bei Anwendung mittel- oder langwelliger IR-Strahlung.

Allerdings sind sowohl konduktive als auch konvektive Wärmetransportprozesse in ihrer Leistungsfähigkeit begrenzt, so dass der lokale Wärmeeffekt nicht nur vom Spektrum der IR-Strahlung, sondern auch von der Bestrahlungsstärke, von der Größe der bestrahlten Hautfläche und von der Expositionszeit abhängt.

Weitere Einflussfaktoren auf den resultierenden thermischen Zustand des Gewebes sind konduktive, konvektive und latente Wärmeaustauschprozesse mit der Umgebung, die metabolische Energieproduktion, die Strahlungsbilanz und Gegenregulationen des Organismus mit Schwitzen und/oder Vergrößerung oder Verkleinerung der peripheren Durchblutung.

Zur vergleichenden Untersuchung der Einflüsse des Strahlungsspektrums und der Bestrahlungsstärke auf den thermischen Zustand des Gewebes wurden diese Einflussfaktoren durch die Wahl der Randbedingungen ausgeschlossen bzw. konstant gehalten (s. oben). Zunächst wurde die Lufttemperatur im Untersuchungsraum auf Beträge von etwa (23 ± 2) °C bei einer relativen Luftfeuchte von etwa 50 – 60 % begrenzt. Für wIRA erfolgten die Untersuchungen zusätzlich unter den Bedingungen von Hitzestress bei Lufttemperaturen von etwa 45 °C und bei Beträgen der Relativen Feuchte von etwa 30 % in einer Klimakammer. Hierbei zeigten die Probanden unterschiedliche Muster und Fähigkeiten thermischer Gegenregulation bezüglich des Zeitpunkts und des Ausmaßes einsetzenden Schwitzens und der peripheren Durchblutung.

3.2.1 Effekte auf die Hautoberflächentemperatur

Abb. 5 zeigt die beobachteten Hautoberflächentemperaturen nach Erreichen des thermischen Gleichgewichtszustandes während der IR-Exposition als Funktion der Bestrahlungsstärke für wIRA, für eine ungefilterte IR-Halogenlampe und für einen IR-C-Strahler. Es ist ersichtlich, dass die Anwendung gleicher inzidenter Bestrahlungs-

stärken auf Grund der oben skizzierten Unterschiede von Penetration, Absorption und Wärmetransport je nach Wahl des Strahlungsspektrums zu verschiedenen thermischen Gleichgewichtszuständen in der Haut führt. Dies ändert sich auch nicht, wenn nicht die inzidente Bestrahlungsstärke, sondern die im Gewebe absorbierte Bestrahlungsstärke als Bezugsgröße gewählt wird, da die zur Energiedissipation im Gewebe stimulierten konduktiven und konvektiven Wärmeströme wie oben skizziert auch vom Spektrum der absorbierten IR-Strahlung abhängen (Abb. 6).

Für wIRA mit inzidenten Bestrahlungsstärken bis zu etwa 2500 W m^{-2} zeigten sich auch bei Lufttemperaturen zwischen 38 °C und 45 °C Gleichgewichtstemperaturen, die bei gleicher Bestrahlungsstärke mit denen vergleichbar waren, die bei Lufttemperaturen von etwa $23 - 25 \text{ °C}$ bestimmt wurden (Abb. 5). Ursache hierfür waren aktive regulative Prozesse des Organismus zum Schutz vor Hitzestress.

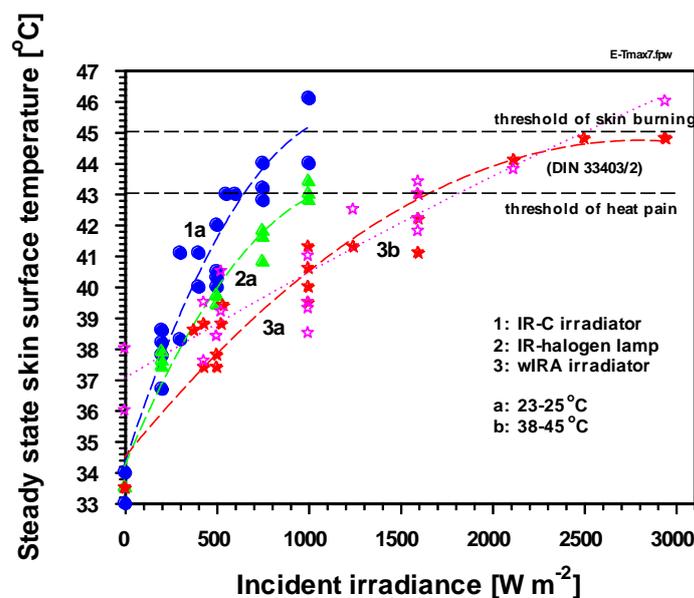


Abb. 5: Die Hautoberflächentemperatur nach Erreichendes thermischen Gleichgewichtszustandes als Funktion der inzidenten IR-Bestrahlungsstärke bei Anwendung eines IR-C-Strahlers mit einer Oberflächentemperatur von 708 K (1), eines ungefilterten IR-Halogenstrahlers ($\text{CCT} = 1750 \text{ K}$, 2) und eines wIRA-Strahlers (Typ Hydrosun 750 mit Filter RG 780/3 (3)). Messungen am Rücken gesunder, hellhäutiger Probanden im Ruhezustand und bei Lufttemperaturen /-feuchte von etwa $23 - 25 \text{ °C} / 50 - 60 \%$ (a) sowie bei etwa $38 - 45 \text{ °C} / 28 - 32 \%$ (b); keine Luftventilation im Raum; Größe der bestrahlten Hautfläche $> 100 \text{ cm}^2$.

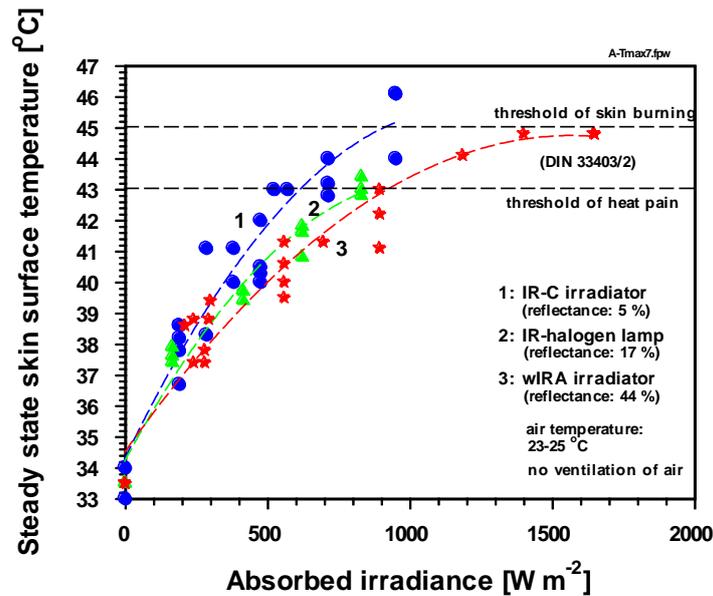


Abb. 6: Die Hautoberflächentemperatur nach Erreichendes thermischen Gleichgewichtszustandes als Funktion der absorbierten IR-Bestrahlungsstärke. (Strahler, Probanden und Randbedingungen, s. Abb. 5).

3.2.2 Effekte auf die Bildung von IR-Erythemen

IR-Hautexpositionen können als Akutreaktion IR-Erytheme verursachen, die sich in Struktur, Intensität und Persistenz voneinander unterscheiden [50].

Die hier mit einem wIRA- und mit einem IR-C-Strahler für jeweils 30 Minuten erfolgten Hautbestrahlungen zeigten in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke und von der Lufttemperatur zwei unterschiedliche Arten der Erythemreaktion:

- das *Regulative „flüchtige“ IR-Erythem*, das als Teil der Gegenregulation des Organismus durch Vergrößerung der peripheren Durchblutung bereits während der Exposition gebildet wurde und
- das *Persistierende IR-Erythem*, dessen Ursache ein akuter thermischer Schaden in der Haut als Folge einer Überdosierung war.

Während das *Regulative („flüchtige“) IR-Erythem* charakteristische Abklingzeiten im Bereich $\tau_e \leq 60$ Minuten aufwies, war das *Persistierende IR-Erythem* wesentlich länger, teilweise über mehrere Stunden nach der Exposition und nach dem Abklingen des regulativen IR-Erythems zu beobachten.

Abbildung 7 zeigt die nach Bestrahlung mit dem IR-C- und mit dem wIRA-Strahler gefundenen Abhängigkeiten der Abklingzeit der Erythemreaktion von der inzidenten

Bestrahlungsstärke nach Expositionszeiten von jeweils 30 Minuten. Die Bestrahlungen erfolgten dabei bei Lufttemperaturen/Relativen Luftfeuchten von 23 – 25 °C/50-60 % und für wIRA zusätzlich auch bei Beträgen 38 - 45 °C/ 28 – 32 % sowie unter den oben dargestellten weiteren Randbedingungen (Bestrahlungen des Rückens gesunder, hellhäutiger Probanden im Ruhezustand, keine Luftventilation im Raum, Größe der bestrahlten Hautfläche > 100 cm²).

Bei Lufttemperaturen von 23 – 25 °C fand der Übergang zum *Persistierenden IR-Erythem* für den IR-C-Strahler bei Bestrahlungsstärken > 800 W m⁻² statt, während hierzu bei Anwendung des wIRA-Strahlers Beträge > 2100 W m⁻² erforderlich waren. Im Bereich von Lufttemperaturen zwischen 38 °C und 45 °C waren die beobachteten Abklingzeiten der IR-Erytheme auf Grund der in Gang gesetzten Gegenregulation kleiner. *Persistierende IR-Erytheme* traten bei Bestrahlung mit dem wIRA-Strahler daher erst für Bestrahlungsstärken > 2500 W m⁻² auf.

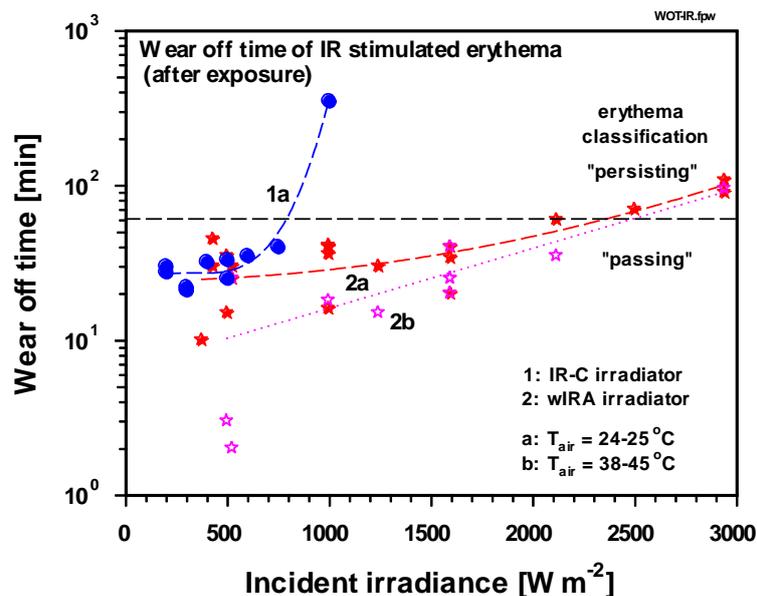


Abb. 8: Die Abklingdauer der stimulierten IR-Erytheme als Funktion der inzidenten Bestrahlungsstärke nach Bestrahlung des Rückens von gesunden, hellhäutigen Probanden im Ruhezustand mit einem IR-C-Strahler (1) und mit einem wIRA-Strahler (Typ Photodyn 750 mit Filter RG 780/3, 2). Bestrahlungen unter Ausschluss von Luftventilation im Raum bei Lufttemperaturen von 24 – 25 °C (a) und von 38 – 45 °C (b).

3.3 Abhängigkeit des thermischen Effektes von der Bestrahlungsstärke bei konstanten Dosen

Zahlreiche Autoren, die die Effekte infraroter Strahlung auf die Haut diskutierten, unterlagen dem methodischen Fehler der unbegründeten Anwendung des *Bunsen-Roscoe*'schen Proportionalitätsgesetzes, in dem sie annahmen, dass die Wirkungen von Expositionen mit gleichen Dosen auch im Fall unterschiedlicher Bestrahlungsstärken miteinander vergleichbar sind, falls die Expositionszeiten entsprechend angepasst werden.

So wurden potentielle Schädwirkungen der solaren IR-Strahlung auf die menschliche Haut häufig mit Daten begründet, die aus *in vivo*- oder *in vitro*-Untersuchungen mit Bestrahlungsstärken stammten, die die maximal mögliche Bestrahlungsstärke der Solarstrahlung an der Erdoberfläche wesentlich, teilweise um den Faktor 2 – 6 überstiegen (s. Literaturhinweise und Diskussion in [24]).

Dagegen ist die extraterrestrische solare Bestrahlungsstärke im IR-A-Bereich auf den Betrag von etwa 411 W m^{-2} begrenzt. Die Maxima der solaren IR-Einstrahlung belaufen sich in den gemäßigten Breiten im Hochsommer am Mittag auf Beträge von etwa 200 W m^{-2} und in den Tropen auf Beträge bis zu etwa 350 W m^{-2} .

Abbildung 9 zeigt die Abhängigkeit der Hautoberflächentemperatur eines Probanden als Funktion der Dosis bei wIRA-Bestrahlung des Rückens mit unterschiedlichen Bestrahlungsstärken jedoch unter sonst gleichen Randbedingungen. Es ist ersichtlich, dass unterschiedliche Bestrahlungsstärken bei gleichen Dosen zu unterschiedlichen thermischen Gleichgewichtszuständen in der Haut führen. Ursächlich für diese Unterschiede sind die in der Haut nach Strahlungsabsorption stimulierten konvektiven und konduktiven Wärmeströme, deren Leistungsfähigkeit begrenzt ist und letztlich die Nichtanwendbarkeit des *Bunsen-Roscoe*'schen Gesetzes auf thermische Effekte der IR-Strahlung in der Haut begründet.

Somit erfordern realistische Abschätzungen von Effekten der solaren IR-Strahlung auf die menschliche Haut Untersuchungsbedingungen, die einerseits die an der Erdoberfläche möglichen solaren Bestrahlungsstärken im IR-Bereich widerspiegeln und andererseits die unter diesen Bedingungen zu erwartenden Hauttemperaturen. Da hierfür weder für die gemäßigten Breiten noch für die Tropen Messdaten vorliegen, wurden die Daten für wIRA in Abb. 5 herangezogen, um eine erste Abschätzung der maximalen Hautoberflächentemperatur bei solarer IR-Einstrahlung vorzunehmen.

Letztere rangierte sowohl für Lufttemperaturen von etwa 24 °C and auch von etwa 40 °C bei Beträgen zwischen 37,0 °C und 39,5 °C, falls wIRA mit einer Bestrahlungsstärke von 400 W m⁻² angewandt wurde, die annähernd den Betrag der extraterrestischen Solarstrahlung im IR-A-Bereich repräsentiert.

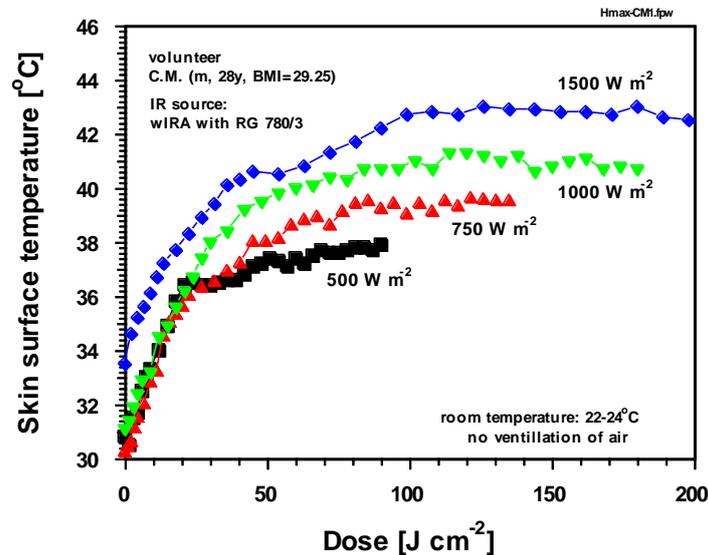


Abb. 9: Messwerte der Hautoberflächentemperatur am Rücken eines Probanden als Funktion der Dosis bei Bestrahlung mit wIRA (Strahlertyp: Photodyn 750 mit Filter RG 780/3 (Hydrosun GmbH, Müllheim) bei Anwendung unterschiedlicher Bestrahlungsstärken. Randbedingungen: Proband im Ruhezustand, Lufttemperatur /-feuchte von etwa 22 – 24 °C/ 50 – 60 %, keine Luftventilation im Raum, Größe der bestrahlten Hautfläche > 100 cm².

3.4 Schwellenwerte der Bestrahlungsstärke für unterschiedliche Bewertungskriterien

Auf Basis der Daten in Abb. 5 und Abb. 8 wurden Schwellenwerte zur Begrenzung der Bestrahlungsstärke nach unterschiedlichen Bewertungskriterien für Hautbestrahlungen mit einem IR-C-Strahler, mit einem ungefilterten IR-Halogenstrahler und mit einem wIRA-Strahler bestimmt (Tab. 1). Die Daten gelten für großflächige Hautbestrahlungen, stehen jedoch unter dem Vorbehalt möglicher Korrekturen nach Vorlage weiterer Daten.

Tab. 1: Beträge der maximalen inzidenten Bestrahlungsstärke für Hautbestrahlungen mit einem IR-C-Strahler, mit einem ungefilterten IR-Halogenstrahler („IR-A“) und mit einem wIRA-Strahler bei Begrenzung der Exposition nach unterschiedlichen Kriterien.

Kriterium zur Begrenzung	Maximale inzidente Bestrahlungsstärke [W m^{-2}]		
	IR-C	IR-A	wIRA
Vermeidung der Hitzeschmerzgrenze (43 °C nach DIN 33403/2) ($T_L \approx 25 \text{ °C}$) ($T_L \approx 40 \text{ °C}$)*	≤ 600 ?	≤ 1000 ?	≤ 1700 $\leq 1700^*$
Gleichgewichtstemperatur der Haut $\approx 44 \text{ °C}$	≈ 800	≈ 1200	≈ 2100
Vermeidung der Verbrennungsgrenze (45 °C nach DIN 33403/2) ($T_L \approx 25 \text{ °C}$) ($T_L \approx 40 \text{ °C}$)*	≤ 1000 ?	≤ 1500 ?	≤ 3000 $\leq 2500^*$
Analogie zur Sauna (Hauttemperatur $\leq 42 \text{ °C}$)	≤ 500	≤ 800	≤ 1400
Vermeidung der Persistenz des IR-Erythems ($T_L \approx 25 \text{ °C}$) ($T_L \approx 40 \text{ °C}$)*	≤ 800 ?	? ?	≤ 2100 $\leq 2500^*$
Unterdrückung von <i>heat shock</i> -Proteinen (Hauttemperatur $\leq 39 \text{ °C}$)	≤ 300	≤ 400	≤ 700

3.5 Effekte von wIRA und konvektiv übertragener Wärme auf Zytotoxizität, Entzündungsreaktion und Bildung freier Radikale (BUS-Messungen)

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden in Tab. 2 zusammengestellt. Zur Bewertung der Daten enthält die Tabelle die Definitionsgrenzen minimaler Zytotoxizität und minimaler Entzündungsreaktion. Als Zytotoxizität des Grades 1 wird eine mittels MTT-Test registrierte Abnahme lebender Zellen von mehr als 10 % bezeichnet, während die Konzentration des Prostaglandin-2 (PGE-2) um mehr als 15 % ansteigen muss, um die Definition einer Entzündung des Grades 1 zu erfüllen.

Unter den gewählten Expositionsbedingungen zeigten sich weder Anstiege von PGE-2 noch Abnahmen des MTT, die die Klassifizierungsgrenzen einer minimalen Entzündungsreaktion oder minimaler Zytotoxizität erreichten. Vielmehr schwankten die Daten im Bereich der natürlichen Variabilität und waren mit den Effekten aus analogen Untersuchungen handelsüblicher Hautpflegeprodukte vergleichbar.

Die Anzahl gebildeter freier Radikale war bei der Hauttemperatur von 45 °C nach Anwendung konvektiv übertragener Wärme mit 194 % am größten, während die Referenzmessung bei einer Hauttemperatur von 26 °C erfolgte und einen Betrag von 96

% ergab. Ein zur Referenzprobe vergleichbarer Wert wurde mit 86 % im Fall konvektiv übertragener Wärme mit Erreichen einer Maximaltemperatur von 37 °C erhalten. Bei wIRA-Anwendung mit der Bestrahlungsstärke von 1900 W m⁻² stieg die Anzahl freier Radikale mit Erreichen einer Hauttemperatur von 37 °C auf 100 % und mit Erreichen der Hauttemperatur von 45 °C auf 121 %.

Das antioxidative Potential der Haut (SAP) war im Fall der Anwendung konvektiver Erwärmung der Haut auf 45 °C mit 54 % am kleinsten. Der größte Wert des SAP ergab sich hingegen mit 144 % nach wIRA-Anwendung mit Begrenzung auf eine Hauttemperatur von 37 °C, während die Bestrahlung mit wIRA ohne Kühlung eine Hauttemperatur von 45 °C erzeugte und in einem Betrag des SAP von 125 % resultierte. Ein vergleichbarer Betrag (122 %) wurde nach konvektiver Erwärmung der Haut auf 37 °C erhalten.

Im Fall von Hauttemperaturen über 37°C resultierte die Exposition mit wIRA damit in einer wesentlichen Abnahme der Anzahl freier Radikale gegenüber der unbestrahlten Haut bei gleicher Temperatur, während sich das Antioxidative Potential entsprechend vergrößerte.

Die konvektive Erwärmung der Haut auf Beträge über 37°C verkleinerte dagegen das Antioxidative Potential und vergrößerte die Anzahl freier Radikale wesentlich.

Somit resultierte die wIRA-Anwendung in einer protektiven Wirkung gegenüber der Bildung freier Radikale.

Tab. 2: Effekte von wIRA mit einer Bestrahlungsstärke von 1900 W m^{-2} bei Begrenzung der Hauttemperatur auf 37 °C bzw. 45 °C sowie Effekte konvektiv übertragener Wärme mit Erreichen von Hauttemperaturen von 37 °C bzw. 45 °C auf Zytotoxizität, Entzündungsreaktion, Bildung freier Radikale und Antioxidatives Potential der Haut am BUS-Modell. Expositionszeiten jeweils 30 min.

Kriterium	Referenz	wIRA-Bestrahlung bei Hauttemperatur bis zu		Keine Bestrahlung, Hauttemperatur \approx	
		37 °C	45 °C	37 °C	45 °C
Abnahme lebender Zellen (MTT) [%]	0	7,7	5,5	2,2	4,4
		vgl. Zytotoxizitäts-Grad 1: MTT >10 %			
Anstieg von PGE-2 [%]	0	1,8	3,6	1,8	- 3,6
		vgl. Entzündungs-Grad 1: PGE-2 >15 %			
Anzahl induzierter freier Radikale [%]	96	100	121	86	194
Antioxidatives Potential (SAP) [%]	100	144	125	122	54

4 Schlußfolgerungen

(1) Anwendung photobiologischer Gesetze zur Dosierung von IR-Expositionen

- Eingeschränkte Anwendbarkeit des *van-Krefeld'schen* Additivitätsgesetzes.
- Nichtanwendbarkeit des *Bunsen-Roscoe'schen* Gesetzes.
- Bezug der Dosierung bei *in vitro*-Experimenten auf die Absorption am Ort der zu untersuchenden Zellen im Gewebe (vgl. *Grotthus-Draper'sches* Gesetz).

(2) Eignung von Hauttemperatur und IR-Erythem als Basis von Grenzwerten mit Abhängigkeit vom Spektrum und von der Bestrahlungsstärke

- Beide Reaktionen bieten die Möglichkeit zur spektralen Differenzierung.
- Die Begrenzung der Bestrahlungsstärke kann gemäß therapeutischer Zielstellung nach definierten Bewertungskriterien erfolgen.

(3) Thermische Effekte der solaren IR-Strahlung

- Die Maximalbeträge der solaren IR-Bestrahlungsstärke an der Erdoberfläche in Meeresspiegelhöhe und bei wolkenlosem Himmel sind begrenzt auf:

$\leq 200 \text{ W m}^{-2}$ (in den gemäßigten Breiten), $\leq 350 \text{ W m}^{-2}$ (in den Tropen) und $\approx 411 \text{ W m}^{-2}$ (extraterrestrisch).

- Die maximal zu erwartenden Hauttemperaturen infolge solarer IR-Hautexpositionen rangieren nach ersten Abschätzungen bei Beträgen $\leq 37,0 - 39,5^\circ\text{C}$.
- Hautexpositionen mit solarer Strahlung können in der Bildung des *Regulativen IR-Erythems* resultieren, nicht aber in der Bildung des *Persistierenden IR-Erythems*. Notwendige Begrenzungen der Expositionszeit zum Schutz vor solarer UV-Hautschäden reduzieren den möglichen Effekt thermischer Wirkungen der Solarstrahlung wesentlich.
- Extrapolationen von IR-Effekten aus *in vitro*- oder *in vivo*-Expositionen auf Hautbestrahlungen mit solarer Strahlung ohne Anpassung der Dosierung und ohne Thermostatisierung auf die realen Bedingungen sind unbegründet. Realistische Bewertungen von IR-Effekten auf die Haut erfordern darüber hinaus die Einbeziehung von Regulationseffekten des Organismus *in vivo*.

(4) BUS-Experimente

- Erwärmungen der Haut bis auf 45°C und Hautbestrahlungen mit wIRA und inzidenten Bestrahlungsstärken bis zu 1900 W m^{-2} resultieren nicht in signifikanter Zytotoxizität und Entzündungsreaktion, sondern sind mit den Wirkungen üblicher Hautpflegeprodukte vergleichbar.
- Die Anwendung von wIRA mit großer Bestrahlungsstärke (1900 W m^{-2}):
 - verringert Bildung freier Radikale bei Hauttemperaturen $> 37^\circ\text{C}$ wesentlich und
 - erhöht das Antioxidative Potential (SAP) bei Hauttemperaturen $\geq 37^\circ\text{C}$.
- Die Erwärmung der Haut auf Temperaturen $> 37^\circ\text{C}$ verringert das Antioxidative Potential der Haut (SAP) und vergrößert Anzahl freier Radikale wesentlich.
- Die Effekte für wIRA bei veränderten Bestrahlungsstärken und Dosen, für solare IR-Strahlung (Bestrahlungsstärke $< 400 \text{ W m}^{-2}$) sowie für IR-C und für IR-A sind zu prüfen.

Dank

Wir danken der Dr. med. h.c. Erwin Braun Stiftung Basel für die Förderung der Untersuchungen. Herzlich gedankt sei auch Frau Dr. vetr. B. Blume, SIMRED Großburgwedel, für die Hilfe und Unterstützung bei der Durchführung der BUS-Experimente.

Literatur

- [1] Heckel, M. (1990: Ganzkörper-Hyperthermie und Fiebertherapie. Grundlagen und Praxis). Hippokrates Verlag, Stuttgart, Germany.
- [2] Vaupel, P. and W. Krüger (Eds) (1995): Wärmetherapie mit wassergefilterter Infrarot-A-Strahlung. 2nd Edition, Hippokrates Verlag, Stuttgart, Germany.
- [3] von Ardenne, M. (1997): Systemische Krebs-Mehrschritt-Therapie – Hyperthermie und Hyperglykämie als Therapiebasis. Grundlagen, Konzeption, Technik, Klinik. Hippokrates Verlag, Stuttgart, Germany.
- [4] Hoffmann, G. (2008): Klinische Anwendungen von wassergefiltertem Infrarot-A (wIRA).- Sechstes Symposium Licht und Gesundheit, 13.-14. März 2008 (H. Kaase und F. Se- rick, Hrsg.), 130-146, Druck: Paul Kistmacher, Berlin, ISBN 3-9807635-0-3.
- [5] Rzeznick, J. (1995): Die Technik zur loko-regionalen Wärmetherapie mit wassergefilterter Infrarot-A-Strahlung.- In: Wärmetherapie mit wassergefilterter Infrarot-A-Strahlung. Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten. (P. Vaupel und W. Krüger, Hrsg.), 29-46, Hippokrates-Verlag, Stuttgart, 1995.
- [6] Michael, M. (1926): Über Hitzewirkung auf die Haut und die Entstehung der *cutis marmo- rata pigmentosa* (Buschke-Eichhorn). -*Dermatol. Wochenschr.* 52, 1862-1877.
- [7] Schulze, H.J., R. Schmidt and G. Mahrle (1985): Das Infrarot-(IR)-Erythem. *Z. Hautkr.* 60, 938-944.
- [8] Sharad, P. and R. Marks (1977): The wages of warmth: Changes in *erythema ab igne*. *Br. J. Dermatol.* 97, 179-186.
- [9] Hewitt, J.B., A. Sherif, K.M. Kerr and L. Stankler (1993) Merkel cell and squamous cell carcinomas arising in *erythema ab igne*. *Br. J. Dermatol.* 128, 591-592.
- [10] Arrington, J.H. and D.S. Lockmann (1999): Thermal keratoses and squamous cell carci- noma in situ associated with *erythema ab igne*. -*Arch. Dermatol.* 115, 1226-1228.
- [11] Rudolph, CM, H.P. Soyer, P. Wolf and H. Kerl (2000): Squamous epithelial carcinoma in *erythema ab igne*. -*Hautarzt* 52, 260-263.
- [12] American conference of governmental industrial hygienists (2007): Documentation of the threshold limit values for physical agents. 7th Edition, ACGIH, Ohio.
- [13] Illuminating engineering society of North America (2005): Recommended practice for photobiological safety for lamps and lamp systems – general requirements. RP 27, IESNA, New York.
- [14] DIN 33403-3 (2001): Klima am Arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung – Teil 3: Beur- teilung des Klimas im Warm- und Hitzebereich auf der Grundlage ausgewählter Kli- masummenmaße. Beuth Verlag, Berlin Germany..

- [15] DIN 5031-10 (2000) *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, Teil 10: Photobiologisch wirksame Strahlung, Größen, Kurzzeichen und Wirkungsspektren*. Beuth Verlag, Berlin, Germany.
- [16] IEC 60825-1 (2007): *Safety of Laser products – Part 1: Equipment, classification, requirements and user's guide*. IEC, Geneva.
- [17] European Union (2006): Directive 2006/25/EC of the European Parliament and of the Council of 5 April 2006 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to risks arising from physical agents (artificial optical radiation). Official Journal of the European Union 49, L114/38-59.
- [18] TNO 12 F 1993: Nederlandse organisatie voor toegepast wetenschappelijk onderzoek. Report # 12 F 1993-AB. Calculations on threshold limit values for cataract.
- [19] TNO R88/445: Nederlandse organisatie voor toegepast wetenschappelijk onderzoek. Report R88/445. Behaaglijkheidscriteria bij de toepassing van IRK stralers.
- [20] Gezondheidsraad (1993): Report 19932/09E: Optical radiation – Health based exposure limits for electromagnetic radiation in the wavelength range from 100 nanometers to 1 millimetre. - Committee on Optical Radiation of the Health Council of the Netherlands, The Hague.
- [21] The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2006): ICNIRP statement on far infrared exposure. *Health Physics* 91, 630 – 645.
- [22] DIN 33403-2 (2000): Klima am Arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung - Teil 2: Einfluß des Klimas auf den Wärmehaushalt des Menschen. Beuth Verlag, Berlin, Germany.
- [23] Piazena, H. and D.K. Kelleher (2008): Comments on “Cellular response to infrared radiation involves retrograde mitochondrial signalling.”- *Free Radic. Biolog. Med.* 44 (2008) 1869.
- [24] Piazena, H. and D.K. Kelleher (2010): Effects of Infrared-A irradiation on skin: Discrepancies in published data highlight the need for an exact consideration of physical and photobiological laws and appropriate experimental settings.- *Photochem. Photobiol.* 286 (2010) 687-705.
- [25] Jung, T., A. Höhn, H. Piazena and T. Grune (2010): Effects of water-filtered infrared-A irradiation on human fibroblasts.- *Free Radic. Biolog. Med.* 48 (2010) 153-160.
- [26] Jung, T., A. Höhn, A.M. Lau, H. Piazena and T. Grune (2012): An experimental setup for the measurement of nonthermal effects during water-filtered Infrared-A irradiation of mammalian cell cultures.- *Photochem. Photobiol.* (23.1.2012) DOI: 101111/j.1751-1097.2011.01072.x.
- [27] Schieke, S.M., H. Stege, V. Kürten, S. Grether-Beck, H. Sies and J. Krutmann (2002): Infrared-A radiation-induced matrix metalloproteinase 1 expression is mediated

- through extracellular signal-regulated kinase 1/2 activation in human dermal fibroblasts. *J. Invest Dermatol.* 119, 1323-1329.
- [28] Schieke, S.M., P. Schroeder and J. Krutmann (2003): Cutaneous effects of infrared radiation: from clinical observations to molecular response mechanisms. *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.* 19, 228-234.
- [29] Schroeder, P., C.Pohl, C. Calles, C. Marks, S. Wild and J. Krutmann (2007) Cellular response to infrared radiation involves retrograde mitochondrial signalling.- *Free Radic. Biol. Med.* 43, 128-135.
- [30] Schroeder, P., J. Lademann, M.E. Darvin, H. Stege, C. Marks, S. Bruhnke and J. Krutmann (2008): Infrared radiation-induced matrix metalloproteinase in human skin: Implications for protection. *J. Invest. Dermatol.* 128, 2491-2497.
- [31] Schoeder, P., C. Calles, T. Benesova, F. Macauso and J. Krutmann (2010): Photoprotection beyond ultraviolet radiation – Effective sun protection has to include protection against Infrared-A radiation induces skin damage.- *Skin Pharmacol. Physiol.* 23 (2010) 15-17.
- [32] Danno, K., N. Mori, K. Toda, T. Kobayashi and A. Utani (2001): Near-infrared irradiation stimulates cutaneous wound repair: laboratory experiments on possible mechanisms. *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.* 17, 261-265.
- [33] Burri, N., N. Gebbers and L.A. Applegate (2004): Chronic infrared-A radiation repair: Implications in cellular senescence and extracellular matrix. *Recent Res. Devel. Photochem. Photobiol.* 7, 219-231.
- [34] Gebbers, N., N. Hirt-Burri, C. Scaletta, G. Hoffmann and L.A. Applegate (2007): Water-filtered infrared-A radiation (wIRA) is not implicated in cellular degeneration of human skin. *Ger. Med. Sci.* 5, Doc08.
- [35] Applegate, L.A., C. Scaletta, R. Panizzon, E. Frenk, P. Hohlfeld and S. Schwarzkopf (2000): Induction of the putative protective protein ferritin by infrared radiation: Implications in skin repair. *Int. J. Mol. Med.* 5, 247-251.
- [36] Frank, S., L. Oliver, C. Lebreton-De Coster, C. Moreau, M.-T. Lecabellec, L. Michel, F.M. Vallette, L. Dubertret and B. Coulomb (2004): Infrared radiation affects the mitochondrial pathway of apoptosis in human fibroblasts. *J. Invest. Dermatol.* 123, 823-831.
- [37] Frank, S., S. Menezes, C. Lebreton-De Coster, M. Oster, L. Dubertret and B. Coulomb (2006): Infrared radiation induces the p53 signaling pathway: role in infrared prevention of ultraviolet B toxicity. *Exp. Dermatol.* 15, 130-137.
- [38] Jantschitsch, C., S. Majewski, A. Maeda, T. Schwarz and A. Schwarz (2009): Infrared radiation confers resistance to UV-induced apoptosis via reduction of DNA damage and upregulation of antiapoptotic proteins. *J. Invest. Dermatol.* 129, 1271-1279.

- [39] Danno, K., T. Horio and S. Imamura (1992): Infrared radiation suppresses ultraviolet B-induced sunburn-cell formation. *Arch. Dermatol. Res.* 284, 92-94.
- [40] Menezes, S., B. Coulomb, C. Lebreton and L. Dubertret (1998): Non-coherent near infrared radiation protects normal human dermal fibroblasts from solar ultraviolet toxicity. *J. Invest. Dermatol.* 111, 629-633.
- [41] Meffert, H. (2008): Antioxidants - friend or foe? - *GMS German Medical Science* 6 (2008) ISSN 1612-3174, 1-2.
- [42] Sutter, E. (2002): Schutz vor optischer Strahlung: Laserstrahlung, inkohärente Strahlung, Sonnenstrahlung.- *Normenreihe DIN EN 60825 (VDE 0837)* (2nd Edition). VDE Verlag, Berlin, Germany.
- [43] Pittermann, W. (2000): *In vitro* skin and mucous membrane tests in the focus of cosmetics research.-www.gd-online.de/german/originals_d_dr/Pittermann2000_edr.htm.
- [44] Kietzmann, M., W. Löscher, D. Arens, P. Maas and D. Lubach (1993): The isolated perfused bovine udder as an *in vitro* model of percutaneous drug absorption. Skin viability and percutaneous absorption of dexamethasone, benzol peroxide, and etofenamate.- *J. Pharmacol. Toxol. Methods* 30 (1993) 75-84.
- [45] Herrling, T., K. Jung, J. Fuchs (2006): Measurements of UV-generated free radicals/reactive oxygen species (ROS) in skin.- *Spectrochim. Acta A Mol Biolmol Spectrosc.* 63 (2006) 840-845.
- [46] Herrling, T., K. Jung, E. Chatelain, M. Langenhauer (2006): Radical skin/sun protection factor (RSF) – Protection against UV-induced free radicals.- *SÖFW-Journal* 132 (2006) 24.
- [47] Jung, K., M. Sacher, G. Blume, F. Janssen and T. Herrling (2007): How active are bio-cosmetic ingredients.- *SÖFW-Journal* 133 (2007) 2.
- [48] Clark, C., R. Vinegar and J. Hardy. (1959): Goniometer spectrometer for the measurement of diffuse reflectance and transmittance of skin in the infrared spectral region. *J. Opt. Soc. Am.* 43, 993-998.
- [49] Jacquez, J.A., J. Huss, W. McKeehan, J.M. Dimitroff and H.F. Kuppenheim (1955): Spectral reflectance of human skin in the region 0.7 – 2.6 μ . *J. Appl. Physiol.* 8, 297-299.
- [50] Meffert, H., H. Piazena und G. Kolde (2008): Die Infrarot-Erytheme – Vom Infrarot-A- und Infrarot-C-Erythem zum *Erythema ab igne*.- *Akt. Dermatol.* 34 (2008) 119-123.

Vom UV-Schutz zum Lichtschutz?

Anforderungen an moderne Sonnenschutzmittel

J. Lademann, A. Patzelt, H.-J. Weigmann, S. Schanzer, M. Meinke, L. Zastrow
Charité - Universitätsmedizin Berlin, Bereich Hautphysiologie

Die ersten Sonnenschutzmittel enthielten ausschließlich UVB-Filter, um gegen Sonnenbrand zu schützen [1]. Seit etwa 10 Jahren ist jedoch bekannt, dass auch UVA-Strahlung für Hautschädigungen und vorzeitige Hautalterung verantwortlich ist [1, 2].

Die UV-Strahlung erzeugt freie Radikale in der Haut [3-5]. Übersteigt die Konzentration der freien Radikale einen kritischen Wert, so können diese hoch reaktiven Moleküle Zellen und Zellbestandteile zerstören. Daher werden sie für die Entstehung verschiedener Hauterkrankungen verantwortlich gemacht [6]. Darüber hinaus scheinen die freien Radikale durch Schädigung von DNA [7] sowie Kollagen- und Elastinfasern [8, 9] eine große Rolle beim Alterungsprozess zu spielen.

2009 konnten Zastrow et al. [5] zeigen, dass freie Radikale nicht nur im UV-Bereich, sondern auch im sichtbaren (VIS) und infraroten (IR) Spektralbereich der Sonnenstrahlung gebildet werden. Diese Ergebnisse konnten in der Zwischenzeit durch andere Forschungszentren bestätigt werden. Die Bildung von freien Radikalen im sichtbaren Spektralbereich ist verständlich, da die Energie der UV-Photonen ausreicht, um Radikale in der Haut zu bilden. Das ist jedoch im IR-Bereich nicht der Fall. Folglich muss es in der Haut biologische Systeme geben, die die Energie der IR-Photonen aufnehmen und ansammeln, bis die akkumulierte Energie eine Radikalbildung ermöglicht. Schroeder et al. [10] konnten zeigen, dass z. B. die Mitochondrien offensichtlich derartige Eigenschaften aufweisen. Damit ergibt sich die Frage, ob Sonnenschutzmittel nur einen UV-Schutz aufweisen oder ob ein Lichtschutz im gesamten Spektralbereich des Sonnenspektrums notwendig ist. Hierbei muss natürlich berücksichtigt werden, dass die Menge der freien Radikale, welche in den unterschiedlichen Spektralbereichen (UV, VIS, IR) gebildet werden, sich stark unterscheidet.

So werden nach Zastrow et al. [5] ca. 50% der freien Radikale im UV-Bereich, d. h. in einem relativ schmalen Spektralbereich von 280 nm bis 380 nm gebildet, während sich die Bildung der anderen Hälfte auf den relativ breiten sichtbaren und infraroten

Spektralbereich verteilt. Das bedeutet, dass breitbandige hoch effektive UV-Filtersubstanzen, wie sie in modernen Sonnenschutzmitteln heute Anwendung finden, auch in Zukunft eine entscheidende Bedeutung besitzen.

Auf der anderen Seite führen solche effektiven UV-Sonnenschutzmittel aber auch dazu, dass die Anwender das Gefühl haben, deutlich länger in der Sonne bleiben zu können, als wenn die Haut nicht geschützt wäre. Dadurch erhöht sich die Menge der freien Radikale deutlich, welche im VIS- und IR-Spektralbereich gebildet werden, wenn nicht auch hier ein effektiver Schutz vorliegt. Der Einsatz von absorbierenden Filtersubstanzen, ähnlich wie im UV-Bereich, ist speziell im sichtbaren Bereich nicht möglich, da es zu Farbänderungen der Haut nach Applikation des Sonnenschutzmittels kommen könnte, wenn nicht alle Längen gleichermaßen absorbiert werden, was technisch nur schwer zu realisieren ist. Daher muss man versuchen, besonders im VIS- und IR-Bereich Schutzmechanismen zu nutzen, wie sie die Haut selbst entwickelt hat.

Die Haut ist der Wirkung der freien Radikale nicht schutzlos ausgeliefert. Natürliche Schutzmechanismen sind zum Beispiel die Lichtschwiele [11], d. h. eine Verdickung der Hornhaut unter Sonneneinstrahlung oder eine erhöhte Melanogenese [11], die zu einer vermehrten Pigmentierung führt. Beide Prozesse führen dazu, dass Sonnenstrahlung verstärkt absorbiert, aber vor allem gestreut wird, so dass deutlich weniger Photonen tief in die Haut eindringen können.

Ein zweites Schutzsystem der Haut, welches im gesamten Spektralbereich des Sonnenspektrums wirkt, sind die Antioxidantien [12]. Diese Schutzsubstanzen, zu denen z. B. die Vitamine, die Karotinoide und einige Enzyme gehören, können freie Radikale neutralisieren noch bevor sie ihre schädigende Wirkung entfalten können. Die meisten Antioxidantien können vom menschlichen Organismus nicht selbst synthetisiert werden. Sie müssen mit der Nahrung, speziell über Obst und Gemüse aufgenommen oder topisch z. B. durch Sonnenschutzmittel appliziert werden. Die meisten modernen Sonnenschutzmittel enthalten Antioxidantiengemische mit einem hohen Radikalschutzfaktor (radical protection factor - RPF) [1], welche nicht nur die UV-Filter stabilisieren, sondern gleichzeitig im gesamten Spektralbereich, also auch im UV-VIS-Bereich schützen.

Eine weitere Verteidigungslinie gegenüber dem UV-VIS- und IR-Photonen stellen die Mikro- bzw. Nanopigmente dar, welche in fast allen kommerziellen Sonnenschutzmitteln mit hohen Lichtschutzfaktoren enthalten sind. Die Hauptvertreter sind hier

Titandioxid (TiO₂) und Zinkoxid (ZnO). Diese Pigmente absorbieren teilweise im UV-Bereich, wirken also zusätzlich als UV-Filter. Darüber hinaus weisen sie aber auch sehr gute Streueigenschaften auf. Sie wirken wie Minispiegel auf der Hautoberfläche und in den oberen Zellschichten der Hornschicht (Stratum corneum, SC). Sie reflektieren das Sonnenlicht bzw. verlängern die optische Weglänge der Photonen im oberen Teil des SC [1]. Die Wirkung ist ähnlich den Effekten der Lichtstreuung oder der Melaninbildung. Auch mit diesen Schutzmechanismen werden die Photonen, welche die Hautbarriere durchdringen können, stark reduziert.

Untersuchungen von Meinke et al. [1] haben gezeigt, dass sowohl der Einsatz von Antioxidantien als auch von Pigmenten einzeln, aber besonders in Kombination, wie es bei den modernen Sonnenschutzmitteln der Fall ist, einen wirksamen Schutz im IR-Bereich darstellen. Diese Untersuchungen erfordern den Einsatz von aufwändigen und teuren Messsystemen wie z. B. der Resonanz-Raman-Spektroskopie [13] zum Nachweis von Antioxidantien oder der Elektron-Spin-Resonanz-Spektroskopie [1] zum Nachweis der freien Radikale in der Haut. Die rasante Entwicklung auf dem Gebiet der Messtechnik lässt jedoch erwarten, dass in wenigen Jahren miniaturisierte kostengünstige Messsysteme zur Verfügung stehen werden, die einen breiten Einsatz bei der Produktentwicklung und Qualitätskontrolle ermöglichen.

Die breite Verfügbarkeit von derartigen Messsystemen ist auch deshalb notwendig, da in Zukunft neue Standards für die Bewertung von Sonnenschutzmitteln speziell auf ihre Wirkung im sichtbaren und infraroten Spektralbereich entwickelt werden müssen. Wenn man bedenkt, wie lange es gedauert hat, bis ein allgemein akzeptierter Standard für die Bewertung des UVA-Schutzes entwickelt wurde, so stellt die Bewertung des Schutzes im sichtbaren und infraroten Bereich eine besonders große Herausforderung dar. Es ist abzusehen, dass eine derartige Bewertung in einem breiten Spektralbereich nicht an die biologische Wirkung gekoppelt sein kann. Vielmehr müssen hier physikalische Prinzipien wie z. B. die Bestimmung eines universellen Lichtschutzfaktors [14] bzw. die Bildung von freien Radikalen als erster Schritt einer Schädigung zugrunde gelegt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich Sonnenschutz nicht nur auf den UV-Spektralbereich, sondern auch auf den sichtbaren und infraroten Spektralbereich der Sonnenstrahlung beziehen muss. Moderne Sonnenschutzmittel, welche effektive UVB- und UVA-Filtersubstanzen sowie Antioxidantien und Pigmente im

ausgewogenen Verhältnis enthalten, weisen einen guten Schutz im gesamten Spektralbereich der Sonnenstrahlung auf [1]. Es ist zu erwarten, dass die Entwicklung von neuen hoch effektiven und stabilen Antioxidantengemischen und Pigmentsystemen ein Schwerpunkt bei der künftigen Entwicklung und Optimierung von Sonnenschutzmitteln darstellt. Die Entwicklung von neuen Schutzkomponenten in Sonnenschutzmitteln ist immer eng mit der Entwicklung und Optimierung der dafür erforderlichen Formulierungen verbunden. Daher werden auch auf dem Gebiet der Galenik in Zukunft große Anstrengungen unternommen, damit Sonnenschutzmittel ein angenehmes und hautphysiologisches Empfinden bei den Anwendern erzeugen. Nur wenn die Anwender die Sonnenschutzmittel gern und in der erforderlichen Menge auf alle zu schützenden Hautareale applizieren, ist ein optimaler Schutz gewährleistet.

Literatur

- [1] M.C. Meinke, S.F. Haag, S. Schanzer, N. Groth, I. Gersonde, J. Lademann, Radical protection by sunscreens in the infrared spectral range, *Photochem Photobiol*, 87 (2011) 452-456.
- [2] S.Q. Wang, U. Osterwalder, K. Jung, Ex vivo evaluation of radical sun protection factor in popular sunscreens with antioxidants, *J Am Acad Dermatol*, 65 (2011) 525-530.
- [3] M.E. Darvin, S. Haag, M. Meinke, L. Zastrow, W. Sterry, J. Lademann, Radical production by infrared A irradiation in human tissue, *Skin Pharmacol Physiol*, 23 (2010) 40-46.
- [4] M.E. Darvin, S.F. Haag, J. Lademann, L. Zastrow, W. Sterry, M.C. Meinke, Formation of free radicals in human skin during irradiation with infrared light, *J Invest Dermatol*, 130 (2010) 629-631.
- [5] L. Zastrow, N. Groth, F. Klein, D. Kockott, J. Lademann, R. Renneberg, L. Ferrero, The missing link--light-induced (280-1,600 nm) free radical formation in human skin, *Skin Pharmacol Physiol*, 22 (2009) 31-44.
- [6] D.R. Bickers, M. Athar, Oxidative stress in the pathogenesis of skin disease, *J Invest Dermatol*, 126 (2006) 2565-2575.
- [7] R. Adelman, R.L. Saul, B.N. Ames, Oxidative damage to DNA: relation to species metabolic rate and life span, *Proc Natl Acad Sci U S A*, 85 (1988) 2706-2708.
- [8] Y. Kawaguchi, H. Tanaka, T. Okada, H. Konishi, M. Takahashi, M. Ito, J. Asai, Effect of reactive oxygen species on the elastin mRNA expression in cultured human dermal fibroblasts, *Free Radic Biol Med*, 23 (1997) 162-165.
- [9] J.C. Monboisse, G. Poulin, P. Braquet, A. Randoux, C. Ferradini, J.P. Borel, Effect of oxy radicals on several types of collagen, *Int J Tissue React*, 6 (1984) 385-390.

- [10] P. Schroeder, J. Lademann, M.E. Darvin, H. Stege, C. Marks, S. Bruhnke, J. Krutmann, Infrared radiation-induced matrix metalloproteinase in human skin: implications for protection, *J Invest Dermatol*, 128 (2008) 2491-2497.
- [11] J.U. Grundmann, H. Gollnick, [Prevention of ultraviolet ray damage: external and internal sunscreens], *Ther Umsch*, 56 (1999) 225-232.
- [12] M. Darvin, L. Zastrow, W. Sterry, J. Lademann, Effect of supplemented and topically applied antioxidant substances on human tissue, *Skin Pharmacol Physiol*, 19 (2006) 238-247.
- [13] M.E. Darvin, I. Gersonde, H. Albrecht, M. Meinke, W. Sterry, J. Lademann, Non-invasive in vivo detection of the carotenoid antioxidant substance lycopene in the human skin using the resonance Raman spectroscopy, *Laser Phys Lett*, 3 (2006) 460-463.
- [14] H.J. Weigmann, S. Schanzer, A. Teichmann, F. Durat, C. Antoniou, H. Schaefer, W. Sterry, J. Lademann, Ex-vivo spectroscopic quantification of sunscreen efficacy: proposal of a universal sun protection factor, *J Biomed Opt*, 12 (2007) 044013.

Lichtwirkungen am Tag - Feldstudie in Industriebetrieben

Karin Bieske, Cornelia Vandahl, Christoph Schierz

Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik PF 100 565, 98684, Ilmenau

1 Einleitung

Für die Beurteilung der Lichtqualität von Beleuchtungssystemen müssen sowohl visuelle Kriterien als auch biologische Lichtwirkungen berücksichtigt werden. Da sich biologische Lichtwirkungen sowohl in Quantität, Spektrum, räumlicher Verteilung, in Zeitpunkt und Dauer grundlegend von der visuellen Lichtwirkung unterscheiden, sind unterschiedliche Bewertungen und Festlegungen für beide Aspekte erforderlich.

Die aktivierende Wirkung von Licht hat großes Potenzial für die Beleuchtungspraxis. Leider ist dies die – insbesondere am Tage – am wenigsten untersuchte biologische Lichtwirkung. Auch die Stabilität der inneren Uhr dürfte in einer Zeit unregelmäßiger Arbeits- und Freizeitaktivitäten stärker variieren als früher. Über die sinnvolle Anwendung der Erkenntnisse zu biologischen Lichtwirkungen am Arbeitsplatz ist derzeit sehr wenig bekannt. Im Blickpunkt der durchgeführten Studie stand daher der Einfluss unterschiedlicher Beleuchtungsszenarien an Industriearbeitsplätzen am Tage auf Wohlbefinden, Schlafqualität und Akzeptanz der Mitarbeiter. Schwerpunkte dafür waren der Einfluss des Spektrums, der Lichtverteilung und dynamischer Lichtfarbenvariationen. Die Studie erfolgte mit 41 Probanden an fünf Standorten im Zeitraum von September 2010 bis April 2011.

Im Ergebnis zeigt sich, dass die untersuchten Beleuchtungsszenarien von den Probanden mehrheitlich akzeptiert wurden. Probleme traten mit den untersuchten Flächenleuchten dort auf, wo störende Blendung oder Reflexe auftraten oder die Integration der Flächenleuchte am Arbeitsplatz schwierig war. Die Untersuchungsergebnisse sprechen nicht gegen den Einsatz von Lampen hoher ähnlichster Farbtemperatur an Arbeitsplätzen. Die veränderte Beleuchtung führte teilweise zu höherer Aktivierung am Tag und zu positiven Einflüssen auf den Schlaf. Details sind in [1] zu finden.

2 Grundlagen

Der Studie liegen folgende Überlegungen zugrunde:

- Licht hat beim Menschen Einfluss auf wesentliche biologische Prozesse und kann die subjektiv empfundene Munterkeit steigern [2]. Es ist daher zu vermuten, dass in dunklen Industriehallen höhere Beleuchtungsstärken am Auge die Aktiviertheit und das Wohlbefinden erhöhen können.
- Die biologische Wirksamkeit wird bestimmt durch die Lichtmenge, die von den 2001 neu entdeckten lichtempfindlichen Ganglienzellen in der Netzhaut absorbiert wird. Wesentliche Einflussgrößen sind neben der Beleuchtungsstärke, die spektrale Zusammensetzung des Lichts und damit die Lichtfarbe, die örtliche Lichtverteilung, der Zeitpunkt der Beleuchtung sowie das Alter des Menschen.
- Aufgrund der spektralen Empfindlichkeit der lichtempfindlichen melanopsinhalten Ganglienzellen [3, 4], die für die biologische Lichtwirkung verantwortlich gemacht werden, ist zu vermuten, dass Lichtfarben mit höherer ähnlichster Farbtemperatur auch am Tage eine größere biologische Lichtwirkung besitzen als wärmere Lichtfarben bei gleicher Beleuchtungsstärke am Auge.
- Da die melanopsinhalten Ganglienzellen in der Fovea nicht vorkommen, sondern in der Peripherie der Netzhaut verteilt sind, ist zu erwarten, dass große leuchtende Flächen, die einen großen Bereich der Netzhaut ausleuchten, eine größere Wirkung erzielen als eine Beleuchtung, die nur punktuell Netzhautareale reizt [5]. Das bedeutet damit auch, dass nicht nur die Beleuchtung im Bereich der Sehaufgabe wesentlich ist, sondern Licht in der Peripherie eine wichtige Bedeutung für biologische Lichtwirkungen hat.
- Da mit zunehmendem Alter die Linse im Auge vergilbt und sich damit die spektralen Transmissionseigenschaften des Auges ändern ist anzunehmen, dass der Lichtbedarf mit dem Alter zunimmt, um die gleiche Wirkung wie in jüngeren Jahren zu erzielen [6, 7].
- Vergleichende Untersuchungen zwischen einer Beleuchtung mit statischem Beleuchtungsniveau und einer Beleuchtung, die phasenweise zwischen hohen und niedrigen Beleuchtungsniveaus schwankt, zeigen, dass mit sich ändernden Reizen während einer Zeitdauer ähnliche Wirkungen erzielt werden konnten wie mit statischen Reizen hohen Beleuchtungsniveaus [8, 9, 10]. Das könnte ein Hinweis darauf sein, dass mit einer sich im Tagesverlauf ändernden Lichtfarbe größere

Effekte erzielt werden können als mit einer konstanten Lichtfarbe während des Tages.

Vor dem Hintergrund dieser Erkenntnisse wurde ein Versuchskonzept für ein Feldexperiment entworfen, um das Potential der aktivierenden und stabilisierenden Wirkung des Lichtes am Tage unter realen Arbeitsbedingungen zu untersuchen.

3 Methode und Versuchsdesign

Für die Untersuchung wurden solche Arbeitsplätze ausgewählt, an denen typische Montage- und Reparaturarbeiten durchgeführt werden, an denen wenig Tageslicht vorhanden ist und wo die dort tätigen Mitarbeiter vorwiegend in einem abgegrenzten Arbeitsplatzbereich und in Tagschichten beschäftigt sind. Ziel war es, sowohl Frauen und Männer, ältere und jüngere Beschäftigte mit einem Umfang von 40 Probanden in die Studie einzubeziehen. Da dies nicht innerhalb eines Unternehmens gegeben war, wurde die Untersuchung an fünf Standorten durchgeführt. Beteiligt waren 41 Probanden im Alter zwischen 21 und 61 Jahren, darunter 18 Frauen. Da zu erwarten ist, dass Lichtwirkungen am Tag während der lichtärmeren Jahreszeiten deutlicher in Erscheinung treten, wurde die Studie im Zeitraum von September 2010 bis April 2011 durchgeführt.

3.1 Beleuchtungssituationen

Aufgrund der unterschiedlichen Gegebenheiten an den einzelnen Arbeitsplätzen war es nicht möglich, einheitliche Beleuchtungsverhältnisse an den Arbeitsplätzen für die einzelnen Versuchsszenarien zu schaffen. Betrachtet werden daher in dieser Studie die Änderungen bezüglich der vorgefundenen Beleuchtungsverhältnisse (Situation S1: Ist-Situation). Die Realisierung der unterschiedlichen Beleuchtungsszenarien erfolgte in Ergänzung zur bestehenden Beleuchtungsanlage an den Arbeitsplätzen mit Flächenleuchten und durch Einbau von Lampen anderer Lichtfarbe in die vorhandenen Leuchten. Als Flächenleuchten wurden Leuchten der Firma Philips *SmartForm TBS473* mit einer leuchtenden Fläche von 55,5 cm x 55,5 cm verwendet. Sie sind für sechs T5 Leuchtstofflampen ausgelegt und verfügen über elektronische Vorschaltgeräte mit DALI-Schnittstelle. Die Abschlusscheibe ist in OLC-Microlinsenoptik für die Lichtmischung realisiert. Verwendet wurden je Leuchte zwei Lampen *Phillips Master T5 HO 827 24 W (CCT = 2700 K)* und vier Lampen *Phillips Master T5 HO Activiva Natural 24 W (CCT = 8000 K)*. Für die Leuchten können Helligkeit und Lichtfarbe definiert werden. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass Leuchtdichten von 2000 cd/m² auf den

Flächenleuchten toleriert werden ohne Blendung zu verursachen. Für die Feldversuche wurden Flächenleuchten mit mittleren Leuchtdichten von $L = 1500 \text{ cd/m}^2$ eingesetzt. In einzelnen Fällen traten jedoch Blendprobleme auf, sodass die Helligkeit der Flächenleuchte an diesen Arbeitsplätzen auf Leuchtdichten von $L = 1000 \text{ cd/m}^2$ oder $L = 750 \text{ cd/m}^2$ reduziert wurden.

Um den Einfluss von großen leuchtenden Flächen im Gesichtsfeld zu untersuchen, wurde die Situation S2: Flächenleuchte im Vorfeld/seitlich entworfen. Je nach Gegebenheiten an den Arbeitsplätzen wurden zusätzliche Flächenleuchten direkt vor dem Arbeitsplatz installiert oder seitlich zum Arbeitsplatz aufgestellt (Bild 1). In Voruntersuchungen konnten vergleichbare Bestrahlungsverhältnisse für beide Aufstellvarianten der Flächenleuchten im Arbeitsbereich nachgewiesen werden. Für einen Vergleich zwischen Leuchten mit statischer Lichtfarbe und Leuchten mit dynamischer Lichtfarbenvariation dienen die Situationen S2 und S3. Situation S4 wurde für die Bewertung des Einflusses der Lichtfarbe im Vergleich zur Ausgangssituation S1 konzipiert. Dafür wurden T8-Lampen vom Typ *skywhite* ($CCT = 8000 \text{ K}$) mit entsprechender Leistung und Farbwiedergabe verwendet.

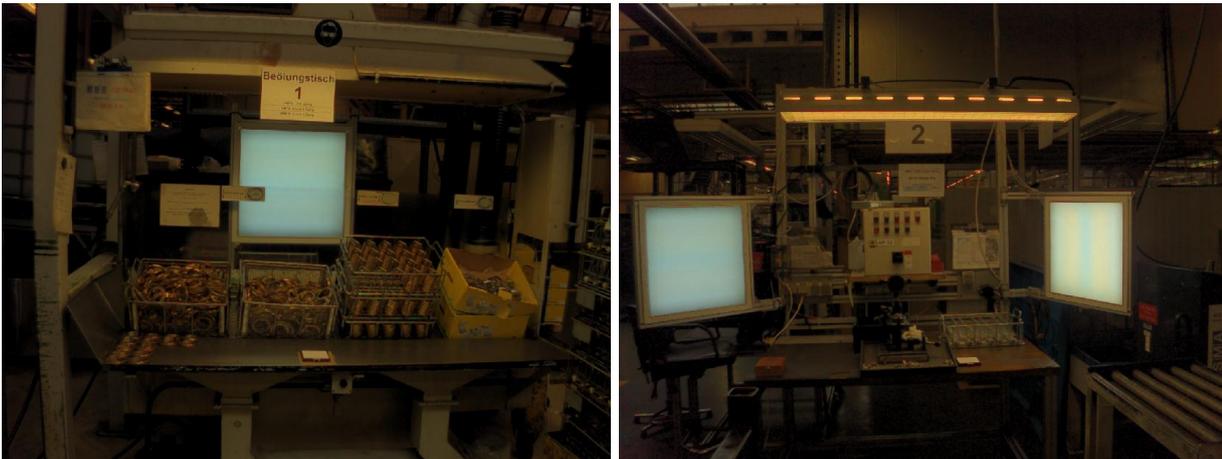


Bild 1: Beispiele für installierte Flächenleuchten im Vorfeld und seitlich zum Arbeitsplatz

Für den Nachweis der Validität der Ergebnisse wurde zum Abschluss der Studie die Ausgangssituation wiederholt betrachtet (Situation S5). Jede Versuchssituation wurde über einen Zeitraum von mindestens vier Wochen untersucht. Einen Überblick und eine Beschreibung über die untersuchten Beleuchtungsszenarien gibt nachfolgende Tabelle 1.

3.2 Messtechnische Erfassung

Zur Beschreibung der Beleuchtungsverhältnisse dienten photometrische Messungen mit einem Spektralradiometer und örtlich aufgelöster Messtechnik an den Arbeitsplätzen. Gemessen wurden an den Arbeitsplätzen die horizontale Beleuchtungsstärke E_h auf der Arbeitsebene, die vertikale Beleuchtungsstärke E_v in Augenhöhe (1,6 m), die Beleuchtungsstärke E_{45° in Augenhöhe unter einem Blick von 45° nach unten zur Arbeitsebene, die ähnlichste Farbtemperatur CCT auf der Arbeitsebene. Weiterhin wurden die entsprechenden mit der $s_{ms}(\lambda)$ -Funktion bewerteten Bestrahlungsstärken E_{ms} nach Gleichung (1) bestimmt. Die $s_{ms}(\lambda)$ -Funktion beschreibt die Wirkfunktion für die biologische Lichtwirkung nach DIN V 5031 Teil 100 [8].

$$\text{Gleichung (1):} \quad X_{s_{ms}} = \int X_{e\lambda}(\lambda) \cdot s_{ms}(\lambda) d\lambda$$

Tabelle 2: Messdaten (Mittelwert und Standardabweichung) für die einzelnen Untersuchungssituationen (S3_1: zu Schichtbeginn/ S3_2: zu Schichtende, veränderte Lichtfarbe während der Schicht in Situation S3)

Situation	S1	S2	S3_1	S3_2	S4	S5
E_h in lx	1006 +/- 570	1118 +/- 551	1118 +/- 551	1041 +/- 561	1142 +/- 584	1090 +/- 475
E_v in lx	360 +/- 298	551 +/- 309	551 +/- 309	492 +/- 295	404 +/- 318	395 +/- 277
E_{45° in lx	129 +/- 71	218 +/- 88	218 +/- 88	205 +/- 90	152 +/- 76	137 +/- 60

Situation	S1	S2	S3_1	S3_2	S4	S5
CCT in K	4006 +/- 504	4207 +/- 507	4207 +/- 507	3898 +/- 438	6322 +/- 465	4002 +/- 494

Situation	S1	S2	S3_1	S3_2	S4	S5
E_{ms_h} in W/m ²	0,76 +/- 0,48	0,86 +/- 0,43	0,86 +/- 0,43	0,71 +/- 0,44	1,37 +/- 0,77	0,82 +/- 0,42
E_{ms_v} in W/m ²	0,26 +/- 0,22	0,53 +/- 0,27	0,53 +/- 0,27	0,30 +/- 0,21	0,49 +/- 0,41	0,28 +/- 0,20
$E_{ms_{45^\circ}}$ in W/m ²	0,09 +/- 0,05	0,19 +/- 0,10	0,19 +/- 0,10	0,12 +/- 0,06	0,16 +/- 0,09	0,09 +/- 0,04
$E_{ms_h}/E_{ms_h S1}$	1,00	1,13	1,13	0,93	1,80	1,08
$E_{ms_v}/E_{ms_v S1}$	1,00	2,04	2,04	1,15	1,88	1,08
$E_{ms_{45^\circ}}/E_{ms_{45^\circ} S1}$	1,00	2,11	2,11	1,33	1,78	1,00

Tabelle 2 fasst die Messwerte für die einzelnen Versuchsszenarien zusammen. Es zeigt sich eine große Streuung zwischen den Arbeitsplätzen. Trotz unterschiedlicher Auslegung der Beleuchtung war die horizontale Beleuchtungsstärke E_h während allen Beleuchtungssituationen ähnlich. Durch den Einsatz der Flächenleuchten erhöhte sich die vertikale Beleuchtungsstärke E_v in den Beleuchtungssituationen S2 und S3 im Vergleich

zu S1/S4/S5 um etwa den Faktor 1,5. Auch die E_{45° -Werte waren entsprechend höher. Die mit der $s_{ms}(\lambda)$ -Funktion bewerteten Bestrahlungsstärken E_{ms} in der Horizontalen waren in der Beleuchtungssituation S4 deutlich erhöht, während in den anderen Beleuchtungssituationen die Werte denen in Situation S1 ähnelten. Die E_{ms} -Werte für die Vertikale und unter einem Blick von 45° zur Arbeitsebene wurden durch die Flächenleuchten mit hoher Farbtemperatur um einen Faktor von bis zu 2,1 im Vergleich zur Beleuchtungssituation S1 angehoben.

3.3 Befragung

Der Einfluss ausgewählter Beleuchtungsszenarien auf Wohlbefinden, Schlafqualität und Akzeptanz der Mitarbeiter wurde mittels Fragebögen erfasst.

Zu Beginn des Feldexperiments wurden die Probanden über die geplante Studie informiert. Dabei wurden die einzelnen Versuchsszenarien vorgestellt, auf die durchzuführenden Messungen eingegangen und die Fragebögen im Detail besprochen. Von jedem Probanden wurden allgemeine Angaben erfasst. Zum Ende jeder Arbeitswoche beantworteten die Probanden Fragen zum Befinden, Freizeit- und Schlafverhalten und zur Bewertung der Beleuchtung. Um einen Überblick über eine vergleichende Bewertung zwischen den Versuchsszenarien zu gewinnen, wurde am Ende des Feldexperiments ein Abschlussfragebogen eingesetzt. Die Schwerpunkte der Fragebögen enthält Tabelle 3.

Die erhobenen 23968 Daten aus 749 Fragebögen wurden mittels der Statistiksoftware SPSS 19.0 analysiert. An der Abschlussbefragung beteiligten sich 36 Probanden.

Da durch einen Aufenthalt bei natürlichem Tageslicht zu vermuten ist, dass die Lichtwirkung wesentlich mit beeinflusst wird, wurde neben der Aufenthaltsdauer im Freien die Wettersituation an den Arbeitsorten mit Höchsttemperaturen, Sonnenstunden und Niederschlag erfasst und für eine Einschätzung der Wetterbedingungen für die Arbeitswochen und das Wochenende herangezogen.

Tabelle 3: Inhaltliche Schwerpunkte der Fragebögen (Details in [1])

Fragebogen zur Person

- Geschlecht
- Alter
- Sehhilfe (Brille/ Kontaktlinsen)
- Chronotyp

Allgemeine Angaben

- Schicht und Arbeitstage
- Aufenthalt im Freien
- Fragen zum Befinden

Fragebogen zum Schlafverhalten

- Schlafenszeit
- Ein- und Aufstehzeit
- Schlafdauer
- Einschlafprobleme
- Schlafunterbrechungen
- Frischegefühl am Morgen
- Schlafqualität
- Schlafmittelkonsum
- Besonderheiten

Fragebogen zur Beleuchtung

- Helligkeit
- Blendung
- Lichtfarbe
- Störempfinden
- Gefallen
- Einfluss auf Befinden

Abschlussfragebogen

- Bewertung der einzelnen Versuchsszenarien im Vergleich
- Einfluss der Beleuchtung auf Befinden und Schlaf
- Beleuchtungssituation mit größtem Wohlbefinden
- Wunschbeleuchtungssituation
- Anmerkungen

4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Abschlussbefragung sind in Bild 2 Zusammengefasst. Bei der Abschlussbefragung gaben 6 (17%) von 36 Befragten an, dass sie bewusst einen Einfluss der Lichtqualität auf ihr Wohlbefinden, ihre Aktiviertheit und ihre Schlafqualität während der verschiedenen Beleuchtungssituationen wahrgenommen haben. Auf die Frage, unter welcher der erlebten Lichtsituationen sich die Probanden am wohlsten gefühlt haben, wurde die Versuchsszene S4 am häufigsten genannt. Diese Lichtsituation würden die Probanden auch für ihre Arbeitssituation bevorzugen.

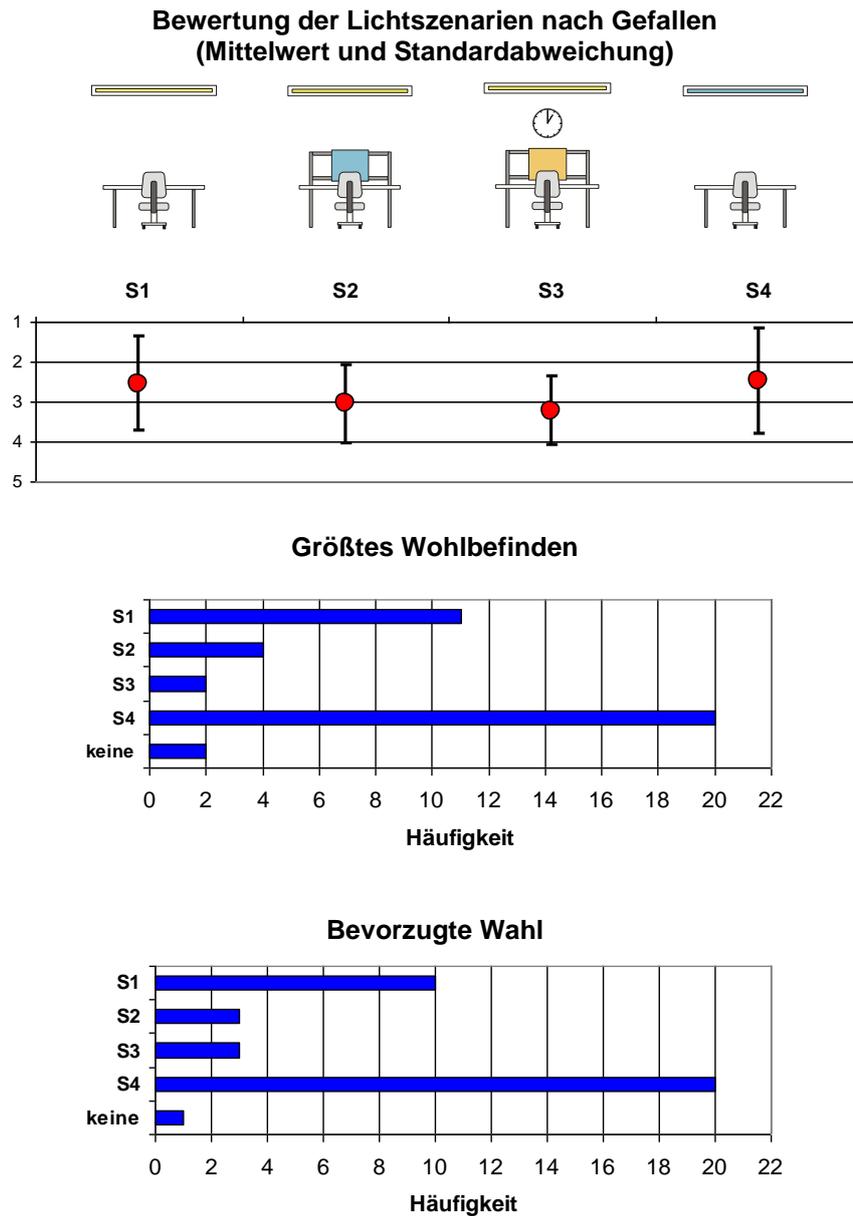
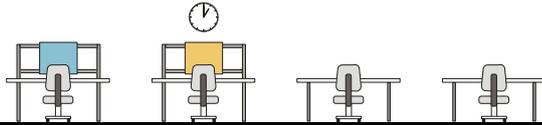


Bild 2: Bewertung der Lichtszenarien im Abschlussfragebogen (N = 36), für Gefallen, die Nennung des größten Wohlbefindens und der bevorzugten Wahl (Mehrfachnennungen waren möglich)

Die statistische Auswertung der Fragebögen ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Ergebnisse der Befragung - Vergleich zur Ausgangssituation S1



Variable	S2	S3	S4	S5
Gefallen	o	o	+	+
Förderung der Aufmerksamkeit	o	o	+	+
Aktivierung (Belebung)	+	o	+	+
Aktivierung (Aufmuntern)	o	o	+	o
ausreichende Helligkeit	o	o	+	(+)
heller Raumeindruck	+	+	+	+
Belästigung	-	(-)	o	o
Auffälligkeit	-	o	o	+
Aufdringlichkeit	-	o	o	o
Blendung	(-)	o	o	o
Gefallen der Lichtfarbe	o	o	o	o
störende Farbunterschiede	(-)	-	o	-
Variable	S2	S3	S4	S5
aktiv fühlen	(-)	+	o	+
Schwierigkeiten wach zu bleiben	(+)	+	+	+
fehlender Schwung	(+)	+	o	(+)
Variable	S2	S3	S4	S5
Bettgezeit	früher	früher	o	früher
Einschlafdauer	(+)	o	o	o
Aufstehzeit	o	o	o	o
Schlafdauer	o	o	o	o
Einschlafprobleme	o	(+)	+	+
Durchschlafprobleme	o	o	o	o
Erholungseffekt	o	o	o	o
Schlafqualität	o	+	o	+
Schlafmittel	o	+	o	(+)

Legende:

Symbol	Signifikanzniveau
+	signifikant besser als S1 bewertet ($p \leq 0,05$)
(+)	im Trend besser als S1 bewertet ($0,05 < p < 0,1$)
o	kein Unterschied in der Bewertung zu S1 ($p > 0,1$)
(-)	im Trend schlechter als S1 bewertet ($0,05 < p < 0,1$)
-	signifikant schlechter als S1 bewertet ($p \leq 0,05$)
früher	signifikant früher als bei S1 ($p \leq 0,05$)

Auch in der Auswertung der wöchentlichen Fragebögen wird die Beleuchtung S4 im Arbeitsbereich, mit Lichtfarben hoher ähnlichster Farbtemperatur, von den Probanden positiv wahrgenommen. Im Vergleich zur Ausgangssituation geben die Probanden an, dass ihnen die Beleuchtung besser gefällt und sie diese als heller empfinden. Situation S4 fördert stärker die Aufmerksamkeit, belebt und muntert stärker auf als Situation S1. Störende Effekte werden nicht genannt. Die Flächenleuchten im Vorfeld (S2, S3) fördern einen hellen Raumeindruck. Beim Einsatz von Flächenleuchten mit hohen ähnlichsten Farbtemperaturen wird eine Aktivierung wahrgenommen. Flächenleuchten im Vorfeld werden jedoch zum Teil störend empfunden und können Blendung verursachen. Dies wird besonders bei Flächenleuchten mit kalter Lichtfarbe angegeben (S2). Problematisch sind in diesem Zusammenhang Kombinationen unterschiedlicher Lichtfarben innerhalb eines Arbeitsbereiches. Von den Probanden wurden zum Teil störende Farbunterschiede genannt. Während der unterschiedlichen Beleuchtungssituationen fühlten sich die Probanden mehrheitlich aktiver und weniger müde als in der Ausgangssituation S1. Weiterhin zeigen sich im Vergleich zur Ausgangssituation S1 zum Teil positive Effekte auf den Schlaf bezüglich der Einschlafproblematik und der Schlafqualität.

Für den Vergleich statischer und dynamischer Beleuchtung wurden die Situationen S2 (zusätzliche Flächenleuchte im Vorfeld mit einer Lichtfarbe von statisch 8000 K) und S3 (zusätzliche Flächenleuchte im Vorfeld bei der sich die Lichtfarbe vom Schichtbeginn zum Schichtende von 8000 K zu 3000 K kontinuierlich ändert) betrachtet. Bei dynamischer Beleuchtung wurden eine signifikant höhere Aktivierung und eine bessere Schlafqualität angegeben. Im Vergleich zur statischen Vorfeldbeleuchtung (S2) war die dynamische Beleuchtung (S3) weniger störend und blendend.

Bezüglich des Alters wurde die Probandengruppe in Jüngere (< 45 Jahre) und Ältere (≥ 45 Jahre) eingeteilt. Der Vergleich beider Gruppen zeigte zwar signifikante Unterschiede, jedoch dürften diese eher mit sozialen Faktoren zu tun haben. Die unterschiedlichen Beleuchtungssituationen üben nur einen geringen Einfluss aus und es konnte kein signifikanter Alterseinfluss bezüglich der Beleuchtung nachgewiesen werden. Von den unterschiedlichen Beleuchtungsszenarien profitierten eher die jüngeren Probanden.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die untersuchten Beleuchtungsszenarien wurden mehrheitlich von den Probanden akzeptiert. Probleme gab es dort, wo Blendung oder Reflexe die Sehaufgabe stören, zu

unterschiedliche Lichtfarben in einem Arbeitsbereich kombiniert werden oder die Integration der Flächenleuchte am Arbeitsplatz schwierig ist. Unter realen Bedingungen sind Flächenleuchten mit Leuchtdichten von $L_{FL} = 1500 \text{ cd/m}^2$ unter Umständen zu hell und können subjektiv als störend oder blendend empfunden werden. Dies wurde besonders bei Flächenleuchten mit Lichtfarben mit hoher ähnlichster Lichtfarbe beobachtet. Die in der Voruntersuchung bestimmte Toleranzleuchtdichte von Flächenleuchten im Vorfeld von $L_{FL} = 2000 \text{ cd/m}^2$ ist in realen Situationen offensichtlich zu hoch. Hier ist besonders der Einfluss des unmittelbaren Umfeldes des Arbeitsplatzes zu betrachten, da in Fensternähe deutlich größere Leuchtdichten aus Fensterbereichen problemlos akzeptiert werden.

Problematisch bei der Interpretation der Ergebnisse der Studie ist, dass positive Wirkungen auch bei der Zweitbefragung der Ausgangssituation während der Situation S5 von den Probanden wahrgenommen wurden, obwohl mehrheitlich identische Beleuchtungsverhältnisse an den Arbeitsplätzen im Vergleich zur Situation S1 vorlagen. Möglicherweise zeigen sich hier Einflüsse durch die Feldstudie selbst (Hawthorne-Effekt) oder durch den Befragungszeitpunkt im Herbst oder Frühjahr. Damit ist es schwierig, aus den Ergebnissen der Studie konkrete Vorgaben abzuleiten. Weiter Untersuchungen sollten weitere erfolgen. Jedoch sprechen die Untersuchungsergebnisse nicht gegen einen Einsatz von Lampen mit hoher ähnlichster Farbtemperatur an Arbeitsplätzen. Sie können positive Auswirkungen auf Befinden und Schlafqualität haben. Zusätzliche hell leuchtende Flächen im Vorfeld sind nur bedingt zu empfehlen. Zu große Unterschiede in der Helligkeit und in der Lichtfarbe sollten vermieden werden.

Danksagung

Das Projekt wurde von der Berufsgenossenschaft Holz und Metall initiiert, finanziert und begleitet. Die Firmen Osram, Philips, Siteco, Trilux und Tridonic unterstützten die Realisierung der Beleuchtungssituationen. Ein besonderer Dank gilt den Unternehmen Ford-Werke GmbH in Köln, H. Heinz Messwiderstände GmbH in Elgersburg, IL Metronic Sensortechnik GmbH in Ilmenau, MEG Mechanik GmbH in Gießübel und Thyssen-Krupp Steel AG in Duisburg, die die Durchführung des Feldexperiments in ihren Abteilungen ermöglichten und den 41 Probanden, die sich an der Untersuchung beteiligten.

Literatur

- [1] Bieske K, Vandahl C, Schierz C: Projekt „Licht und Gesundheit“ - Feldstudie in Industriebetrieben. Abschlussbericht, TU Ilmenau 2011. www.tu-ilmenau.de/lichttechnik unter Publikationen 2011
- [2] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Über das Auge vermittelte, nichtvisuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen - Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren. DIN V5031 Teil 100, Berlin: Beuth Verlag, Juni 2009.
- [3] BRAINARD GC, HANIFIN JP, GREESON JM, BYRNE B, GLICKMAN G, GERNER E, ROLLAG MD: *Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor*. Journal of Neuroscience 2001; 21 (16): 6405-6412.
- [4] THAPAN K, ARENDT J, SKENE DJ: An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. Journal of Physiology 2001; 535 (1): 261-267.
- [5] DACEY DM ET ALL: Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN. Letters to nature 2005; **433** (2): 749-754.
- [6] LERMAN S: *Radiant Energy and the eye*. Macmillan Publishing Co. Inc. New York: 1980, Fig. 3.1
- [7] SCHIERZ C: *Lighting for the elderly: physiological basics and their consequences*. In: Tagungsband-LUX EUROPA 2009. Istanbul: 2009, 147-154
- [8] GRONFIER C, WRIGHT KP, KRONAUER RE, JEWETT ME, CZEISLER CA: *Efficacy of a single sequence of intermittent bright light pulses for delaying circadian phase in humans*. American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism 2004; **287** (1): E174-E181.
- [9] BAEHR EK, FOGG LF, EASTMAN CI: *Intermittent bright light and exercise to entrain human circadian rhythms to night work*. American Journal of Physiology-Regulatory Integrative and Comparative Physiology 1999; **277** (6): R1598-R1604.
- [10] RIMMER DW, BOIVIN DB, SHANAHAN TL, KRONAUER RE, DUFFY JF, CZEISLER CA: *Dynamic resetting of the human circadian pacemaker by intermittent bright light*. American Journal of Physiology-Regulatory Integrative and Comparative Physiology 2000; **279** (5): R1574-R1579.

Blue Light for Pain Therapy

Prof. Dr. Matthias Born

Philips Technologie GmbH Innovative Technologies

Zentrum für Biomedizintechnik (ZBMT), Pauwelsstr. 17, 52074 Aachen

Abstract

Light – and specifically blue light – plays a fundamental role in many biological and physiological processes in humans. By understanding how light acts, and leveraging its expertise in LED and textile technology, Philips has created a unique platform for a host of effective light-based therapies. The first of these is the BlueTouch® Pain Relief Patch offering a new treatment modality for the many pain sufferers around the world that are looking for effective and safe solutions beyond pain killers.

BlueTouch® consists of LEDs, mounted on textile inside a flexible, comfortable and wearable pad, allowing close-to-skin/body application. The LEDs deliver narrow-band irradiation around 453 nm to induce production of Nitric Oxide (NO) in the skin. NO is proven to trigger a number of protective and preventive processes in the body, helping to heal in a natural manner. It relaxes muscles through improved blood circulation, resulting in pain relief. Therefore, the primary action mechanism is through light induced NO stimulation; heat related to absorption/transport is secondary, enhancing the pain-relief effect.

Philips is looking to extend this approach to treat many other skin and systemic conditions. Examples of potential applications include a blanket for treating jaundice in newborns, and home treatment of psoriasis.

Wassergefiltertes Infrarot A (wIRA) in Chirurgie und Dermatologie

Gerd Hoffmann

Johann Wolfgang Goethe-Universität, Institut für Sportwissenschaften,
Ginnheimer Landstraße 39, 60487 Frankfurt am Main

Wassergefiltertes Infrarot A (wIRA) stellt eine spezielle Form der Infrarotstrahlung im Bereich von 780–1400 nm dar, die aufgrund ihrer sehr guten Verträglichkeit in der Medizin zur Prävention und Therapie verwendet wird. *wIRA steigert Temperatur, Sauerstoffpartialdruck und Durchblutung im Gewebe. wIRA mindert indicationsübergreifend Schmerzen, Entzündung und vermehrte Sekretion und verbessert die Infektabwehr und Regeneration* [40].

wIRA hat in den letzten 20 Jahren eine deutliche Verbreitung in der Medizin gefunden. So wird wIRA z. B. in 1045 (ca. 28%) von 3767 erfassten dermatologischen Praxen oder Versorgungszentren in Deutschland genutzt (Stand: Februar 2012). wIRA-Strahler werden auch bei Patienten zu Hause eingesetzt [40, 78, 32].

1 Wirkprinzipien

Die Erfahrung der angenehmen Wärme der Sonne in gemäßigten Klimazonen – anders als in der Wüste – entsteht durch die *Filterung der Infrarotstrahlung der Sonne durch Wasser und Wasserdampf in der Erdatmosphäre* (Abb. 1) [40, 38, 33, 32, 39, 36, 34, 21, 12].

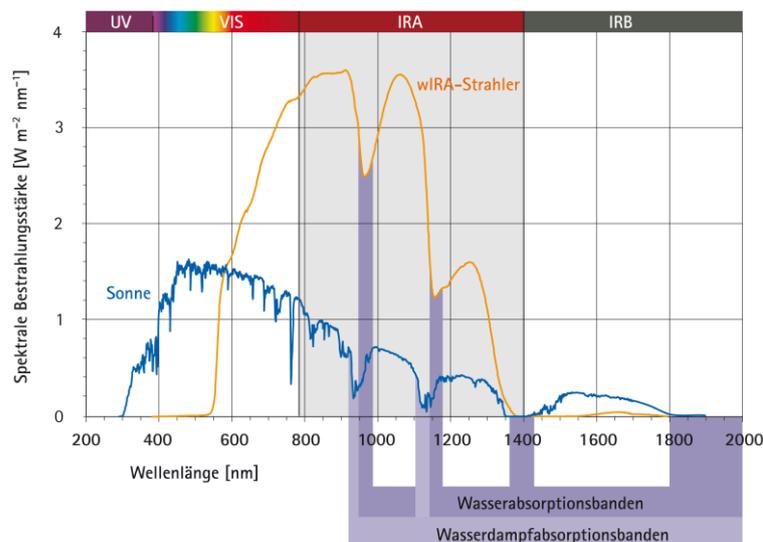


Abb. 1: Vergleich der Spektren eines wassergefilterten Infrarot-A-Strahlers und der Sonne bei wolkenlosem Himmel am Mittag in Meeresspiegelhöhe in den Subtropen. (Mit freundlicher Genehmigung von Dr. Helmut Piazena, Charité – Universitätsmedizin Berlin) (aus [40])

Durch die *Wasserfilterung* werden die Strahlungsanteile gemindert (sog. Wasserabsorptionsbanden innerhalb des Infrarot A sowie die meisten Teile des Infrarot B und C), die sonst durch Wechselwirkung mit Wassermolekülen in der Haut eine unerwünschte thermische Belastung der obersten Hautschicht hervorrufen würden [40, 38, 33, 32, 36, 34, 21, 12].

Technisch wird wassergefiltertes Infrarot A (wIRA) in speziellen Strahlern erzeugt, in denen die gesamte inkohärente, nicht polarisierte Breitbandstrahlung einer 3000-Kelvin-Halogenlampe durch eine Wasser enthaltende Küvette hindurchtritt, sodass die genannten unerwünschten Strahlungsanteile innerhalb des Infrarot gemindert oder herausgefiltert werden (Abb. 2) [40, 38, 36, 33, 77]. Innerhalb des Infrarots stellt das verbleibende wassergefilterte Infrarot A (im Bereich 780–1400 nm) vorwiegend Strahlung mit gutem Eindringvermögen in das Gewebe dar und erlaubt gegenüber ungefilterter Infrarotstrahlung konventioneller Infrarotlampen

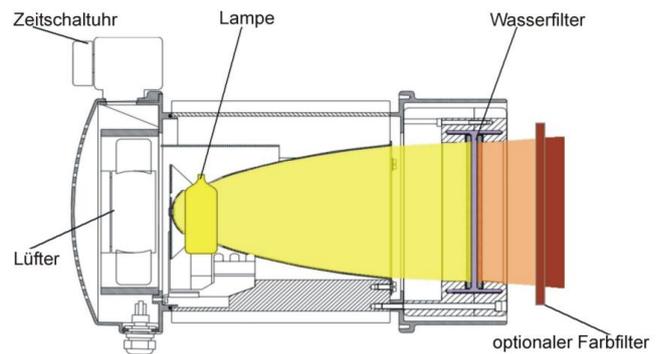


Abb. 2: Querschnitt eines wassergefilterten Infrarot-A-Strahlers. (aus [38])

mit einem großen Anteil an Infrarot B (1400–3000 nm) und C (≥ 3000 nm) einen mehrfachen Energieeintrag in das Gewebe, ohne die Haut zu belasten, vergleichbar mit der Sonnenwärmestrahlung in gemäßigten Klimazonen [40, 33, 74].

Typische wIRA-Strahler emittieren keine UV-Strahlung und nahezu keine Infrarot-B- und Infrarot-C-Strahlung, der Anteil der Infrarot-A-Strahlung ist im Verhältnis zum Anteil des sichtbaren Lichts (380–780 nm) betont [40, 38, 33, 77]. Das sichtbare Licht hängt vom verwendeten Farbfilter ab [40, 38]. Die Wasserfilterung wird bei typischen wIRA-Einzelstrahlern mit einer Wasserschichtdicke von 4 mm [77], 7 mm (am häufigsten verwendet) oder 10 mm erreicht; höhere Wasserschichtdicken mindern besonders stark die Bestrahlungsstärke im Bereich 1200–1400 nm (bei 10 mm gegenüber 4 mm nahezu Halbierung der Bestrahlungsstärke in diesem Bereich) sowie im Bereich der Wasserabsorptionsbanden und erhöhen die Verträglichkeit von wIRA [40].

Innerhalb des Spektrums von Infrarot-A- und wassergefilterter Infrarot-A-Strahlung wurden Effekte insbesondere von den energiereichen Wellenlängen nahe des sichtbaren Lichts – ungefähr 780–1000 nm (800–900 nm [2, 3, 4], 800 nm [16], 820 nm [54, 55, 53], 830 nm [11]) – sowohl *in vitro* als auch *in vivo* beschrieben; diese Wellenlängen scheinen, v. a. im

Hinblick auf nicht thermische Effekte, den klinisch wichtigsten Teil von Infrarot A und wIRA darzustellen [40, 38, 33, 24].

wIRA als spezielle Form der Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung) mit hohem Eindringvermögen in das Gewebe bei geringer thermischer Oberflächenbelastung wirkt sowohl über *thermische* (auf Wärmeenergie transfer bezogene) *und temperaturabhängige* (mit Temperaturänderung auftretende) als auch über *nicht thermische* (ohne relevanten Wärmeenergie transfer) *und temperaturunabhängige* (ohne relevante Temperaturänderung auftretende) *Effekte* [40, 38, 36, 33].

wIRA erzeugt ein therapeutisch nutzbares Wärmefeld im Gewebe durch Erreichen hautoberflächennaher Kapillarbereiche durch die Infrarot-A-Strahlung (Primärerwärmung), Wärmeabtransport durch das Blut (Wärmeverschleppung von hautoberflächennahen Gewebereichen in die Tiefe), Erhöhung der oberflächlichen Kapillardurchblutung mit Ausweitung der der Strahlung zugänglichen Durchblutungsbereiche (hierdurch verstärkte Wärmeverschleppung), Gewebewärmeleitung in die Tiefe sowie sekundäre Energiefreisetzung durch Stoffwechselanregung (Stoffwechselsteigerung) infolge Temperatursteigerung (gemäß der Reaktionsgeschwindigkeits-Temperatur-(RGT-)Regel bedeuten z. B. 3°C mehr Temperatur ca. 30 % mehr Reaktionsgeschwindigkeit und damit mehr Energiebereitstellung im Gewebe) bei relativ hoher primärer Tiefenwirksamkeit von wIRA [40, 32]. wIRA steigert die Temperatur [40, 38, 33, 32, 26, 80, 79, 81, 66, 65, 71, 29] (z. B. oberflächlich von 32,5°C um fast 6°C auf 38,2°C [65], in 2 cm Gewebetiefe um 2,7°C [26]) und den Sauerstoffpartialdruck im Gewebe [40, 38, 33, 32, 26] (in 2 cm Gewebetiefe um ca. 30 % [26]) sowie die Gewebedurchblutung [40, 38, 33, 32, 65, 71, 29] (oberflächlich ca. Verachtfachung [65], Steigerung in bis ca. 5 cm Tiefe nachweisbar [29]). Dies sind 3 entscheidende Faktoren für eine ausreichende Versorgung des Gewebes mit Energie und Sauerstoff [40, 38, 33, 32]. Demgegenüber steigert z. B. die technisch wesentlich aufwändigere hyperbare Oxygenierung (HBO), die ebenfalls zur Wundheilungsverbesserung eingesetzt wird [10, 9, 30], nur den Sauerstoffpartialdruck [33], während die Gewebetemperatur weitgehend unverändert bleibt (bzw. wegen des vasokonstriktiven Effekts des Sauerstoffs eventuell etwas absinkt) und die Gewebedurchblutung durch den vasokonstriktiven Effekt des Sauerstoffs sogar vermindert wird.

Zahlreiche Leistungen des menschlichen Körpers wie generell Regenerations- und Heilungsprozesse, z. B. Wundheilung und Infektionsabwehr (insbesondere Granulozytenfunktion, einschließlich ihrer antibakteriellen Sauerstoffradikalbildung), hängen entscheidend von einer *ausreichenden Versorgung mit Energie und Sauerstoff* und damit von der Integrität von Temperatur, Sauerstoffpartialdruck und Durchblutung des Gewebes ab [40, 38,

33, 32]. Das Zentrum chronischer Wunden ist aber häufig relativ hypotherm [40, 38, 33, 26, 66] und hat häufig einen Sauerstoffpartialdruck nahe Null [40, 38, 33, 26, 66, 57, 59, 69, 30, 10, 9, 41, 87, 58, 46]. Deshalb kann z. B. sowohl präoperative [63] als auch postoperative [26, 75] Wärmezufuhr zum Operationsgebiet die Wundheilung von Operationswunden verbessern. Die Verbesserung sowohl der Energiebereitstellung pro Zeit (Steigerung der Stoffwechselleistung) als auch der Sauerstoffversorgung stellt einen Teil der Erklärung für die klinisch gute Wirkung von wIRA, z. B. auf Wunden und Wundinfektionen wie auch auf die Regeneration, dar [40, 38, 33].

Zusätzlich hat wIRA *nicht thermische* und ohne relevante Temperaturänderung auftretende *Effekte*, die darauf beruhen, direkte Reize auf Zellen und zelluläre Strukturen zu setzen [40, 38, 33]: Reaktionen der Zellen auf Infrarot – auch z. T. bei sehr kleinen Bestrahlungsintensitäten – sind z. B. zielgerichtetes Plasmodienwachstum [2], Beeinflussung der Cytochrom-c-Oxidase [51, 52, 50, 54, 48, 49], zielgerichtetes Wachstum von Neuronen [16], Stimulation der Wundheilung [14, 44] sowie zellschützende Effekte von Infrarot A [64, 19, 20, 13] und wassergefiltertem Infrarot A (wIRA) [5, 8, 42].

Die *Cytochrom-c-Oxidase* in den Mitochondrien wird dabei als universeller Photoakzeptor für Strahlung zwischen ca. 600–1000 nm, also für rote und infrarote Strahlung, angesehen, mit Absorptionsmaxima bei 620, 680, 760 und 825 nm [51, 52, 50] – entsprechend 4 detailliert beschreibbaren Chromophoren der Cytochrom-c-Oxidase. Dabei kann die Cytochrom-c-Oxidase bei Absorption von Strahlung verschiedene Signalkaskaden auslösen und hat damit eine weit über die Energiebereitstellung hinausreichende regelnde Funktion [51, 52]. Der gesamte Bereich von ca. 600–1000 nm, einschließlich der genannten Wellenlängen, ist bei typischen wIRA-Strahlern, die sichtbares Licht und wIRA abgeben, mit hoher spektraler Bestrahlungsstärke vertreten [40].

Der Anfangsschritt der Signalkaskaden kann in einer Dissoziation von Stickoxid (NO) vom katalytischen Zentrum der Cytochrom-c-Oxidase oder in einer Mehrproduktion von Adenosintriphosphat (ATP) aufgrund der Einwirkung von roter oder infraroter Strahlung im genannten Bereich bestehen [51, 40]. Elektronenanregung durch Licht und Infrarot beschleunigt Redoxprozesse und vermutlich die zeitkritische Reaktion des Elektronentransfers (zwischen Häm-a und dem Häm-a₃-Cu_B-Paar) innerhalb der Cytochrom-c-Oxidase, indem entsprechende Strahlung mehr Elektronen für die Reduktion von Sauerstoff am katalytischen Zentrum der Cytochrom-c-Oxidase (Häm-a₃-Cu_B-Zentrum) verfügbar macht [52, 40].

ATP wird dabei neben seiner Rolle als Energieträger in der Zelle aus neuerer Sicht auch als interzelluläres Signalmolekül angesehen, was die Vielseitigkeit der Effekte niederener-

getischer Strahlung wie rotem Licht und Infrarot A erklären kann [51, 40]. Dazu gehört auch die Steigerung der Mitochondrienfunktion über eine Erhöhung der intrazellulären Kalziumkonzentration sowie das Triggern von Schutzfunktionen [52, 40].

Die Photosensitivität einiger Enzyme der mitochondrialen Atmungskette wie der Cytochrom-c-Oxidase kann dabei als Adaptation lebender Systeme an Photonen als natürlichem externem Faktor angesehen werden [50, 40]. Eine mögliche physiologische Bedeutung, z. B. bei Exposition gegenüber orange-rotem Licht, wurde dem bereits 1981 zugemessen [56, 50, 40]. Typische wIRA-Einzelstrahler haben eine orange-rote Filterung im sichtbaren Bereich [33, 40].

Die *Schmerzminderung* durch wIRA wird sowohl über thermische als auch nicht thermische Wirkungen erklärt [40, 36]: Eine gesteigerte Durchblutung erlaubt eine bessere Elimination akkumulierter Metabolite wie Schmerzmediatoren, Laktat und Bakterientoxine und steigert zusammen mit der erhöhten Gewebetemperatur den Stoffwechsel (verbesserte Regeneration und Metabolisierung akkumulierter Stoffe) [40, 36]. Nicht thermische Effekte beinhalten direkte Wirkungen auf Zellen und möglicherweise auch auf Nozizeptoren [40, 26, 27, 36]. wIRA kann außerdem über seine deutlich muskelentspannende Wirkung schmerzmindernd wirken [40, 36]. Eine Schmerzminderung [72] bewirkt – neben einer Verbesserung der Lebensqualität – auch eine Erhöhung des Sauerstoffpartialdrucks [1, 26, 27] und senkt damit deutlich das Infektionsrisiko [40, 43, 26, 27, 36].

Außerdem wirkt vermutlich eine Bestrahlung mit sichtbarem Licht (»visible light«, VIS) und wIRA in Verbindung mit endogenem Protoporphyrin IX (oder Protoporphyrin IX von Bakterien) quasi wie eine milde photodynamische Therapie (PDT; *endogener PDT-ähnlicher Effekt*) [40, 38, 84, 35]. Dies kann die Zellregeneration und Wundheilung fördern (alte oder vorgeschädigte Zellen gehen in die Apoptose und werden durch neue Zellen ersetzt) und antibakteriell/antiinfektiv wirken (mögliche wIRA-bedingte Verstärkung der von Ganz et al. [22] und Hamblin et al. [25] beschriebenen Photoinaktivierung von Bakterien durch sichtbares Licht oder photoaktivierte Desinfektion in der Zahnheilkunde, bei der eine photosensibilisierende Substanz aufgetragen wird) [40, 38, 84, 35].

Einen wesentlichen Anteil an der antiinfektiven – antibakteriellen und antiviralen – Wirkung von wIRA dürfte die Verbesserung der körpereigenen Abwehr durch Steigerung von Temperatur, Sauerstoffpartialdruck und Durchblutung des Gewebes und der damit verbesserten Energie- und Sauerstoffbereitstellung für die körpereigene Abwehr haben [40, 21], also ein indirekter wIRA-Effekt, kombiniert mit nicht thermischen, direkten wIRA-Effekten (z. B. auf immunkompetente Zellen), sodass eine immunmodulatorische Wirkung und eine bessere lokale Immunkompetenz resultieren [40, 21].

So wird die erfolgreiche Therapie von (virusbedingten) vulgären Warzen, die typischerweise an eher hypothermen Körperstellen (Fingern/Händen, Zehen/Füßen) auftreten, durch wIRA (in Kombination mit Keratolyse und Kürettage) – neben denkbarer Inaktivierung thermolabiler Viren – in dieser Weise erklärt [40, 21]. Auch verminderte (bakterielle) Wundinfektionsraten nach abdominalen Operationen [26, 38, 40] und eine verminderte Kolonisation mit physiologischer Hautflora bei experimentellen Wunden unter wIRA(+VIS) [27, 38, 40] können über die Verbesserung der körpereigenen Abwehr und der lokalen Immunkompetenz erklärt werden.

Die *Entzündungsminderung* (z. B. bei Wunden) durch wIRA kann – vergleichbar mit der oben erläuterten Schmerzminderung – sowohl über thermische als auch nicht thermische Wirkungen erklärt werden [38, 40]. Auch die *Verbesserung der Regeneration* durch wIRA kann sowohl über thermische als auch nicht thermische Wirkungen erklärt werden [34, 40]. Die *Minderung vermehrter Sekretion* (z. B. Wundsekretion, bronchiale Sekretion) durch wIRA ist über nicht thermische, direkte Wirkungen auf Zellen zu erklären [38, 40].

Im Sinne des probabilistischen Ansatzes moderner Physik [86, 76] kann wassergefiltertes Infrarot A als Photonen- oder Quantenstrom bei adäquater Bestrahlungsstärke dazu beitragen, ein erwünschterweise thermodynamisch instabiles, komplexes biologisches System aufrechtzuerhalten [33, 40]: auf der makroskopischen Ebene vorwiegend über thermische (energieübertragungsbezogene) und temperaturabhängige Effekte (Steigerung von Temperatur, Sauerstoffpartialdruck und Durchblutung des Gewebes) [38, 26, 40] und auf der mikroskopischen/molekularen Ebene sowohl über nicht thermische und nicht temperaturabhängige als auch über thermische und temperaturabhängige Effekte auf Zellen und Zellstrukturen [33, 40].

2 Allgemeine Aspekte bei klinischen Anwendungen

wIRA steigert *Temperatur, Sauerstoffpartialdruck und Durchblutung* im Gewebe [40, 38, 33, 32]. Wesentliche klinische Wirkungen von wIRA sind – indikationsübergreifend – eine Minderung von *Schmerzen, Entzündung und Sekretion* sowie eine Verbesserung der *Infektabwehr* und der *Regeneration* [40, 38, 33, 32, 34].

wIRA kann grundsätzlich immer dann in Erwägung gezogen werden, wenn klinisch eine tiefenwirksame Wärmeapplikation (mit hoher Leistungsdichtetoleranz und hohem Energiefluss ins Gewebe) erwünscht/indiziert ist oder wenn pathogenetisch mindestens ein Faktor (Temperatur, Sauerstoffpartialdruck, Durchblutung im Gewebe) gestört oder suboptimal ist oder ein Symptom (z. B. Schmerz, Entzündung, Hypersekretion, Infektion, Regenerationsbedarf) vorliegt, das durch die thermischen und nicht thermischen Effekte von wIRA positiv

beeinflusst werden kann [40, 34, 32]. Dabei können selbst ungestört »normal« ablaufende Vorgänge wie eine Regeneration nach sportlicher Belastung oder ein normaler Wundheilungsprozess durch wIRA noch verbessert werden [40, 34, 38, 33, 32, 26, 31]. Entsprechend breit sind die klinischen Anwendungsmöglichkeiten von wIRA [40, 34].

wIRA ist ein kontaktfreies, verbrauchsmaterialfreies, leicht anzuwendendes, (selbst bei Wunden) als angenehm empfundenes Verfahren mit guter Tiefenwirkung und anhaltendem Wärmedepot [40, 38, 33, 32]. wIRA ist kreislaufschonend (verglichen mit warmem Vollbad), sauber (verglichen mit Fango), bei verschiedensten Lagerungen einsetzbar und benötigt keine Fixierung (verglichen mit warmem Wickel) [40, 33, 32]. wIRA bietet Bewegungsfreiheit, eine simultane Kombination mit Bewegung ist möglich [40, 33, 32, 67]. wIRA ist v. a. durch Variation des Bestrahlungsabstands und damit der Bestrahlungsstärke (sowie über die Zeit) sehr gut dosierbar [40, 33, 32].

wIRA kann lokal/körperregionbezogen (lokoregional) oder auch systemisch auf den gesamten Körper wirkend (Ganzkörperhyperthermie) eingesetzt werden [40, 33, 32]. wIRA wird wesentlich häufiger lokoregional als systemisch eingesetzt, entsprechend geht dieser Beitrag nur auf die lokoregionale Anwendung ein. (Zur Ganzkörperhyperthermie siehe Hoffmann 2012 [40].)

Die Bestrahlung der typischerweise unbedeckten Haut oder Wunde erfolgt senkrecht zur Haut mit einem wIRA-Strahler (Abb. 3), und zwar täglich ein- bis zweimal über 20–30 min oder auch deutlich länger (mehrere Stunden pro Tag) mit moderater, als angenehm empfundener Bestrahlungsstärke (typischerweise 60–120 mW/cm² wIRA bzw. 80–160 mW/cm² wIRA und sichtbares Licht (VIS)) [40, 36, 33, 24, 32]. Wenn es dem Patienten zu warm wird, ist rechtzeitig der Abstand etwas zu vergrößern, d. h. die Bestrahlungsstärke zu verringern [40, 36, 33, 32].

Spezielle Vorsicht ist geboten, d. h. ein größerer Bestrahlungsabstand und eine geringere Bestrahlungsstärke sind zu wählen, bei Patienten mit gestörtem Sensorium (z. B. diabetischer Polyneuropathie) oder gestörter Rückäußerungsfähigkeit, bei schlecht



Abb. 3: Beispiel für die Bestrahlung einer Wunde mit einem wassergefilterten Infrarot-A-Strahler. (aus [66])

durchblutetem Gewebe, bei kaltem Gewebe oder geringem Unterhautgewebe (z. B. Schienbeinkante) [40, 36, 33, 32]. Es sollte lieber zeitlich extensiv mit moderater Bestrahlungsstärke als kürzer mit höherer Bestrahlungsstärke mit wIRA bestrahlt werden. wIRA geht nicht in relevantem Maß durch blickdichte Kleidung oder Verbände [40, 33, 32].

Für wIRA mit angemessenen therapeutischen Bestrahlungsstärken und -dosen konnte nicht nur gezeigt werden, dass es für menschliche Haut unbedenklich ist [40, 33, 32, 24, 5, 8, 47], sondern auch, dass es zellschützende Effekte gegen UV-bedingte Schäden hat [40, 33, 32, 64, 19, 20, 13, 5, 8, 42]. *Sicherheitsaspekte* der klinischen Anwendung von wIRA werden ausführlich von Hoffmann [33] und Gebbers et al. [24] beschrieben. Sowohl aufgrund dieser Ausführungen wie auch insbesondere unter Berücksichtigung der Veröffentlichungen von Jung et al. [47], der umfangreichen Übersichtsarbeit von Piazena und Kelleher [73], einer Pressemitteilung der AWMF [68] und langjähriger klinischer Erfahrungen mit wIRA ist die Anwendung von wIRA mit adäquaten Bestrahlungsstärken als sicher anzusehen [40, 38]. Da sich der Mensch unter dem Einfluss der wassergefilterten Infrarotstrahlung der Sonne in der Evolution entwickelt hat [40, 77, 32], kann zudem – v. a. im Hinblick auf nicht thermische Effekte – wIRA als naturnahes Verfahren angesehen werden, im Gegensatz z. B. zur Radiofrequenzhyperthermie.

3 Wunden

wIRA kann die Heilung akuter und chronischer Wunden, einschließlich infizierter Wunden, sowohl über thermische und temperaturabhängige als auch über nicht thermische und temperaturunabhängige Effekte beschleunigen oder bei stagnierender Wundheilung ermöglichen [40, 38, 33, 26]. Selbst der normale Wundheilungsprozess kann verbessert werden [40, 38, 33, 26]. wIRA vermag Schmerzen deutlich zu mindern (mit bemerkenswert niedrigerem Analgetikabedarf) und eine erhöhte Wundsekretion und Entzündung herabzusetzen sowie infektionsmindernd zu wirken [40, 38, 33, 26].

wIRA kann generell – mit Ausnahme oder besonderen Vorsichtskautelen bei arterieller Verschlusskrankheit – für die Therapie von akuten [27] und chronischen [84] Wunden empfohlen werden [40, 38]. Aufgrund von 6 klinischen Studien sind die folgenden Wirkungen mit *Evidenzgrad Ia/Ib* belegt [40, 33, 38, 37, 39, 26, 27]: akute Schmerzminderung während einer wIRA-Bestrahlung, Minderung der erforderlichen Schmerzmittelmenge, größere/schnellere Wundflächenreduktion, bessere Gesamteinschätzung der Wundheilung, bessere Gesamteinschätzung des Effekts der Therapie (Schmerzen, Wundheilung, Kosmetik), höherer Gewebesauerstoffpartialdruck während wIRA, höhere subkutane Gewebetemperatur während wIRA und besserer kosmetischer Aspekt. Als Trend

wurden außerdem gefunden [40, 33, 38, 37, 26, 27]: niedrigere Wundinfektionsrate und kürzerer Krankenhausaufenthalt. Weitere klinische Beobachtungen sind [40, 33, 38, 37]: Entzündungsminderung und Hypersekretionsminderung.

3.1 Akute Wunden

3.1.1 Akute Operationswunden (Studie Heidelberg)

Eine prospektive, randomisierte, kontrollierte, doppelblinde Studie mit 111 Patienten nach großen abdominalen Operationen in der Klinik für Chirurgie der Universitätsklinik Heidelberg zeigte mit 20 min Bestrahlung 2-mal am Tag (beginnend am zweiten postoperativen Tag) in der Gruppe wIRA(+VIS) mit wIRA und sichtbarem Licht (ungefähr 75 % wIRA, 25 % VIS) verglichen mit der Kontrollgruppe mit nur VIS eine *signifikante und relevante Schmerzminderung verbunden mit einer deutlich verminderten erforderlichen Analgetikadosis*: Während 230 einzelner Bestrahlungen mit wIRA(+VIS) nahm der Schmerz ausnahmslos ab (der Median der Schmerzminderung an den postoperativen Tagen 2–6 betrug 13,4 auf einer 100 mm visuellen Analogskala, VAS 0–100), während der Schmerz in der Kontrollgruppe unverändert blieb ($p < 0,000001$) (Abb. 4) [40, 38, 27, 26]. Der Median der Schmerzminderung am dritten postoperativen Tag betrug 18,5 gegenüber 0,0; die mediane Differenz zwischen den Gruppen 18,4 (99 %-Konfidenzintervall 12,3/21,0) mit $p < 0,000001$ [40, 38, 27, 26].

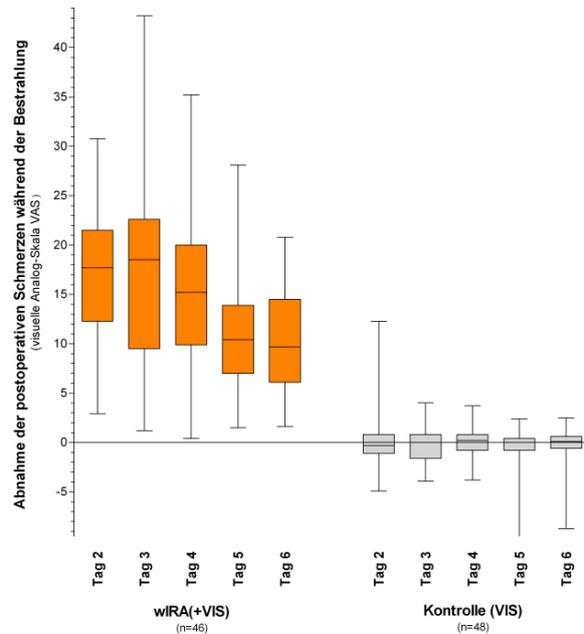


Abb. 4: Abnahme der postoperativen Schmerzen während Bestrahlung in der Gruppe mit wassergefiltertem Infrarot A (wIRA) und sichtbarem Licht (VIS) und in der Kontrollgruppe mit nur sichtbarem Licht (VIS) (Studie Heidelberg). (aus [38])

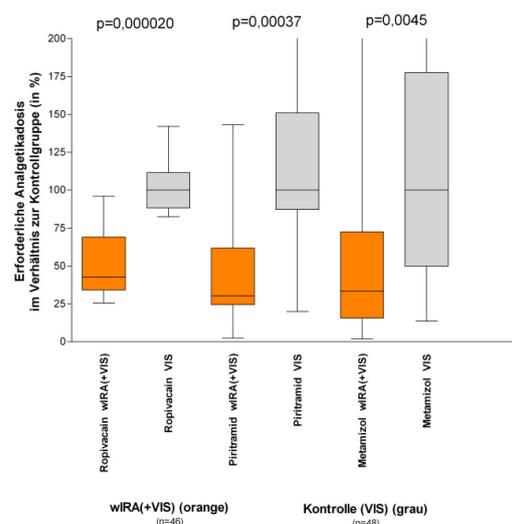


Abb. 5: Erforderliche Analgetikadosis in den Untergruppen mit wassergefiltertem Infrarot A (wIRA) und sichtbarem Licht (VIS) im Verhältnis zu den Kontrolluntergruppen nur mit sichtbarem Licht (VIS; Mediane der Kontrolluntergruppen = 100) (Studie Heidelberg). (aus [38])

Die erforderliche Analgetikadosis war in den Untergruppen mit wIRA(+VIS) um 52–69 % niedriger (mediane Differenzen) im Vergleich zu den Kontrolluntergruppen nur mit VIS (Median 598 ml gegenüber 1398 ml Ropivacain, $p=0,000020$, für Periduralkatheteranalgesie; 31 mg gegenüber 102 mg Piritramid, $p=0,00037$, für patientenkontrollierte Analgesie; 3,4 g gegenüber 10,2 g Metamizol, $p=0,0045$, für intravenöse und orale Analgesie) (Abb. 5) [40, 38, 27, 26].

Während der Bestrahlung mit wIRA(+VIS) stieg der subkutane Sauerstoffpartialdruck wesentlich um 32 % (Abb. 6) und die subkutane Temperatur um $2,7^{\circ}\text{C}$ (Abb. 7) an (beides in 2 cm Gewebetiefe), während beide Werte in der Kontrollgruppe unverändert blieben [40, 38, 27, 26]. Nach Bestrahlung lag der Median des subkutanen Sauerstoffpartialdrucks bei 41,6 mmHg (mit wIRA) gegenüber 30,2 mmHg in der Kontrollgruppe (mediane Differenz zwischen den Gruppen 11,9 mmHg (+39 %); 99 %-Konfidenzintervall 8,4/15,4 mmHg (+28/+51 %); $p<0,000001$) und der Median der subkutanen Temperatur bei $38,9^{\circ}\text{C}$ gegenüber $36,4^{\circ}\text{C}$ (mediane Differenz zwischen den Gruppen $2,6^{\circ}\text{C}$; 99 %-Konfidenzintervall $2,1/2,9^{\circ}\text{C}$; $p<0,000001$) [40, 38, 27, 26].

Die Ruhewerte (vor Bestrahlung) des

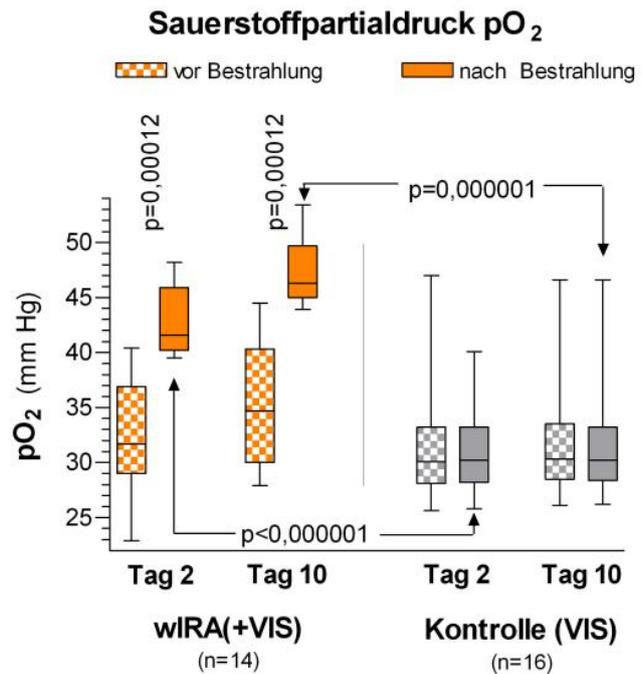


Abb. 6: Subkutaner Sauerstoffpartialdruck in 2 cm Gewebetiefe an den postoperativen Tagen 2 und 10 in der Gruppe mit wassergefiltertem Infrarot A (wIRA) und sichtbarem Licht (VIS) und in der Kontrollgruppe nur mit sichtbarem Licht (VIS) (Studie Heidelberg). (aus [38])

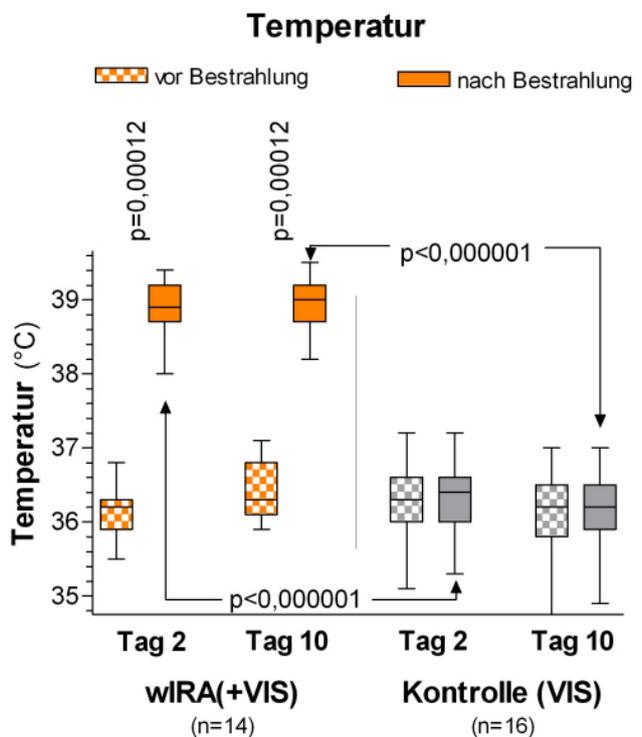


Abb. 7: Subkutane Temperatur in 2 cm Gewebetiefe an den postoperativen Tagen 2 und 10 in der Gruppe mit wassergefiltertem Infrarot A (wIRA) und sichtbarem Licht (VIS) und in der Kontrollgruppe nur mit sichtbarem Licht (VIS) (Studie Heidelberg). (aus [38])

subkutanen Sauerstoffpartialdrucks stiegen vom 2. zum 10. postoperativen Tag um 3,4 mmHg gegenüber 0,3 mmHg (mediane Differenz zwischen den Gruppen 3,1 mmHg (+10 %); 99 %-Konfidenzintervall 1,9/3,7 mmHg; $p=0,00051$) [40, 38, 27, 26]. Die Ruhewerte der subkutanen Temperatur stiegen um 0,4°C gegenüber -0,3°C (mediane Differenz 0,6°C; 95 %-Konfidenzintervall 0,2/0,8°C; $p=0,0074$) [40, 38, 27, 26]. Beides sind Effekte, die über den Zeitraum der einzelnen Bestrahlung hinausreichen [40, 38, 27, 26].

Die Gesamtbeurteilung des Effekts der Bestrahlung einschließlich Wundheilung, Schmerzen und kosmetischem Ergebnis, erhoben mit einer VAS von 0–100 (mit 50 als Indifferenzpunkt ohne Effekt) durch den Chirurgen (Median 79,0 gegenüber 46,8; mediane Differenz 27,9; 99 %-Konfidenzintervall 17,2/37,3; $p<0,000001$) oder den Patienten (79,0 gegenüber 50,2; mediane Differenz 23,8; 99 %-Konfidenzintervall 9,5/34,1; $p=0,000007$) war in der Gruppe mit wIRA verglichen mit der Kontrollgruppe wesentlich besser [40, 38, 27, 26]. Das galt auch für die einzelnen Aspekte, d. h. Wundheilung, erhoben mit einer VAS durch den Chirurgen (Median 88,6 gegenüber 78,5; $p<0,000001$) oder den Patienten (Median 85,8 gegenüber 81,0; $p=0,040$; Trend), und kosmetisches Ergebnis, erhoben mit einer VAS durch den Chirurgen (Median 84,5 gegenüber 76,5; $p=0,00027$) oder den Patienten (Median 86,7 gegenüber 73,6; $p=0,00077$) [40, 38, 27, 26].

Außerdem zeigte sich ein Trend zugunsten der wIRA-Gruppe hin zu einer niedrigeren Rate von Wundinfektionen insgesamt (3 von 46 (7 %) gegenüber 7 von 48 (15 %); Differenz -8 %; 95 %-Konfidenzintervall -20/4 %; $p=0,21$) einschließlich später Infektionen nach der Entlassung, hervorgerufen durch eine unterschiedliche Rate später Infektionen nach der Entlassung mit 0 von 46 (0 %) in der wIRA-Gruppe und 4 von 48 (8 %) in der Kontrollgruppe (Differenz -8 %; 95 %-Konfidenzintervall -18/2 %; $p=0,12$) [40, 38, 27, 26]. Und es gab einen Trend hin zu einem kürzeren postoperativen Krankenhausaufenthalt mit 9 Tagen in der wIRA-Gruppe gegenüber 11 Tagen in der Kontrollgruppe (mediane Differenz -2 Tage (-18 %), 95 %-Konfidenzintervall -3/0 Tage; $p=0,022$) [40, 38, 27, 26].

Das Hauptergebnis der Studie war, dass postoperative Bestrahlung mit wIRA selbst den normalen Wundheilungsprozess verbessern kann [40, 38, 27, 26].

3.1.2 Schwerbrandverletzte Kinder (Studie Kassel)

Eine prospektive, randomisierte, kontrollierte, doppelblinde Studie mit 45 schwerbrandverletzten Kindern in der Klinik für Kinderchirurgie des Kinderkrankenhauses Park Schönfeld in Kassel zeigte mit täglich 30 min Bestrahlung (ab dem ersten Tag, Tag der Verbrennung = Tag 1) in der Gruppe wIRA(+VIS) mit ungefähr 75 % wIRA und 25 % sichtbarem Licht (VIS) verglichen mit der Kontrollgruppe nur mit VIS eine deutlich schnellere Abnahme der Wundfläche [40, 38, 27]. Am fünften Tag (nach 4 Tagen mit Bestrahlung) wurde ent-

schieden, ob ein chirurgisches Débridement nekrotischen Gewebes wegen tieferer Verbrennungen (Grad 2b) notwendig war (11 von 21 in der Gruppe mit wIRA, 14 von 24 in der Kontrollgruppe) oder eine konservative Behandlung möglich war (Verbrennungen vom Grad 2a) [40, 38, 27]. Die Patienten mit konservativer Behandlung wurden in der Studie weitergeführt und bis zur vollständigen Reepithelisierung bestrahlt [40, 38, 27].

Die Patienten in der Gruppe mit wIRA zeigten eine deutlich schnellere Abnahme der Wundfläche: Eine Abnahme der Wundfläche im Median um 50 % wurde bereits nach 7 Tagen erreicht verglichen mit 9 Tagen in

der Kontrollgruppe und eine Abnahme der Wundfläche im Median um 90 % nach 9 Tagen verglichen mit 13 Tagen in der Kontrollgruppe (Abb. 8) [40, 38, 27]. Nach 9 Tagen betrug der Median der Wundflächenabnahme 89,2 % gegenüber 49,5 %, die mediane Differenz zwischen den Gruppen 39,5 % Wundflächenabnahme (99 %-Konfidenzintervall 34,4/43,0 %; $p=0,000011$) [40, 38]. Die mediane Differenz zwischen den Gruppen bestand bereits nach einem Tag mit $p = 0,00013$ und nach 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10 und 11 Tagen mit $p<0,0001$ [40, 38]. Außerdem zeigte die Gruppe mit wIRA bessere Ergebnisse hinsichtlich der chirurgischen

Gesamteinschätzung der Wunde und hinsichtlich der Einschätzung des Effekts der Bestrahlung (Letzteres als Trend bis 3 Monate nach der Verbrennung) verglichen mit der Kontrollgruppe [40, 38, 27].

3.1.3 Experimentelle Wunden (Studie Berlin)

In einer prospektiven, randomisierten, kontrollierten Studie mit 12 Probanden in der Klinik für Dermatologie der Universitätsklinik Charité in Berlin wurden bei jedem Probanden 4 experimentelle oberflächliche Wunden (5 mm Durchmesser) als ein Modell für akute Wunden mittels Saugblasentechnik und Entfernen des Blasendachs mit Skalpell und steriler Pinzette erzeugt (Tag 1) [40, 38, 27]. Vier Behandlungsarten wurden während 10 Tagen angewendet und untersucht [40, 38, 27]: keine Therapie, nur wIRA(+VIS) mit ungefähr

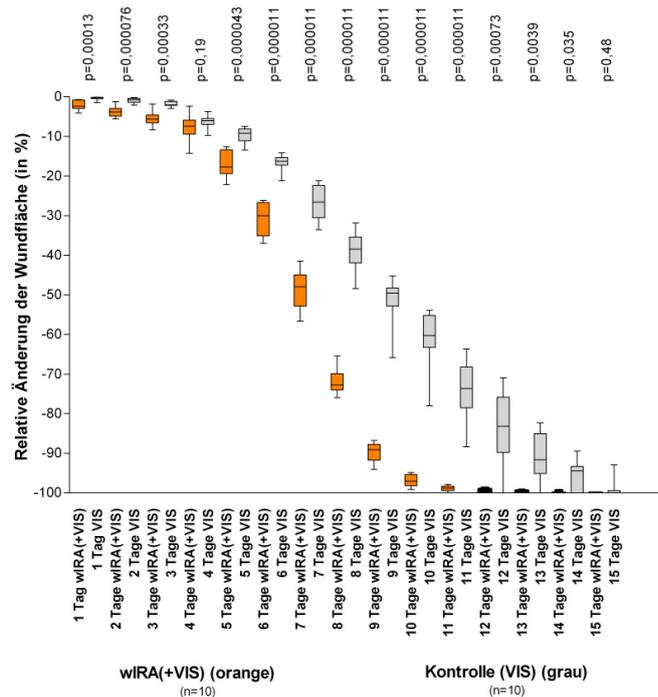


Abb. 8: Relative Änderung der Wundfläche von schwerbrandverletzten Kindern in Abhängigkeit von der Dauer der Behandlung (in Tagen) in der Gruppe mit wassergefiltertem Infrarot A (wIRA) und sichtbarem Licht (VIS) und in der Kontrollgruppe nur mit sichtbarem Licht (VIS) (Studie Kassel). (aus [38])

75 % wIRA und 25 % VIS und täglich 30 min Bestrahlung, nur Dexpanthenol-Salbe einmal täglich , wIRA(+VIS) und Dexpanthenol-Salbe einmal täglich.

Die Heilung der kleinen experimentellen Wunden war aus klinischer Sicht bei allen 4 Behandlungsarten sehr gut [40, 38, 27]. Deshalb gab es nur kleine Unterschiede zwischen den Behandlungsarten, mit geringen Vorteilen für die Kombination wIRA(+VIS) und Dexpanthenol-Salbe und für nur Dexpanthenol-Salbe hinsichtlich der relativen Änderung der Wundfläche und der Einschätzung des Empfindens des Wundgebiets [40, 38, 27].

Laser-Scan-Mikroskopie mit einem Score-System zeigte jedoch Unterschiede zwischen den 4 Behandlungsarten hinsichtlich der Bildung des Stratum corneum (von der ersten Schicht von Korneozyten bis zur vollen Ausbildung), insbesondere für die Tage 5–7: Die schnellste Ausbildung des Stratum corneum wurde bei Wunden beobachtet, die mit wIRA(+VIS) und Dexpanthenol-Salbe behandelt wurden, am zweitschnellsten war wIRA(+VIS) allein, an dritter Stelle lag Dexpanthenol-Salbe allein und an letzter Stelle waren die unbehandelten Wunden [40, 38, 27].

Keimzahlbestimmungen der Wunden (alle 2 Tage) zeigten, dass wIRA(+VIS) und die Kombination von wIRA(+VIS) mit Dexpanthenol-Salbe in der Lage waren, die Kolonisation mit physiologischer Hautflora bis zum Tag 5 im Vergleich zu den beiden anderen Gruppen (untherapierte Gruppe und Gruppe nur mit Dexpanthenol-Salbe) zu verhindern [40, 38, 27]. Zu allen untersuchten Zeitpunkten war das Maß an Kolonisation unter Therapie mit wIRA(+VIS) allein niedriger (mehr supprimiert) als in der Gruppe mit wIRA(+VIS) und Dexpanthenol-Salbe [40, 38, 27].

3.1.4 Weitere Aspekte und Perspektiven bei akuten Wunden

Eine weitere prospektive, randomisierte, kontrollierte Studie, bei der die Patienten *vor* großen abdominalen Operationen mit wIRA bestrahlt wurden, bestätigte die Ergebnisse der oben dargelegten Studie Heidelberg, bei der die Patienten *nach* großen abdominalen Operationen mit wIRA bestrahlt wurden, insbesondere die Minderung der Wundinfektionsrate durch wIRA.

Während der Rehabilitation nach Hüft- und Knieendoprothesenoperationen war

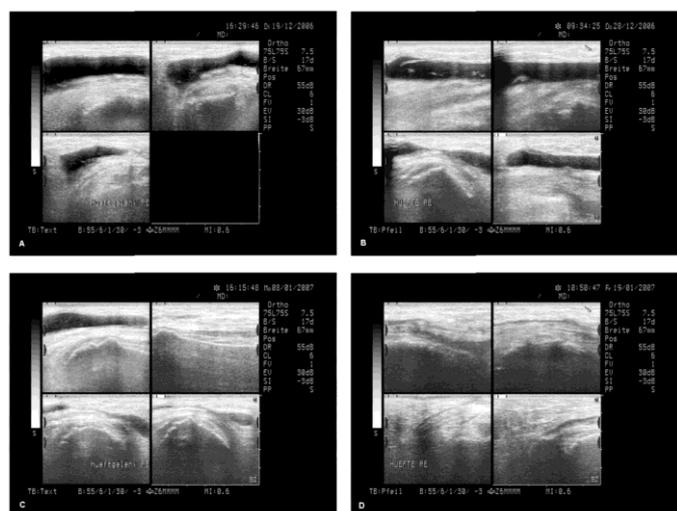


Abb. 9 A–D: Beispiel für eine erfolgreiche Behandlung rezidivierender Wundserome mit wIRA. A: Vor Beginn, B: nach ca. 1 Woche mit wIRA, C: nach 18 Tagen mit wIRA, D: nach 29 Tagen mit wIRA. (aus [27])

durch Bestrahlung mit wIRA(+VIS) die Resorption von Wundseromen und Wundhämatomen sowohl klinisch als auch sonographisch schneller, und die Schmerzen waren reduziert [40, 38, 27].

Ein zusätzliches Beispiel für eine erfolgreiche Behandlung rezidivierender Wundserome mit wIRA zeigt Abb. 9 [38, 27]. Auch nach urologischen Schnittoperationen wurde mit wIRA eine schnellere Wundheilung und Wundseromresorption beobachtet. Bei Wöchnerinnen nach Kaiserschnittentbindung wurde wIRA als angenehm und günstig für die Wundheilung bewertet. wIRA kann auch erfolgreich bei persistierenden postoperativen Schmerzen, z. B. nach Thorakotomie, eingesetzt werden [40, 38, 27].

Als Perspektive erscheint es klinisch sinnvoll, wIRA sowohl unmittelbar prä- als auch postoperativ, z. B. bei abdominalen und thorakalen Operationen, einzusetzen [40, 38, 27]. wIRA kann außerdem präoperativ (z. B. während 1–2 Wochen) zur Präkonditionierung der Entnahme- und der Empfängerstellen von Hautlappen, Transplantaten oder Spalthauttransplantaten und postoperativ zum Verbessern der Wundheilung und zum Mindern von Schmerzen, Entzündungen und Infektionen an allen genannten Stellen verwendet werden [40, 38, 27]. wIRA kann zudem zum Unterstützen einer prä- oder postoperativen Routineantibiotikagabe eingesetzt werden [40, 38, 27]. wIRA kann auch eine Alternative zur Vakuumversiegelung darstellen [40, 34].

3.2 Chronische Wunden

Das Zentrum von chronischen Wunden ist oft *hypoxisch* [40, 38, 33, 26, 66, 57, 59, 69, 30, 10, 9, 41, 87, 58, 46] und relativ *hypotherm* [40, 38, 33, 26, 66]. Das entspricht einer *defizitären Energiebereitstellung im Gewebe*, die die Wundheilung behindert oder unmöglich macht [40, 38, 33]. wIRA steigert die Temperatur [40, 38, 33, 32, 26, 80, 79, 81, 66, 65, 71, 29], den Sauerstoffpartialdruck [40, 38, 33, 32, 26] sowie die Durchblutung im Gewebe [40, 38, 33, 32, 65, 71, 29]. Diese 3 Faktoren sind entscheidend für eine *ausreichende Versorgung des Gewebes mit Energie und Sauerstoff* und deshalb auch für die Wundheilung, speziell bei chronischen Wunden, und die Infektionsabwehr [40, 38, 33, 32]. wIRA kann insbesondere bei nicht heilenden chronischen Wunden eine Wundheilung ermöglichen [40, 38, 84].

3.2.1 Chronische venöse Unterschenkelulzera (Studie Basel)

In einer prospektiven, randomisierten, kontrollierten Studie in Basel mit 40 Patienten mit chronischen venösen Unterschenkelulzera (initiale Ulkusfläche 1–12,4 cm²) führte eine Bestrahlung mit wIRA und sichtbarem Licht (VIS) für 30 min 3-mal pro Woche über einen Zeitraum von 6 Wochen zu einer signifikant und relevant schnelleren Wundheilung und

einem signifikant und relevant geringeren Schmerzmittelverbrauch gegenüber einer in gleicher Form therapierten (Wundsäuberung, antibakterielle Wundauflagen und Kompressionstherapie), aber nicht bestrahlten Kontrollgruppe:

Ein vollständiger Wundschluss wurde im Median nach 14 Tagen in der Gruppe mit wIRA gegenüber 42 Tagen in der Kontrollgruppe erreicht (mediane Differenz zwischen den Gruppen -21 Tage; 99 %-Konfidenzintervall -28/-7 Tage; $p=0,000005$). Nach 42 Tagen waren 19 von 20 Ulzera (95 %) gegenüber 9 von 20 Ulzera (45 %) abgeheilt ($p=0,0019$) und der Median der Restulkusfläche betrug 0 gegenüber 3 cm² (mediane Differenz zwischen den Gruppen -3 cm²; 99 %-Konfidenzintervall -4,2/0 cm²; $p=0,0091$) [40, 38, 84, 7]. Nach jeder der 6 Wochen war die Anzahl der erforderlichen Schmerztabletten pro Tag in der Gruppe mit wIRA signifikant niedriger als in der Kontrollgruppe: Median zum Beispiel nach 2 Wochen 2 Tabletten gegenüber 3 Tabletten (mediane Differenz -1 Tablette; $p=0,0029$), nach 4 Wochen 0 gegenüber 2 Tabletten (mediane Differenz -2 Tabletten; $p=0,000018$), nach 6 Wochen 0 gegenüber 2 Tabletten (mediane Differenz -2 Tabletten; 99 %-Konfidenzintervall -3/-1 Tabletten; $p=0,000005$). Der Median der Summe der Tabletten an 6 Erhebungstagen (der Wochen 1–6) war mit 6 Tabletten in der Gruppe mit wIRA deutlich niedriger als die 14,5 Tabletten in der Kontrollgruppe (mediane Differenz -8 Tabletten; 99 %-Konfidenzintervall -12/-3 Tabletten; $p=0,000002$) [40, 38, 84, 7].

3.2.2 Chronische venöse Unterschenkelulzera (Studie Tromsø/Hillerød)

Eine weitere prospektive Studie der Universität Tromsø (Norwegen) und des Krankenhauses in Hillerød (Dänemark) mit 10 Pa-

tienten mit aufwändiger thermographischer Verlaufskontrolle ergab unter Therapie mit wIRA(+VIS) eine vollständige oder fast vollständige Abheilung therapieresistenter chronischer Unterschenkelulzera (initiale Ulkusfläche 0,42–6,30 cm²) bei 7 Patienten sowie eine deutliche Ulkusverkleinerung bei 2 weiteren Patienten, eine ausgeprägte Minderung der Schmerzen und des Schmerzmittelverbrauchs (z. B. von 15 auf 0 Schmerztabletten täglich) und eine

Normalisierung des thermographischen Bilds (vor Therapiebeginn typischerweise

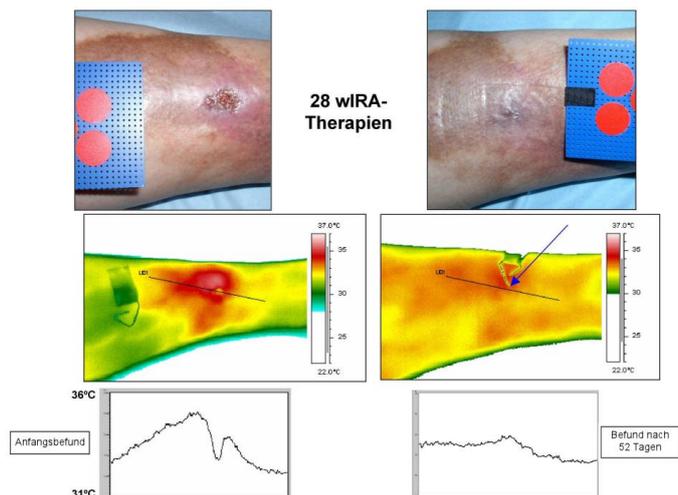


Abb. 10: Beispiel für den Heilungsverlauf eines chronischen venösen Unterschenkelulkus unter Therapie mit wIRA (Studie Tromsø/Hillerød) mit normaler Aufsicht, thermographischem Bild und Temperaturprofil durch das Ulkus – jeweils links vor wIRA-Therapie und rechts nach Abschluss der wIRA-Therapie. (aus [38])

hyperthermer Ulkusrandwall mit relativ hypothermem Ulkusgrund und bis zu 4,5°C Temperaturdifferenz) (Abb. 10) [40, 38, 84, 66]. Bei einem Patienten wurde ein Ulkus an einem Bein mit dem Vollwirkstrahler (wIRA(+VIS)) therapiert, während ein Ulkus am anderen Bein mit einem Kontrollgruppenstrahler (nur VIS ohne wIRA) behandelt wurde, was einen deutlichen Unterschied zugunsten der wIRA-Therapie zeigte [40, 38, 84, 66].

Alle mit visuellen Analogskalen erhobenen Variablen – Einschätzung des Effekts der Bestrahlung durch Patient und durch klinischen Untersucher, Einschätzung des Gefühls im Wundbereich durch Patient, Einschätzung der Wundheilung durch klinischen Untersucher sowie Einschätzung des kosmetischen Zustands durch Patient und durch klinischen Untersucher – verbesserten sich während der Bestrahlungstherapieperiode sehr stark, was einer verbesserten Lebensqualität entsprach [40, 38, 84, 66]. Innerhalb der Gruppe der 6 Patienten mit chronischen venösen Unterschenkelulzera ohne Begleitprobleme (d. h. ohne periphere arterielle Verschlusskrankheit, Rauchen oder fehlender venöser Kompressionstherapie) heilten alle 6 Ulzera vollständig oder fast vollständig ab (96–100 % Reduktion der Ulkusfläche) [40, 38, 84, 66].

Die Originalveröffentlichung [66] umfasst 10 Anhänge mit detaillierten Informationen zu jedem Patienten sowie zusätzlich 2 Thermographievideosequenzen.

3.2.3 Chronische venöse Unterschenkelulzera (Studie Freiburg)

In einer prospektiven, randomisierten, kontrollierten, verblindeten Studie der Klinik für Dermatologie der Universität Freiburg wurden 51 Patienten mit nicht-heilenden, chronischen venösen Unterschenkelulzera (initiale Ulkusfläche 1–68 cm²) mit Kompressionstherapie, Wundsäuberung und nicht-adhäsiven Wundauflagen sowie 30 Minuten Bestrahlung fünfmal pro Woche über 9 Wochen und weitere 4 Wochen ohne Bestrahlung behandelt [40, 78, 38, 34, 84].

Die Gruppe mit wIRA(+VIS) (maximal 140 mW/cm² (75 %) wIRA und 45 mW/cm² (25 %) VIS) zeigte, verglichen mit einer Kontrollgruppe mit nur VIS, eine bessere Gesamteinschätzung der Wundheilung (nach 9 Wochen 85 gegenüber 67,5 auf einer VAS 0–100; mediane Differenz zwischen den Gruppen 15; 95 %-Konfidenzintervall 3/30; p=0,012), eine bessere Heilungstendenz (nach 9 Wochen bei 84 % (21 von 25) der Patienten gegenüber bei 50 % (13 von 26); p=0,023), eine bessere Granulation (nach 9 Wochen 90 gegenüber 80 auf einer VAS 0–100, p=0,036) sowie eine Tendenz zu geringerer Exsudation (nach 5 Wochen 30 gegenüber 55 auf einer VAS 0-100; p=0,075), geringeren Belägen (nach 5 Wochen 20 gegenüber 40 auf einer VAS 0-100; p=0,070) und schnellerer Wundflächenreduktion (nach 7 Wochen 39 % gegenüber 19,5 % Wundflächenabnahme; mediane Differenz zwischen den Gruppen 20,5 % Wundflächenabnahme; p=0,10; für Wunden

mit initialer Wundfläche <10 cm² nach 13 Wochen 92 % gegenüber 47 % Wundflächenabnahme; mediane Differenz zwischen den Gruppen 30 % Wundflächenabnahme; 95 %-Konfidenzintervall 0/68 % Wundflächenabnahme; p=0,11 [78]. Die Anwendung der wIRA-Strahler bei den Patienten zu Hause erwies sich als sehr gut praktikabel [78].

Ein zusätzliches Beispiel für die Anwendung von wIRA bei einem chronischen venösen Unterschenkelulkus außerhalb der dargestellten Studien zeigt Abb. 11.



Abb. 11 A–C: Beispiel für den Heilungsverlauf eines chronischen venösen Unterschenkelulkus unter Therapie mit wIRA. A: Anfangsbefund, B: Befund nach 3½ Monaten, C: Befund nach 4½ Monaten (geheilt). (aus [38])

3.3 Weitere wundbezogene Indikationen

wIRA kann selbst bei gemischt arteriell-venösen Ulzera oder arteriellen Ulzera eingesetzt werden (kasuistisch), wenn die Bestrahlungsstärke angemessen niedrig gewählt und die Bestrahlung sorgfältig überwacht wird [40, 38, 84].

Auch Ulzerationen bei Morphea [23] und bei kutaner sklerodermie Graft-versus-Host-Erkrankung [62] lassen sich mit wIRA erfolgreich therapieren.

wIRA kann bei Dekubitalulzera (Dekubitus) sowohl präventiv als auch therapeutisch (Verkleinerung der Wundfläche, bessere Granulation [32]) eingesetzt werden [40, 38, 84]. wIRA kann beim diabetischen Fuß sowohl präventiv – bei gefährdeten Patienten mit Diabetes mellitus und Sensibilitätsstörungen – vor dem Auftreten einer Wunde als auch therapeutisch eingesetzt werden. Die Wundheilung eines diabetischen Fußulkus unter wIRA-Therapie lässt sich auch thermographisch verfolgen. wIRA kann zudem die Resorption topisch applizierter Substanzen [28, 6, 70], auch auf Wunden, verbessern [40, 38, 84].

Auch eine Kombination mit photodynamischer Therapie (PDT) in antiinfektiver Indikation [15, 60, 61] ist möglich [40, 34, 35, 84, 32] (siehe hierzu auch Abschnitt „Wirkprinzipien“).

wIRA kann mit niedrigen Bestrahlungsstärken und beginnend mit kurzen Bestrahlungszeiten zur Therapie des »complex regional pain syndrome« (CRPS, Morbus Sudeck, Algodystrophie) eingesetzt werden [40].

Im Bereich der Viszeralchirurgie und der Intensivmedizin kann eine wIRA-Bestrahlung des Abdomens auch zur Aktivierung der Darmmotilität eingesetzt werden [40].

4 Andere Hauterkrankungen

4.1 Vulgäre Warzen

Vulgäre Warzen können mit 6–9 einwöchigen Therapiezyklen mit kontinuierlicher Keratolyse mit Salizylsäurepflaster und jeweils einer unblutigen Kürettage und einer wIRA(+VIS)-Bestrahlung von 30 min – ohne photodynamische Therapie – erfolgreich therapiert werden [40, 21, 34]. In einer prospektiven, randomisierten, kontrollierten, doppelblinden Studie der Hautklinik der Universität Jena mit 80 Patienten mit therapierefraktären Warzen wurden bei nur 3 dreiwöchigen Therapiezyklen

(somit nur insgesamt 3 Bestrahlungen) in den beiden Gruppen mit wIRA(+VIS) eine Minderung der Gesamtwarzenfläche pro Patient im Median um 94 bzw. 99 % im Vergleich zu 47 bzw. 73 % in den beiden Gruppen nur mit VIS (Abb. 12) sowie 72 % im Vergleich zu 34 % völlig verschwundene Warzen und 42 % im Vergleich zu 7 % warzenfreie Patienten erreicht [40, 21, 34].

Ein Behandlungsbeispiel ist in Abb. 13 gezeigt. Auf einer visuellen Analogskala (–50: extreme Verschlechterung, 0: kein Effekt, +50: extreme Verbesserung) wurde ärztlicherseits der Therapieeffekt bei den Patienten der beiden Gruppen mit wIRA(+VIS) nach 9 Wochen im Median jeweils mit +41 beurteilt, hingegen bei den Patienten der beiden Gruppen nur mit VIS im Median jeweils mit 0 [40, 21]. Ein ähnlich großer Unterschied ergab sich bei der Beurteilung des Therapieeffekts durch

die Patienten (+35 bzw. +31 verglichen mit +1 bzw. +5) [40, 21]. Die subjektive

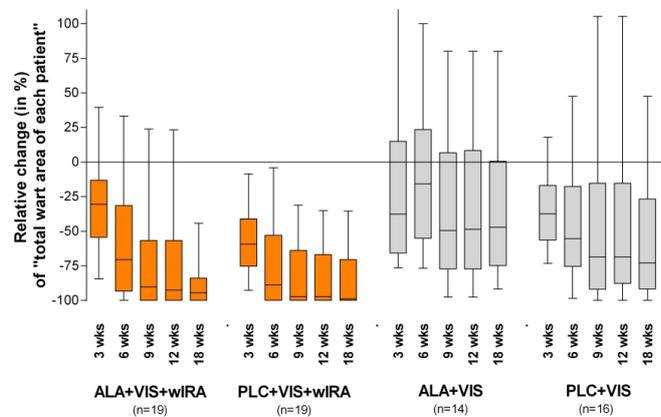


Abb. 12: Relative Änderung (in %) der »Gesamtwarzenfläche jedes Patienten« in den Gruppen mit wassergefiltertem Infrarot A (wIRA) und sichtbarem Licht (VIS) und in den Kontrollgruppen nur mit sichtbarem Licht (VIS). ALA Aminolävulinsäure, PLC Placebo-Creme. (aus [21])



Abb. 13 A–D: Beispiel für die Therapie von Handwarzen mit wIRA. A: Vor der ersten Behandlung, B: vor der zweiten Behandlung (= nach 3 Wochen), C: vor der dritten Behandlung (= nach 6 Wochen), D: 18 Wochen nach der ersten Behandlung. (aus [21])

Einschätzung des Empfindens der warzenbedeckten Hautregion (hinsichtlich Schmerzen, Brennen, Stechen) auf einer visuellen Analogskala (0: extrem unangenehm, 100: frei von Beschwerden) beurteilten die Patienten der beiden Gruppen mit wIRA(+VIS) nach 9 Wochen im Median mit 85 bzw. 99, während die Patienten der beiden Gruppen nur mit VIS dies mit 50 bzw. 32 beurteilten [40, 21].

In einer weiteren prospektiven, randomisierten, kontrollierten, doppelblinden Studie der Hautklinik der Universität Bern wurden mit 6–9 einwöchigen Therapiezyklen mit kontinuierlicher Keratolyse mit Salicylsäurepflaster und jeweils einer unblutigen Kürettage und einer wIRA(+VIS)-Bestrahlung von 30 min bereits nach 6 Wochen hohe Abheilungsraten erzielt [40, 34]. Nur bei besonders hartnäckigen Warzen ist eine – auch wiederholbare – photodynamische Therapie (PDT) mit wIRA und sichtbarem Licht (VIS) erforderlich [40, 21].

4.2 Andere virusbedingte Hauterkrankungen

wIRA kann auch zur Therapie von Condylomata acuminata, die durch humane Papillomaviren (HPV) verursacht werden, eingesetzt werden [40, 34, 33, 32]. wIRA beschleunigt die Abheilung von Herpes labialis und mindert die Schmerzen bei Herpes Zoster, sowohl akut als auch die chronischen Post-Zoster-Schmerzen [40, 34, 33, 32].

4.3 Sklerodermie und Morphaea

wIRA kann bei Sklerodermie eine Befindlichkeitsbesserung, weniger Schmerzen und eine Minderung der Raynaud-Symptomatik (kalte Finger und Hände aufgrund Minderdurchblutung) bewirken [40, 34, 33, 32].

Die hautbezogenen Formen der zirkumskripten Sklerodermie umfassen die lokalisierte Sklerodermie oder Morphaea, die linear-zirkumskripte Sklerodermie und die generalisierte zirkumskripte Sklerodermie [83]. Bei allen Formen kann wIRA eingesetzt werden [83]. Bei Morphaea (und den anderen Formen) kann wIRA zu einer Rückbildung der Sklerose (mit messbarer Rückbildung von Hauthärte und Größe von Plaques) sowie einer Abnahme des Juckreizes und der Schmerzen führen [40, 83, 85, 34, 33, 32]. Auch Ulzera lassen sich bei Morphea erfolgreich mit wIRA therapieren [23].

Auch mit einer milden wIRA-Ganzkörperhyperthermie kann die Raynaud-Symptomatik bei Sklerodermie gebessert werden [40, 17].

4.4 Akne papulopustulosa

Eine Therapie mit wIRA+VIS (volles sichtbares Spektrum ohne Farbfilter) allein, d. h. ohne topisch aufgetragenes Medikament, 3-mal pro Woche jeweils 30 min über 4 Wochen, führt v. a. zu einer Reduktion der Entzündungszeichen sowie der Seborrhö [40, 34]. Eine Kombination, z. B. mit topisch aufgetragenem Adapalen, ist möglich [40, 34].

4.5 Resorptionsverbesserung topischer Dermatika und Substanzen

wIRA kann zur Resorptionsverbesserung topischer Dermatika und Substanzen (z. B. Kortison, Lokalanästhetika) als Alternative zum Okklusivverband eingesetzt werden [40, 70, 28, 34]. Klinisch kann wIRA in diesem Sinn eingesetzt werden, um z. B. bei Psoriasis oder bei Neurodermitis weniger Kortison oder ein weniger starkes Kortison einsetzen zu können [40].

Für Bestrahlungen mit wIRA wurde durch die Untersuchung funktioneller Effekte penetrierter Substanzen am Menschen gezeigt, dass wIRA die Penetration von klinisch verwendeten, topisch aufgetragenen Stoffen verbessert [28, 6]. So trat der schmerzmindernde Effekt von Lokalanästhetika mit wIRA-Bestrahlung schneller und länger anhaltend als ohne wIRA-Bestrahlung auf [28], und die Vasokonstriktion durch Kortison (erkennbar an der Hautabblassung) war mit wIRA-Bestrahlung ausgeprägter als ohne [6].

Diese mittels Untersuchung funktioneller Effekte gefundene penetrationsverstärkende Wirkung von wIRA konnte in einer prospektiven, randomisierten, kontrollierten Studie am Menschen mit einer ganz anderen Untersuchungstechnik bestätigt werden, und zwar mittels Tape-Stripping-Methode in Verbindung mit spektroskopischen Messungen [40, 70]. Die Penetrationsprofile des hydrophilen Fluoreszeins zeigten bei Vorbehandlung mit wIRA (Modus B: zuerst wIRA-Bestrahlung, dann Auftragen der Substanz) oder Behandlung mit wIRA (Modus C: zuerst Auftragen der Substanz, dann wIRA-Bestrahlung) eine signifikant gesteigerte Penetrationstiefe im Vergleich zu nicht bestrahlter Haut (Modus A) [40, 70]. Im Gegensatz zum Fluoreszein zeigte das lipophile Curcumin keine Unterschiede in der Penetrationskinetik in Abhängigkeit davon, ob die Haut mit wIRA bestrahlt wurde oder nicht [40, 70].

Diese Effekte wurden durch die Laser-Scan-Mikroskopie-Ergebnisse bestätigt [40, 70]. Bestrahlung mit wassergefiltertem Infrarot A steigerte die Hydratation des Stratum corneum: Der transepidermale Wasserverlust nahm von etwa $8,8 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ vor wIRA-Bestrahlung auf $14,2 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ nach wIRA-Bestrahlung zu, und die Hauthydratation stieg von 67 auf 87 relative Einheiten [40, 70]. Die Temperatur an der Hautoberfläche stieg von $32,8^\circ\text{C}$ vor wIRA auf $36,4^\circ\text{C}$ nach wIRA-Bestrahlung [40, 70].

Die bessere Penetration des hydrophilen Farbstoffs Fluoreszein nach oder während Bestrahlung der Haut (Modi B und C) kann mit der gesteigerten Hydratation des Stratum corneum durch die wIRA-Bestrahlung erklärt werden [40, 70]. Da die meisten topisch aufgetragenen Substanzen hauptsächlich hydrophil sind, kann wIRA vor oder nach dem Auftragen der Stoffe verwendet werden, um die Penetration – im ersten Fall sogar von hitze-

empfindlichen Stoffen – mit einer breiten klinischen Relevanz als kontaktfreie Alternative zum Okklusivverband zu verbessern [40, 70].

4.6 Photodynamische Therapie bei aktinischen Keratosen und Basaliomen

wIRA kann im Rahmen einer photodynamischen Therapie (PDT) zusammen mit einer oder mehreren Wirkbanden im sichtbaren Bereich (VIS) und einem topisch aufgetragenen Photosensibilisator (oder einer Vorstufe davon) bei aktinischen Keratosen [40, 82, 45, 18, 34] und (flachen) Basaliomen [40, 45, 34] eingesetzt werden. Gegenüber anderen für PDT verwendeten Bestrahlungsquellen ist wIRA(+VIS) schmerzärmer [40, 82, 34]. Durch Wahl entsprechender Farbfilter können für einen bestimmten Photosensibilisator, z. B. Protoporphyrin IX (endogen aus topisch aufgetragener 5-Aminolävulinsäure (Delta-Aminolävulinsäure, ALA) gebildet), gezielt eine oder mehrere Wirkbanden ausgewählt werden [40, 32, 21].

In einer prospektiven, randomisierten, kontrollierten, doppelblinden Studie mit 80 Patienten mit aktinischen Keratosen und photodynamischer Therapie (PDT) mit Methylaminolävulinat (MAL; die Anregungsbanden für das daraus endogen gebildete Protoporphyrin IX liegen im sichtbaren Bereich) wurden 2 Gruppen untersucht: PDT mit sichtbarem Licht und wassergefiltertem Infrarot A (VIS+wIRA eines wIRA-Strahlers) im Vergleich zu PDT mit Licht von Lichtemissionsdioden (LED), mit einer weiteren Unterteilung in jeweils 2 Untergruppen ohne bzw. mit Sprühkühlung mit Kochsalzlösung [82, 40].

Alle Gruppen und Untergruppen zeigten hohe Effektivität, sehr gutes kosmetisches Ergebnis und hohe Patientenzufriedenheit [82, 40]. Die Effektivität der Behandlung war in der Gruppe der Patienten ohne Sprühkühlung besser ($p=0,00022$ bei 3 Monaten; $p=0,0068$ bei 6 Monaten) und zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen VIS+wIRA und LED [82, 40]. VIS+wIRA war signifikant weniger schmerzhaft als LED: Für PDT ohne Sprühkühlung war der Median des maximalen Schmerzes in der Gruppe mit VIS+wIRA niedriger als in der Gruppe mit LED (50 gegenüber 80 auf einer visuellen Analogskala von 0–100; Interquartilspanne 25–82,5 gegenüber 60–80; mediane Differenz -25 ; 95 %-Konfidenzintervall $-40/0$; $p = 0,025$) [82, 40]. Schmerzdauer und retrospektiv erhobene Schmerzhöhe waren mit VIS+wIRA niedriger als mit LED, unabhängig von der Sprühkühlung [82, 40].

5 Zusammenfassung

Wassergefiltertes Infrarot A (wIRA) stellt eine spezielle Form der Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung) im Bereich von 780–1400 nm dar, die aufgrund ihrer sehr guten Verträglichkeit in der Medizin zur Prävention und Therapie verwendet wird.

wIRA entspricht dem Großteil der in gemäßigten Klimazonen die Erdoberfläche wasserfiltriert erreichenden Infrarotstrahlung der Sonne (Filterwirkung des Wassers und des Wasserdampfs der Erdatmosphäre). Durch die Wasserfiltration werden die Strahlungsanteile gemindert, die sonst durch Wechselwirkung mit Wassermolekülen in der Haut eine unerwünschte thermische Belastung der obersten Hautschicht hervorrufen würden. Technisch wird wIRA in speziellen Strahlern erzeugt, in denen die gesamte Strahlung eines Halogenstrahlers durch eine Wasser enthaltende Küvette hindurchtritt.

wIRA wirkt beim Menschen über thermische und nicht thermische Effekte. Es steigert Temperatur, Sauerstoffpartialdruck und Durchblutung im Gewebe. Wesentliche klinische Wirkungen sind – indikationsübergreifend – eine Minderung von Schmerzen, Entzündung und vermehrter Sekretion sowie eine Verbesserung der Infektabwehr und der Regeneration. In der Chirurgie und der Dermatologie kann wIRA eingesetzt werden zur Therapie von akuten und chronischen Wunden, bei verschiedenen Hauterkrankungen (vulgären Warzen, Herpes labialis, Herpes Zoster, Sklerodermie, Morphaea, Akne papulopustulosa), zur Resorptionsverbesserung topisch aufgetragener Substanzen und im Rahmen einer photodynamischen Therapie (PDT; zur Therapie aktinischer Keratosen).

Für Indikationen für wIRA außerhalb von Chirurgie und Dermatologie – insbesondere in den Bereichen Physiotherapie, Sportmedizin, Orthopädie, Rheumatologie, simultane Kombination mit Bewegung, Neonatologie, Anästhesiologie, Intensivmedizin, Neurologie, Onkologie und Ganzkörperhyperthermie – wird auf Hoffmann 2012 [40] verwiesen.

Literatur

- [1] Akca O, Melischek M, Scheck T, Hellwagner K, Arkilic CF, Kurz A et al. Postoperative pain and subcutaneous oxygen tension. *Lancet* 354: 41–42 (1999)
- [2] Albrecht-Buehler G. Surface extensions of 3T3 cells towards distant infrared light sources. *J Cell Biol* 114(3): 493–502 (1991)
- [3] Albrecht-Buehler G. Cellular infrared detector appears to be contained in the centrosome. *Cell Motil Cytoskeleton* 27(3): 262–271 (1994)
- [4] Albrecht-Buehler G. A long-range attraction between aggregating 3T3 cells mediated by near-infrared light scattering. *Proc Natl Acad Sci U S A* 102(14): 5050–5055 (2005)
- [5] Applegate LA, Scaletta C, Panizzon R, Frenk E, Hohlfeld P, Schwarzkopf S. Induction of the putative protective protein ferritin by infrared radiation: implications in skin repair. *Int J Mol Med* 5(3): 247–251 (2000)

- [6] Bankova L, Heinemann C, Fluhr JW, Hoffmann G, Elsner P. Improvement of penetration of a topical corticoid by waterfiltered infrared A (wIRA). In: 1st Joint Meeting of the 14th International Congress for Bioengineering and the Skin & 8th Congress of the International Society for Skin Imaging; 2003 May 21–24; Hamburg, P96 (2003)
- [7] Biland L, Barras J. Die wassergefilterte Infrarot-A-Hyperthermie zur Behandlung venöser Ulcera. *Hefte Wundbehand* 5: 41 (2001)
- [8] Burri N, Gebbers N, Applegate LA. Chronic infrared-A radiation repair: Implications in cellular senescence and extracellular matrix. In: Pandalai SG (ed.) *Recent Research Developments in Photochemistry & Photobiology*, vol. 7. Transworld Research Network, Trivandrum, p. 219–231 (2004)
- [9] Buslau M, Hoffmann G. Die hyperbare Oxygenation (HBO) – eine adjuvante Therapie akuter und chronischer Wundheilungsstörungen (Review). *Dermatol Monatsschr* 179: 39–54 (1993)
- [10] Buslau M, Hoffmann G. Hyperbaric oxygenation in the treatment of skin diseases (review). In: Fuchs J, Packer L (eds.) *Oxidative stress in dermatology*. New York: Marcel Dekker, p. 457–485 (1993)
- [11] Chow RT, Heller GZ, Barnsley L. The effect of 300 mW, 830 nm laser on chronic neck pain: a double-blind, randomized, placebo-controlled study. *Pain* 124(1–2): 201–210 (2006)
- [12] Cobarg CC. Physikalische Grundlagen der wassergefilterten Infrarot-A-Strahlung. In: Vaupel P, Krüger W (Hrsg.) *Wärmetherapie mit wassergefilterter Infrarot-A-Strahlung. Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten*. 2. Aufl. Stuttgart: Hippokrates, S. 19–28 (1995)
- [13] Danno K, Horio T, Imamura S. Infrared radiation suppresses ultraviolet B-induced sunburn-cell formation. *Arch Dermatol Res* 284(2): 92–94 (1992)
- [14] Danno K, Mori N, Toda K, Kobayashi T, Utani A. Near-infrared irradiation stimulates cutaneous wound repair: laboratory experiments on possible mechanisms. *Photodermatol Photoimmunol Photomed* 17(6): 261–265 (2001)
- [15] Diddens H, Arp N, Eisenbeiß W. Photodynamische Therapie (PDT) zur Behandlung lokaler Wunden. *GMS Krankenhaushyg Interdiszip* 1(1): Doc19 (2006).
www.egms.de/pdf/journals/dgkh/2006-1/dgkh000019.pdf und
www.egms.de/en/journals/dgkh/2006-1/dgkh000019.shtml
- [16] Ehrlicher A, Betz T, Stuhmann B, Koch D, Milner V, Raizen MG, Käs J. Guiding neuronal growth with light. *Proc Natl Acad Sci USA* 99(25): 16024–16028 (2002)
- [17] Foerster J, Fleischanderl S, Wittrock S, Storch A, Meffert H, Riemekasten G, Worm M. Infrared-mediated hyperthermia is effective in the treatment of scleroderma-associated Raynaud's phenomenon. *Thermology Int* 19(3): 98 (2009)

- [18] Foss P. Einsatz eines patentierten, wassergefilterten Infrarot-A-Strahlers (Hydrosun) zur photodynamischen Therapie aktinischer Dyskeratosen der Gesichts- und Kopfhaut. *Z naturheilkundl Onkologie krit Komplementärmed* 6(11): 26–28 (2003)
- [19] Frank S, Menezes S, Lebreton-De Coster C, Oster M, Dubertret L, Coulomb B. Infrared radiation induces the p53 signaling pathway: role in infrared prevention of ultraviolet B toxicity. *Exp Dermatol* 15(2): 130–137 (2006)
- [20] Frank S, Oliver L, Lebreton-De Coster C, Moreau C, Lecabelle MT, Michel L, Vallette FM, Dubertret L, Coulomb B. Infrared radiation affects the mitochondrial pathway of apoptosis in human fibroblasts. *J Invest Dermatol* 123(5): 823–831 (2004)
- [21] Fuchs SM, Fluhr JW, Bankova L, Tittelbach J, Hoffmann G, Elsner P. Photodynamic therapy (PDT) and waterfiltered infrared A (wIRA) in patients with recalcitrant common hand and foot warts. *Ger Med Sci* 2: Doc08 (2004). www.egms.de/pdf/gms/2004-2/000018.pdf und www.egms.de/en/gms/2004-2/000018.shtml
- [22] Ganz RA, Viveiros J, Ahmad A, Ahmadi A, Khalil A, Tolckoff MJ, Nishioka NS, Hamblin MR. Helicobacter pylori in patients can be killed by visible light. *Lasers Surg Med* 36(4): 260–265 (2005)
- [23] Geißler E, Schumann H. Wassergefiltertes Infrarot A (wIRA) bei ulzerierter Morphea. *Z Wundheilung* 13(3): 177–180 (2009)
- [24] Gebbers N, Hirt-Burri N, Scaletta C, Hoffmann G, Applegate LA. Water-filtered infrared-A radiation (wIRA) is not implicated in cellular degeneration of human skin. *GMS Ger Med Sci* 5: Doc08 (2007). www.egms.de/pdf/gms/2007-5/000044.pdf und www.egms.de/en/gms/2007-5/000044.shtml
- [25] Hamblin MR, Viveiros J, Yang C, Ahmadi A, Ganz RA, Tolckoff MJ. Helicobacter pylori accumulates photoactive porphyrins and is killed by visible light. *Antimicrob Agents Chemother* 49(7): 2822–2827 (2005)
- [26] Hartel M, Hoffmann G, Wente MN, Martignoni ME, Büchler MW, Friess H. Randomized clinical trial of the influence of local water-filtered infrared A irradiation on wound healing after abdominal surgery. *Br J Surg* 93(8): 952–960 (2006)
- [27] Hartel M, Illing P, Mercer JB, Lademann J, Daeschlein G, Hoffmann G. Therapy of acute wounds with water-filtered infrared-A (wIRA) (review). *GMS Krankenhaushyg Interdiszip* 2(2): Doc53 (2007). www.egms.de/pdf/journals/dgkh/2007-2/dgkh000086.pdf und www.egms.de/en/journals/dgkh/2007-2/dgkh000086.shtml
(Englisch mit ausführlicher deutscher Zusammenfassung)
- [28] Hauptenthal H. In vitro- und in vivo-Untersuchungen zur temperaturgesteuerten Arzneistoff-Liberation und Permeation. Dissertation an der Johannes Gutenberg-Universität, Mainz (1997)

- [29] Hellige G, Becker G, Hahn G. Temperaturverteilung und Eindringtiefe wassergefilterter Infrarot-A-Strahlung. In: Vaupel P, Krüger W (Hrsg.) Wärmetherapie mit wassergefilterter Infrarot-A-Strahlung. Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten. 2. Aufl. Stuttgart: Hippokrates, S. 63–79 (1995)
- [30] Hoffmann G. Improvement of wound healing in chronic ulcers by hyperbaric oxygenation and by waterfiltered ultrared A induced localized hyperthermia. *Adv Exp Med Biol* 345: 181–188 (1994)
- [31] Hoffmann G. Improvement of regeneration by local hyperthermia induced by waterfiltered infrared A (wIRA). *Int J Sports Med* 23 Suppl 2: S145 (2002)
- [32] Hoffmann G. Wassergefiltertes Infrarot A (wIRA) zur Verbesserung der Wundheilung (Übersichtsarbeit). *GMS Krankenhaushyg Interdiszip* 1(1): Doc20 (2006).
www.egms.de/pdf/journals/dgkh/2006-1/dgkh000020.pdf und
www.egms.de/en/journals/dgkh/2006-1/dgkh000020.shtml
- [33] Hoffmann G. Principles and working mechanisms of water-filtered infrared-A (wIRA) in relation to wound healing (review). *GMS Krankenhaushyg Interdiszip* 2(2): Doc54 (2007).
www.egms.de/pdf/journals/dgkh/2007-2/dgkh000087.pdf und
www.egms.de/en/journals/dgkh/2007-2/dgkh000087.shtml
(Englisch mit ausführlicher deutscher Zusammenfassung)
- [34] Hoffmann G. Klinische Anwendungen von wassergefiltertem Infrarot A (wIRA). In: Kaase H, Serick F (Hrsg.) Sechstes Symposium »Licht und Gesundheit«. Eine Sondertagung der Technischen Universität Berlin und der Deutschen Gesellschaft für Photobiologie mit der Deutschen Akademie für Photobiologie und Phototechnologie und der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft, 13.–14.03.2008 in Berlin, S. 130–146 (2008). Auch online: <http://publikationen.ub.uni-frankfurt.de/volltexte/2008/5484/>
- [35] Hoffmann G. Wassergefiltertes Infrarot A (wIRA). In: Kramer A, Assadian O (Hrsg.) Wallhäußers Praxis der Sterilisation, Desinfektion, Antiseptik und Konservierung. Qualitätssicherung der Hygiene in Industrie, Pharmazie und Medizin. Thieme, Stuttgart, S. 899–900 (2008). Auch online: <http://publikationen.ub.uni-frankfurt.de/volltexte/2009/6135/>
- [36] Hoffmann G. Wassergefiltertes Infrarot A (wIRA) zur Verbesserung der Wundheilung bei akuten und chronischen Wunden. *Wundmanagement* 2: 72–80 (2008). Auch online: <http://publikationen.ub.uni-frankfurt.de/volltexte/2008/5429/>
- [37] Hoffmann G. Wassergefiltertes Infrarot A (wIRA) in der Wundbehandlung: Interview; 3 Fragen an Prof. Dr. med. Gerd Hoffmann. *Heilberufe* 61(7): 14 (2009). Auch online: <http://publikationen.ub.uni-frankfurt.de/volltexte/2009/6802/>
- [38] Hoffmann G. Water-filtered infrared-A (wIRA) in acute and chronic wounds (bilingual review). Wassergefiltertes Infrarot A (wIRA) bei akuten und chronischen Wunden (zweisprachige Übersichtsarbeit). *GMS Krankenhaushyg Interdiszip* 4(2): Doc12 (2009).

www.egms.de/pdf/journals/dgkh/2009-4/dgkh000137.pdf und

www.egms.de/en/journals/dgkh/2009-4/dgkh000137.shtml

- [39] Hoffmann G. Wassergefiltertes Infrarot A (wIRA) für die Wundheilung. *vasomed* 22: 156–158 (2010). <http://publikationen.ub.uni-frankfurt.de/volltexte/2010/7881/>
- [40] Hoffmann G. Wassergefiltertes Infrarot A in Chirurgie, Dermatologie, Sportmedizin und weiteren Bereichen. In: Krause R, Stange R (Hrsg): *Lichttherapie*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2012, S. 25-54 (2012). ISBN 13: 978-3-642-16938-0. Auch online: <http://publikationen.ub.uni-frankfurt.de/frontdoor/index/index/docId/24171> ; URN: urn:nbn:de:hebis:30:3-241715
- [41] Hoffmann G, Buslau M. Treatment of skin diseases by hyperbaric oxygenation. In: Cramer FS (ed.) *Proceedings of the Eleventh International Congress on Hyperbaric Medicine*. Best Publishing Company, Flaggstaff, USA, p. 20–21, 153–159 (1995)
- [42] Hoffmann G, Meffert H. Apparent contradiction between negative effects of UV radiation and positive effects of sun exposure. *GMS Ger Med Sci* 3: Doc01 (2005). www.egms.de/pdf/gms/2005-3/000019.pdf und www.egms.de/en/gms/2005-3/000019.shtml
- [43] Hopf HW, Hunt TK, West JM, Blomquist P, Goodson WH III, Jensen JA et al. Wound tissue oxygen tension predicts the risk of wound infection in surgical patients. *Arch Surg* 132: 997–1004 (1997)
- [44] Horwitz LR, Burke TJ, Carnegie D. Augmentation of wound healing using monochromatic infrared energy. Exploration of a new technology for wound management. *Adv Wound Care* 12(1): 35–40 (1999)
- [45] Hübner K. Die Photo-dynamische Therapie (PDT) der aktinischen Keratosen, Basalzellkarzinome und Plantarwarzen. *derm – Praktische Dermatologie* 11(4): 301–304 (2005)
- [46] Jünger M, Hahn M, Klyszcz T, Steins A. Role of microangiopathy in the development of venous leg ulcers. *Progr Appl Microc* 23: 180–193 (1999)
- [47] Jung T, Höhn A, Piazena H, Grune T. Effects of water-filtered infrared A irradiation on human fibroblasts. *Free Radic Biol Med* 48: 153–160 (2010)
- [48] Karu TI. Primary and secondary mechanisms of action of visible to near-IR radiation on cells (review). *J Photochem Photobiol B* 49(1): 1–17 (1999)
- [49] Karu TI. Low-power laser effects. In: Waynant RW (ed.) *Lasers in medicine*. Boca Raton: CRC Press, p. 171–209 (2002)
- [50] Karu TI. Mitochondrial signaling in mammalian cells activated by red and near-IR radiation. *Photochem Photobiol* 84: 1091–1099 (2008)
- [51] Karu TI. Mitochondrial mechanisms of photobiomodulation in context of new data about multiple roles of ATP. *Photomed Laser Surg* 28(2): 159–160 (2010)

- [52] Karu TI. Multiple roles of cytochrome c oxidase in mammalian cells under action of red and IR-A radiation (critical review). *IUBMB Life* 62(8): 607–610 (2010)
- [53] Karu TI, Pyatibrat LV, Kalendo GS. Cell attachment modulation by radiation from a pulsed light diode ($\lambda = 820$ nm) and various chemicals. *Lasers Surg Med* 28(3): 227–236 (2001)
- [54] Karu TI, Pyatibrat LV, Kalendo GS. Cell attachment to extracellular matrices is modulated by pulsed radiation at 820 nm and chemicals that modify the activity of enzymes in the plasma membrane. *Lasers Surg Med* 29(3): 274–281 (2001)
- [55] Karu TI, Pyatibrat LV, Kalendo GS. Donors of NO and pulsed radiation at $\lambda = 820$ nm exert effects on cell attachment to extracellular matrices. *Toxicol Lett* 121(1): 57–61 (2001)
- [56] Kato M, Sinizawa K, Yoshikawa S. Cytochrome c oxidase is a possible photoacceptor in mitochondria. *Photochem Photobiophys* 2: 263–269 (1981)
- [57] Kivisaari J, Vihersaari T, Renvall S, Niinikoski J. Energy metabolism of experimental wounds at various oxygen environments. *Ann Surg* 181: 823–828 (1975)
- [58] Knighton DR, Silver IA, Hunt TK. Regulation of wound-healing angiogenesis – effect of oxygen gradients and inspired oxygen concentration. *Surgery* 90: 262–270 (1981)
- [59] Kühne HH, Ullmann U, Kühne FW. New aspects on the pathophysiology of wound infection and wound healing – the problem of lowered oxygen pressure in the tissue. *Infection* 13(2): 52–56 (1985)
- [60] Lambrechts SA, Demidova TN, Aalders MC, Hasan T, Hamblin MR. Photodynamic therapy for *Staphylococcus aureus* infected burn wounds in mice. *Photochem Photobiol Sci* 4(7): 503–509 (2005)
- [61] Maisch T. Anti-microbial photodynamic therapy: useful in the future? *Lasers Med Sci* 22: 83–91 (2007). DOI: 10.1007/s10103-006-0409-7
- [62] Marks C, Schumann H. Wassergefiltertes Infrarot A in der Wundtherapie bei kutaner sklerodermie Graft-versus-Host Erkrankung. *Z Wundheilung* 15: Suppl. B, 83 (2011).
- [63] Melling AC, Ali B, Scott EM, Leaper DJ. Effects of preoperative warming on the incidence of wound infection after clean surgery: a randomised controlled trial. *Lancet* 358(9285): 876–880 (2001)
- [64] Menezes S, Coulomb B, Lebreton C, Dubertret L. Non-coherent near infrared radiation protects normal human dermal fibroblasts from solar ultraviolet toxicity. *J Invest Dermatol* 111(4): 629–633 (1998)
- [65] Mercer JB, de Weerd L. The effect of water-filtered infrared-A (wIRA) irradiation on skin temperature and skin blood flow as evaluated by infrared thermography and scanning laser Doppler imaging. *Thermology Int* 15(3): 89–94 (2005)

- [66] Mercer JB, Nielsen SP, Hoffmann G. Improvement of wound healing by water-filtered infrared-A (wIRA) in patients with chronic venous stasis ulcers of the lower legs including evaluation using infrared thermography. *GMS Ger Med Sci* 6: Doc11 (2008).
www.egms.de/pdf/gms/2008-6/000056.pdf und www.egms.de/en/gms/2008-6/000056.shtml
- [67] Möckel F, Hoffmann G, Obermüller R, Drobnik W, Schmitz G. Influence of water-filtered infrared-A (wIRA) on reduction of local fat and body weight by physical exercise. *GMS Ger Med Sci* 4: Doc05 (2006). www.egms.de/pdf/gms/2006-4/000034.pdf und www.egms.de/en/gms/2006-4/000034.shtml
- [68] Müller W. Infrarot A der Sonne schädigt die Haut nicht. The Sun's infrared-A is not detrimental to the skin. Pressemitteilung der Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften AWMF im Informationsdienst Wissenschaft idw (15.07.2010).
www.idw-online.de/de/news379477 (deutsch) und www.idw-online.de/en/news379479 (englisch)
- [69] Niinikoski J, Gottrup F, Hunt TK. The role of oxygen in wound repair. In: Janssen H, Rooman R, Robertson JIS (eds.) *Wound healing*. Petersfield: Wrightson Biomedical Publishing, p. 165–174 (1991)
- [70] Otberg N, Grone D, Meyer L, Schanzer S, Hoffmann G, Ackermann H, Sterry W, Lademann J. Waterfiltered infrared-A (wIRA) can act as a penetration enhancer for topically applied substances. *GMS Ger Med Sci* 6: Doc08 (2008). www.egms.de/pdf/gms/2008-6/000053.pdf und www.egms.de/en/gms/2008-6/000053.shtml
- [71] Pascoe DD, Mercer JB, de Weerd L. Physiology of thermal signals. In: Bronzino JD (ed.) *Biomedical Engineering Handbook*, 3rd edition. Boca Raton: Taylor and Francis Group, CRC press, p. 21-1–21-20 (2006)
- [72] Pediani R. What has pain relief to do with acute surgical wound healing? *World Wide Wounds* 2001 (2001). www.worldwidewounds.com/2001/march/Pediani/Painrelief-surgical-wounds.html
- [73] Piazena H, Kelleher DK. Effects of infrared-A irradiation on skin: discrepancies in published data highlight the need for an exact consideration of physical and photobiological laws and appropriate experimental settings. *Photochem Photobiol* 86(3): 687–705 (2010)
- [74] Piazena H, Meffert H. Optische Eigenschaften der Haut und die photobiologischen Grundlagen zur Dosierung von IR-Hautbestrahlungen in vivo und in vitro. In: Kaase H, Serick F (Hrsg.) *Sechstes Symposium »Licht und Gesundheit«*. Eine Sondertagung der Technischen Universität Berlin und der Deutschen Gesellschaft für Photobiologie mit der Deutschen Akademie für Photobiologie und Phototechnologie und der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft, 13.–14.03.2008 in Berlin, S. 162–178 (2008)

- [75] Plattner O, Akca O, Herbst F, Arkilic CF, Függer R, Barlan M, Kurz A, Hopf H, Werba A, Sessler DI. The influence of 2 surgical bandage systems on wound tissue oxygen tension. *Arch Surg* 135(7): 818–822 (2000)
- [76] Prigogine I. Chaos and the Law of Nature. Chaos und Naturgesetze. Vortrag in der Fernsehreihe Tele-Akademie. 3sat (Deutschland, Österreich, Schweiz). 2007-04-29, 07.15–08.00 (2007). (Vortrag des Präsidenten der Internationalen Akademie der Wissenschaften, ursprünglich gehalten 1994 in Stuttgart/Deutschland)
- [77] Rzeznik J. Die Technik zur loko-regionalen Wärmetherapie mit wassergefilterter Infrarot-A-Strahlung. In: Vaupel P, Krüger W (Hrsg.) Wärmetherapie mit wassergefilterter Infrarot-A-Strahlung. Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten. 2. Aufl. Stuttgart: Hippokrates, S. 29–46 (1995)
- [78] Schumann H, Calow T, Weckesser S, Müller ML, Hoffmann G. Water-filtered infrared A for the treatment of chronic venous stasis ulcers of the lower legs at home: a randomized controlled blinded study. *Br J Dermatol* 165: 541–551 (2011)
- [79] Stofft E, Vaupel P. Wassergefilterte Infrarot-A-Strahlung versus Fango-Paraffin-Packung: Temperaturprofile bei lokoregionaler Wärmetherapie. *Phys Rehab Kur Med* 6: 7–11 (1996)
- [80] Vaupel P, Rzeznik J, Stofft E. Wassergefilterte Infrarot-A-Strahlung versus konventionelle Infrarotstrahlung: Temperaturprofile bei lokoregionaler Wärmetherapie. *Phys Rehab Kur Med* 5: 77–81 (1995)
- [81] Vaupel P, Stofft E. Wassergefilterte Infrarot-A-Strahlung im Vergleich zu konventioneller Infrarotstrahlung oder Fango-Paraffin-Packungen: Temperaturprofile bei lokaler Wärmetherapie. In: Vaupel P, Krüger W (Hrsg.) Wärmetherapie mit wassergefilterter Infrarot-A-Strahlung. Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten. 2. Aufl. Stuttgart: Hippokrates, S. 135–147 (1995)
- [82] von Felbert V, Hoffmann G, Hoff-Lesch S, Abuzahra F, Renn CN, Braathen LR, Merk HF. Photodynamic therapy of multiple actinic keratoses: Reduced pain through use of visible light plus water-filtered infrared-A (wIRA) compared to light from light-emitting diodes. *Br J Dermatol* 163(3): 607–615 (2010)
- [83] von Felbert V, Kernland-Lang K, Hoffmann G, Wienert V, Simon D, Hunziker T. Irradiation with water-filtered infrared-A (wIRA) plus visible light improves cutaneous scleroderma lesions in a series of cases. *Dermatology* 222: 347–357 (2011)
- [84] von Felbert V, Schumann H, Mercer JB, Strasser W, Daeschlein G, Hoffmann G. Therapy of chronic wounds with water-filtered infrared-A (wIRA) (review). *GMS Krankenhaushyg Interdiszip* 2(2): Doc52 (2007). www.egms.de/pdf/journals/dgkh/2008-2/dgkh000085.pdf und www.egms.de/en/journals/dgkh/2008-2/dgkh000085.shtml (Englisch mit ausführlicher deutscher Zusammenfassung)

- [85] von Felbert V, Simon D, Braathen LR, Megahed M, Hunziker T. Behandlung einer linearen Sklerodermie mit wassergefilterter Infrarot-A-Strahlung. *Hautarzt* 58: 923–924 (2007)
- [86] von Weizsäcker CF. Die Philosophie eines Physikers. Vortrag in der Fernsehreihe Tele-Akademie. 3sat (Deutschland, Österreich, Schweiz). 2007-04-08, 07.15–08.00 (2007). (Vortrag ursprünglich gehalten 1992 in der Universität Bamberg/Deutschland)
- [87] Wright J. Hyperbaric oxygen therapy for wound healing. *World Wide Wounds* (2001).
www.worldwidewounds.com/2001/april/Wright/HyperbaricOxygen.html

Weltraummedizin

Prof. Dr. Hanss-Christian Gunga

Zentrum für Weltraummedizin (ZWMB)

Zusammenfassung

Beim Menschen kommt es unter Mikro-g Bedingungen zu Flüssigkeitsverlagerungen entlang der Körperachse („fluid shifts“) und damit verbunden sowohl zu Anpassungsreaktionen im Herz-Kreislaufsystem als auch zu Veränderungen der Temperaturregulation und des Wärmehaushalts. Zur Analyse insbesondere der thermophysiological Veränderungen wurde in den zurückliegenden Jahren an der Charité in Zusammenarbeit mit dem Drägerwerk in Lübeck das Thermo^{Lab} System entwickelt, das sich z.Zt. im Einsatz auf der Internationalen Raumstation (ISS) befindet. Dieses Thermo^{Lab} System ermöglicht nicht nur eine kurzzeitige, nicht-invasive Erfassung der Körperkerntemperatur mit Hilfe eines neuartigen Wärmeflussensors („Doppelsensor“) bei leistungsphysiologischen Tests am wachen Menschen, sondern kann auch zu kontinuierlichen Kerntemperaturmessungen für chronobiologische Forschung (*Thermo^{Chrono}*) genutzt werden. Dies wurde im Rahmen verschiedener Studien unter simulierten (Bed rest, MARS 500) und realen Mikro-g Bedingungen (Parabelflug, ISS) überprüft, die im Vortrag detailliert behandelt werden sollen.

Entsprechende thermophysiological Studien sind in der Weltraummedizin notwendig, da bislang i) die Mechanismen der kardio-vaskulären Anpassungen bei thermischem Stress im All, insbesondere bei physischen Belastungen (z.B. Training) noch nicht hinreichend erforscht sind, ii) Messungen zur circadianen Rhythmik der Körperkerntemperatur beim Menschen in Schwerelosigkeit nahezu vollständig fehlen und iii) bei entsprechenden Veränderungen im Rahmen von Langzeitaufenthalten im All negative Rückwirkungen auf die generelle Leistungsfähigkeit als auch das Wohlbefinden der Astronauten nicht auszuschließen sind. Darüberhinaus soll die mögliche Bedeutung dieses neuartigen Wärmeflussensors für eine nicht-invasive Körperkerntemperaturmessung im klinischen Alltag aufgezeigt werden.

Psychophysical Experiments with Related Photopic and Mesopic Lights

Steffi Burmeister, Werner Backhaus

Technische Universität Berlin and Freie Universität Berlin AG Psychophysiology, Flachbau
HFT-CO, Einsteinufer 25, 10587 Berlin

1 Introduction

Psychophysical experiments with related lights (patterns) will allow for a more detailed understanding of the visual system in respect to natural as well as artificial light-scenery, at photopic and mesopic intensity levels. The results will be especially helpful for the extension of the psychophysiological models of photopic and mesopic vision to the spatial and temporal domain, including effects of adaptation (see Backhaus, this volume) [1]. In a first approach, classical experiments of Helson (1938) [2], originally performed with monochromatic light, have been exemplarily repeated now on calibrated 21" monitors. Approximate RGB-values have been calculated that cause lights comparable to the lights, reflected by Helson's 16 achromatic plates and 3 achromatic backgrounds, with different reflectance, illuminated by monochromatic light. The influence of the chromatic adaptation-light on the colors of the plates, simulated on the monitors, has been investigated now with a further advantage: the observer (S. B.) has performed the judgments of the color sensations, according to Hering (1920) [4], in terms of the amounts of the achromatic elementary color sensations black and white, and chromaticness (saturation), i.e. the total amount of the four chromatic elementary colors red, green, blue, and yellow. The observer has judged the amounts directly as percentages and has looked up the color plate and the respective amounts in the NCS atlas [5], closest to the seen color. In the case, the amounts have been determined by linear inter- and extrapolation. Since the observed color shifts need a certain time of adaptation to occur, every subject in Helson's experiment had to adapt for 15 minutes in a box, measuring 6" x 6" x 7" with white walls of a reflectance close to 1, constantly illuminated by monochromatic light. 16 plates of a gray-scale were presented in the box to the observer, on three different achromatic backgrounds with a reflectance of 0, 0.5, and 1. The observer judged the colors of the plates in terms of the Munsell Color Notation System, they were trained to use. The experimenter outside the box recorded the judgments of the observer. 1) Plates that possess a higher reflectance than the back-

ground do not look achromatic, but show the color of the illuminating light (e.g. green light), differently bright and saturated; 2) plates that possess a lower reflectance than the background show roughly the color of the complementary (to white) light, e.g. purple, differently bright and saturated; 3) plates with a reflectance between both the cases look almost achromatic gray, with respective brightness. Judd (1940) [3] described and explained these results and own data (Helson-Judd-Effect) by mathematical formulae.

2 Results

2.1 The Helson-Judd-Effect on Computer Monitors

The presented experiments have been performed on a 21" EIZO-CRT-monitor and, partly, on a 21" BenQ-TFT-monitor, steered and protocolled by self-written PowerBASIC programs, running under Windows XP on a PC. The RGB-values of the colored background have been determined, as if a broad-band light (e.g. a monitor-phosphor) would illuminate an achromatic surface of a certain achromatic reflectance. The subject adapted for a pre-set time to the strongest possible light (e.g. $G_{\max} = 255$, simulating the reflectance 1 of the box). The experiments have shown that an adaptation time of 3 minutes is sufficient for bright lights in the range of 500 - 600 nm, 5 minutes for red light, whereas for a blue light even more time is required (and the effect is still quite weak). Longer adaptation times do

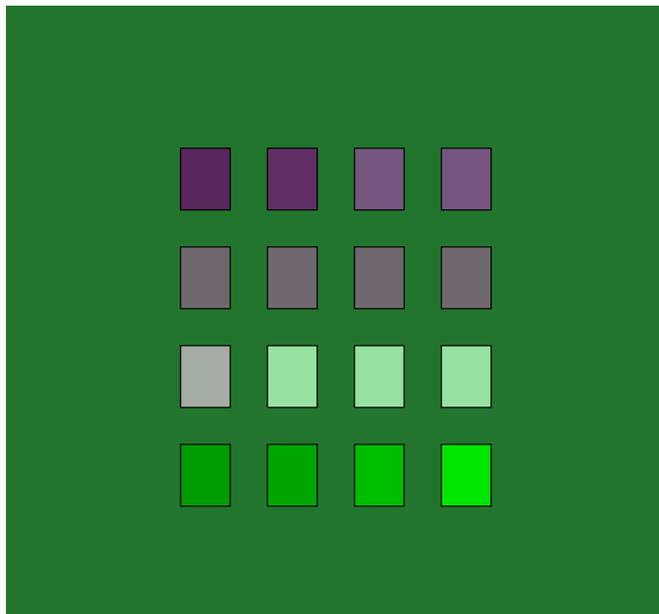


Fig.1 Color pattern that instantly evokes colors, comparable to those seen in the experiment after three 3 min. of adaptation to a maximum green light intensity ($G = 255$), looking at 16 plates with different green light intensities ($G = 25 - 228$) on a green background ($G = 127$). (See text).

not change the color sensation further, but the duration of the effect. The light intensities, reflected by the 16 gray plates and the three achromatic backgrounds, illuminated in Helson's experiments with monochromatic light, have been transformed into respective RGB-values now, taking the gamma-function ($\gamma = 2$) of the computer monitors into account. For example, $G = 228$ ($G_{\max} = 255$) corresponds to a relative reflected light intensity of 80%. **Fig. 1** provokes an instant impression of what the 16 plates in the experiment look like on a medium- gray background, illuminated by the green adaptation-light, after 3 minutes of adaptation ($G = 255$). The first plate in the third row causes a sensation close to achromatic. The corresponding reflected light intensity is close but different to that of the background. As reported by Helson (1938) [2] for monochromatic light, we have seen now even on computer monitors, with broad band light emitting phosphors 1) a gradient of saturated dark purples, as would be caused approximately by a complementary (to white) light to the illuminating adaptation light, 2) an achromatic range, and 3) a gradient of brighter green colors similar to the color of the illuminating light.

2.2 Extension of the adaptation experiments to the mesopic range

Encouraged by the presented results, the experiments have been now, in addition, extended to mesopic intensity levels (see **Fig. 2**). For this purpose only one dark green plate ($G = 17$) has been presented now, and the background varied with 8 different G-values, ranging from black to a middle gray. 1) With increasing background intensity, the first two G-

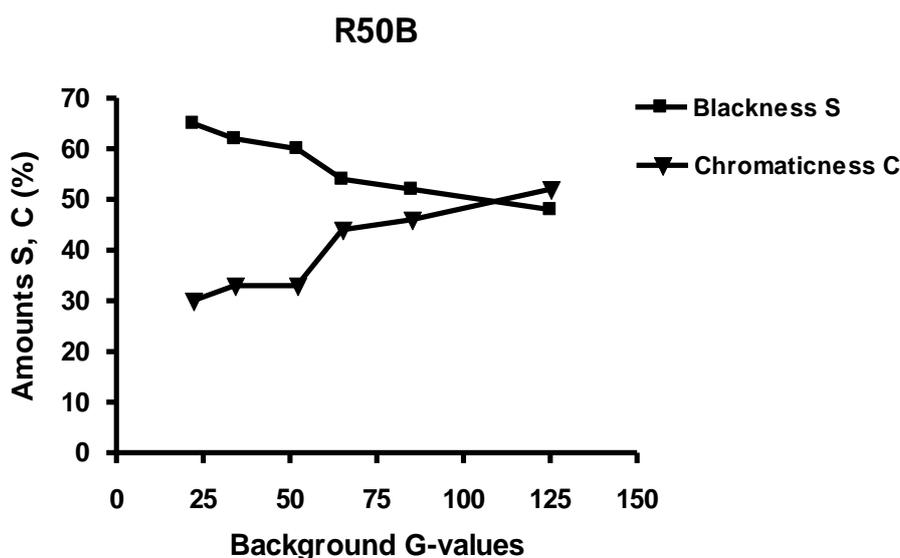


Fig. 2 Measured color shifts of an achromatic plate with const. RGB-values (0, 17, 0), due to different background G-values, after 3 min. adaptation to max. green-light ($G = 255$). (See text).

values < 17 (not shown) evoke colors of the plate similar to the color of the illuminating light, because the background is darker than the plate in this case. 2) With increasing G-values, the purple color of the plate becomes less dark and more saturated. After 3 min. adaptation to the green light of maximum intensity ($G = 255$), the variation of the color of the plate with increasing relative light intensity of the 8 different backgrounds has been judged as amounts of elementary colors in terms of the NCS color notation. The NCS-chart R50B (50% red, 50% blue) shows various shades of purple. The amounts of blackness S and chromaticness C have been determined from the chart by inter- and extrapolation. For the highest light intensity presented ($G = 125$), the closest color to that of the plate is denoted as NCS S 4852 - R50B, i.e. $S = 48\%$, $C = 52\%$, $R = 24\%$, and $B = 24\%$. Chromaticness C increases, whereas blackness S decreases with increasing background light intensity (**Fig. 2**). 4) The light intensity decreases also when the viewing distance to the monitor is increased relative to the normal viewing distance of 40 cm, because the light rays leave the pixels of the monitors angular distributed. Since the intensities of the background and the plate decrease, the color of the plate changes, comparable to the decreasing light-intensity combinations of the experiments presented above (**Fig. 1- 2**).

3 Conclusions and Outlook

The presented results show 1) that the Helson-Judd-effect can well be investigated on calibrated CRT- as well as TFT-monitors. 2) Since it is an adaptation effect, the time, necessary for full adaptation (steady state), depends on the spectral intensity distribution of the adaptation light. This time turned out to be much shorter than realized in Helson's classical experiments. 3) The strength of the effect depends also on the spectral composition of the light. 4) The color of the plates depends on the light intensity of the background; chromaticness C increases, while the amount of blackness S decreases with increasing light intensity. 5) The effect is limited by the maximum achievable intensity and thus depends on the calibration of the monitor. These experiments will be continued with especial emphasis on the adaptation processes involved. The results provide a basis for our further investigations toward more complex light-scenery under photopic and mesopic light-conditions.

Acknowledgements

This research is part of the fundamental research project "Measurement and Simulation of Photopic and Mesopic Vision", funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF-13N10915).

Literatur

- [1] W. Backhaus, Spectral measurement of photopic and mesopic light, (this volume)
- [2] H. Helson, Fundamental problems in color vision. I. The principle governing changes in hue, saturation, and lightness of non-selective samples in chromatic illumination, J. Exper. Psychol. 23, 439-476 (1938)
- [3] D.B. Judd, Hue saturation and lightness of surface colors with chromatic illumination, J. Opt. Soc. Am. 30, 2-32 (1940)
- [4] E. Hering, Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn (Springer, Berlin, 1920), [translated by L.M. Hurvich and D. Jameson, Outline of a Theory of the Light Sense (Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1964)]
- [5] NCS - The Natural Color System (Scand. Colour Institute AB, Stockholm, 2007)

Spectral Measurement of Photopic and Mesopic Light

Werner Backhaus

Technische Universität Berlin and Freie Universität Berlin

1 Introduction

Light entering the human eye illuminates the retina and is partially absorbed in the photoreceptors by the respective rhodopsin molecules. The absorption of a photon is an all or nothing process, i.e. a photon is either absorbed completely or not at all. When a rhodopsin molecule R has actually absorbed a photon, R turns into the light excited form R^* , which is amplified by a biochemical phototransduction cascade. The final molecule type of the cascade opens thousands of ion channels in the membrane of the photoreceptor cell that vary the ion flux through the membrane and thus change the membrane voltage. The total electrical signal of the photoreceptor thus codes the number of photons absorbed by the rhodopsin molecules of the photoreceptor per time-unit.

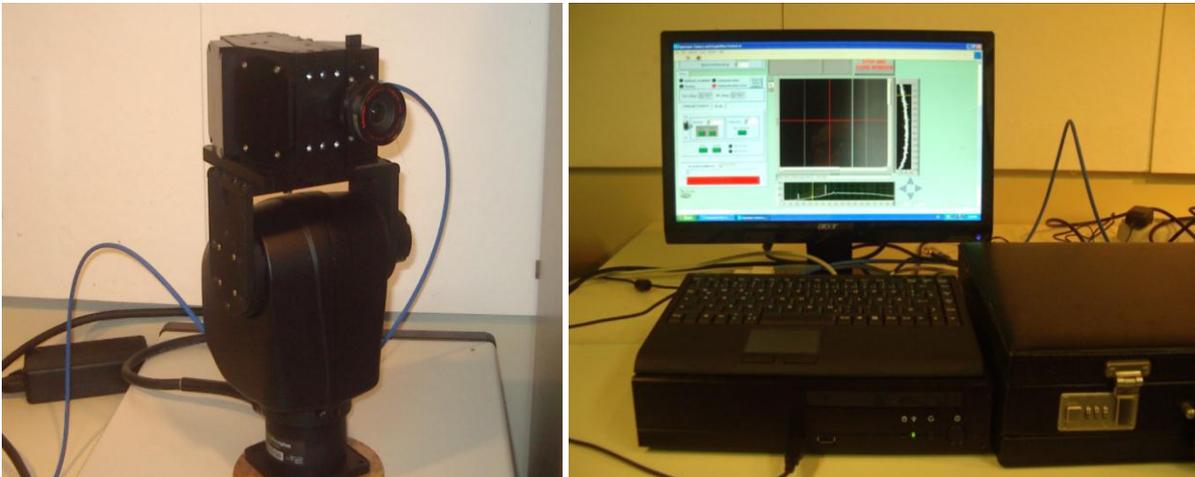
Therefore, photoreceptors count photons, i.e. determine the absorbed photon flux, which is independent of the energy of the individual photon. The probability for the absorption of a photon nevertheless depends on the spectral sensitivity $s(\lambda)$ of the respective rhodopsin molecules, which is a function of wavelength λ , but does not depend monotonically on the energy of the photon. Thus, a physiologically relevant physical measure of light, entering our eye, is the spatial and spectral light intensity distribution, measured in the directions θ , φ , in terms of photons / s / λ / cm^2 . For our purposes, a calibrated spectral CCD camera nowadays measures this best.

2 Results

2.1 Spectral Measurement System

A spectral camera system has been developed now for the measurement of the spatial and spectral light intensity distributions, entering the human eye. This includes the light stimuli presented in psychophysical experiments (e.g. critical stimuli at subjective thresholds) that can easily be measured, when the camera replaces the observer, and the objective takes the position and viewing direction of the lens of the respective eye. Mounted to a robust tripod that is adjustable in height, the camera system allows to measure light distributions, emitted or reflected by natural as well as artificial scenery. The core of the measurement system is a spectral CCD camera (**see Fig. 1**) with an optics that provides a light sensitivity and a spatial resolution comparable to that of the human eye.

The components of the spectral camera were especially selected and composed (Polytec GmbH, Berlin / Waldbronn, Germany; PCO Imaging AG, Kelheim, Germany; and Headwall Photonics, Inc., Fitchburg, MA, U.S.A.), according to the detailed description of our



*Fig. 1 Mobile spectral camera system for measuring the spatial and spectral light intensity distribution of arbitrary scenery, entering the eye of an observer. **Left:** CCD spectral camera with a low-light objective, and high light sensitivity, mounted on a θ and φ positioning device, driven by stepping-motors, mountable on a height adjustable tripod, and / or to a carriage. **Right:** The camera and the positioning device are steered by an especially build portable computer that also receives and stores the pictures of the spectral camera.*

scientific needs. The camera is attached to a fine-graded (θ , φ) positioning-device driven by two high precision stepping motors. The angular position of the spectral camera and the spectral measurement process are steered by an especially adapted measurement software, running on PCs under Windows XP. Since laptops do not provide all the ports necessary for communicating and steering the spectral camera via the provided measurement software, a portable computer has been especially manufactured for this purpose (ICP IEi Inventive Computer Products Deutschland GmbH, Reutlingen, Germany). A necessary condition, the spectral camera had especially to fulfill, is that the measured data are actually stored to hard disc in an open file-format, i.e. readable by self-written programs. This is to avoid cryptic formats, which on one hand save storage space, but on the other hand are exclusively readable with special software products that are usually not adaptable or modifiable by researchers to their specific scientific needs. The presented spectral camera system uses an open binary format, so that self-written programs can read and further process the measured files of arbitrary size.

2.2 Properties

Spectral camera

The spectral camera possesses a high light-sensitivity, low noise, and linear intensity-characteristics, and is thus best suited for measurements at photopic and mesopic intensity levels. The spectral camera has a spatial resolution $\leq 1'$, comparable to that of the fovea of the human eye, i.e. the central area of highest spatial resolution. The spectra can be measured in the range of 380 nm - 825 nm, in up to 0.6 nm steps.

Mobility

The spectral camera is mounted on a stepping-motor, driven by a θ and φ positioning device. The spectral camera system can be set onto a tripod, adjustable in height, and / or to a carriage, allowing for measurements at site in our laboratory. Because of the compact size and the small measures of the portable PC, the system can be easily transported. All electrical parts can be electrically supplied by conventional accumulators, which enables measurements outdoors.

Self-developed Software

The self-written PowerBASIC program executes under Windows XP on the portable PC of the spectral camera system. 1) Immediately after each measurement, the program derives a pixel-true black & white or RGB-color picture from the measured spectral data. This allows us to judge the quality of the respective spectral measurement on-site. 2) Larger pictures can be scrolled. 3) A special cursor allows for selecting specific pixels. An inset shows the selected measured light intensity spectrum with a calibrated nm-scale, and normalized relative to the first selected spectrum, e.g. the illuminant, reflected by a white standard, normalized to its maximum. The selected spectrum can be stored under the name of the measurement file, with the position of the x-y cursor automatically encoded. 4) The position of the respective pixel is marked and the entire picture is stored as a usual .bmp file.

3 Conclusions and Outlook

The presented spectral camera system allows for the measurement of angular and chromatic light distributions ($\text{photons} / \text{s} / \lambda / \text{cm}^2$) that enter the eye and illuminate the retina of the observers in psychophysical experiments (see Backhaus this volume [1];

Krensel & Backhaus, this volume [4]; Burmeister & Backhaus, this volume [5]). The measured light distributions, will be realized in simulations of the respective experiments, with the psychophysiological models of photopic and mesopic vision [1], [2], [3]. This will enable us to gauge the models 1) objectively in terms of absolute light intensities, as well as 2) subjectively in terms of the qualitative and quantitative properties of the respective color sensations (i.e. the amounts elementary colors, including hue, saturation, and brightness), and 3) to determine the parameters of the neuronal coding system for individual observers. 4) The models will be extended further to the spatial and temporal domain, 5) including adaptation processes, 6) to finally understand our visual system in detail from a neurobiological point of view. 7) The different stages of the psychophysiological models will finally become an integral part of the presented spectral camera system, allowing us to measure arbitrary natural and artificial light scenery, and precisely predicting judgments, comparable to individual human observers, without any restrictions to specific viewing conditions.

Acknowledgements

This research is part of the fundamental research project "Measurement and Simulation of Photopic and Mesopic Vision", funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF-13N10915)

Literature

- [1] W. Backhaus, Psychophysiological measurement and simulation of photopic and mesopic vision, (this volume)
- [2] W. Backhaus, Physiological and psychophysical simulations of color vision in humans and animals. In: Color Vision - Perspectives from Different Disciplines, eds. W. Backhaus, R. Kliegl, J.S. Werner, pp. 45-77 (De Gruyter, Berlin, 1998)
- [3] W. Backhaus, Psychophysiological Simulations of Spatial Color Vision: II. Light and Color Sensations. In: Sechstes Symposium Licht und Gesundheit, 13.-14.3.2008. Eine Sondertagung der TU Berlin und der DGP mit DAfP und LiTG, Hrsg. H. Kaase & F. Serick, Tagungsband, Hauptvorträge, pp. 57-69 (Technische Universität, Berlin, 2008)
- [4] A. Krensel, W. Backhaus, Computerized generation of photopic and mesopic light for psychophysical experiments, (this volume)
- [5] S. Burmeister, W. Backhaus, Psychophysical experiments with related photopic and mesopic lights, (this volume)

Mobiles Messsystem zur Gefährdungsbeurteilung von künstlich erzeugter Strahlung

Wolfgang Dähn, Dipl.-Ing (FH) Andreas Pietzsch
Gigahertz-Optik GmbH

1 Einleitung

In den Normen DIN EN 6247, DIN EN 14255 und der Verordnung 2006/25/EG sind keine eindeutigen Vorgaben über das zu verwendende Messmittel zu finden, um normgerecht Messwerte zu erheben. Das bedeutet, dass Spektralradiometer mit Doppelmonochromatoren, Einfachmonochromatoren, Diodenarray sowie integrierende Messgeräte zur Strahlungsmessung und Beurteilung zur Auswahl stehen. Mit Ausnahme der Doppelmonochromatoren und den integrierenden Messgeräten weisen die Technologien im UV-Bereich Probleme bezüglich Streulichtes auf. Es können deshalb mit Einfachmonochromatoren und Diodenarrayspektrometern keine belastbaren Messwerte im UV-Bereich erhoben werden. Die sogenannten integralen Messgeräte (mit ICNIRP Wichtungsfunktionen) unterscheiden sich in ihrer Messtechnologie zu den spektralen Messgeräten. Die hierbei verwendeten Sensoren sind durch den Einsatz von optischen Filtern an die spektrale Wichtungsfunktion angepasst. Vorteile dieser Technologie sind gegenüber der spektralen Messtechnik einfache Bedienbarkeit und die deutlich günstigeren Anschaffungskosten. Eine Einschränkung ist die höhere Messunsicherheit gegenüber spektralradiometrischen Doppelmonochromatoren. Diese resultiert aus der begrenzten Anpassungsgenauigkeit der Sensoren an die vorgegebenen Wichtungsfunktionen. Die Messunsicherheit kann allerdings durch konstruktiver Maßnahmen und Nutzung lampenspezifischer Kalibrierungen verbessert werden.

2 Untersuchung geeigneter Messmittel zur Gefährdungsbeurteilung

Es gibt verschiedene Normen, die das Vorgehen, die Grenzwerte und die Messgeräte zur Beurteilung von künstlich erzeugter Strahlung beschreiben. Das Vorgehen, die Wichtungsfunktionen (Abb.1) und die Grenzwerte sind überwiegend in allen Normen gleich, da sich diese auf die Vorgaben der ICNIRP [3+4] beziehen. Eine detaillierte Beschreibung über das Vorgehen zur Erhebung der Messwerte kann man in den

Normen DIN EN 14255 [2] und DIN EN 62741 [1] finden. Wichtigstes Kriterium für die technischen Anforderungen ist der zu erfassende Wellenlängenbereich und die geforderte Messdynamik der einzelnen Wichtungsfunktionen (Abb.1).

Im Folgenden werden die einzelnen technischen Lösungen und deren Tauglichkeit zur Gefährdungsbeurteilung beschrieben.

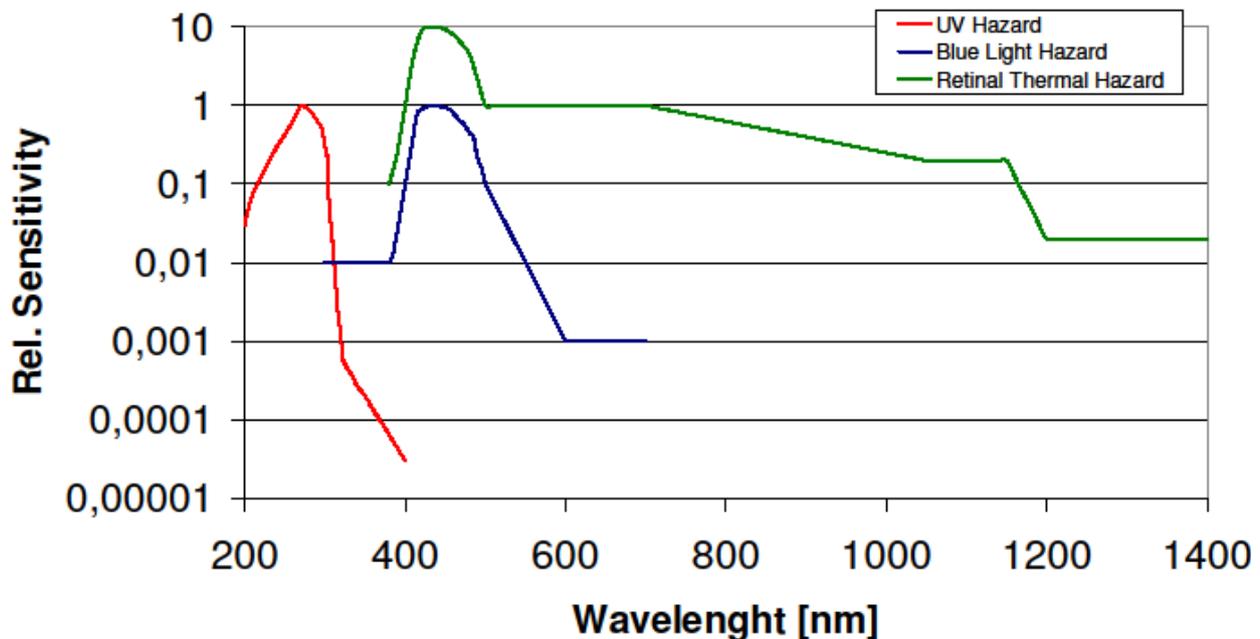


Abbildung 1: Wichtungsfunktionen der UV-, Blaulicht- und thermischen Netzhautgefährdung

2.1 Doppelmonochromator

Ein Doppelmonochromator besteht aus zwei in Reihe geschalteten Einfachmonochromatoren. Das eingekoppelte Licht bzw. die Strahlung wird am ersten Gitter gebeugt und in die spektralen Anteile zerlegt. Durch die geometrische Anordnung und der daraus resultierenden Reflektionen ist das Messsignal noch zu einem gewissen Grad mit dem Ursprungsspektrums vermischt. Diesen Effekt beschreibt man als Streustrahlung oder Streulicht. Dadurch, dass man dieses gemischte Licht durch einen weiteren Monochromator schickt, wird die Streustrahlung weiter unterdrückt. Deshalb kann bei Doppelmonochromatoren eine Messdynamik von sechs Dekaden erreicht werden.

Die Messdynamik in Verbindung mit einem hochwertigen Photomultiplier und das gute Signal-Rausch Verhältnis machen dieses System zu dem genauesten Messgerät in der Licht- und Strahlungsanalyse. Neben diesen Vorteilen haben diese Systeme auch Nachteile. Zum einen lassen sie wegen der langen Messzeit keine Kurzzeitmessung zu.

Das bedeutet, dass nur zeitlich stabile Licht- und Leuchtquellen vermessen werden können. Zum anderen weisen diese Geräte eine große Bauform auf und der Bediener muss gewisse Kenntnisse für die optische Messtechnik aufweisen können. Diese und weitere technische Eigenschaften sind dafür verantwortlich, dass diese Messsysteme einen sehr hohen Preis bei der Anschaffung und beim Betrieb haben.

2.2 Einfachmonochromator und Diodenarrayspektrometer

Einfachmonochromatoren und Diodenarrayspektrometer basieren auf demselben physikalischen Prinzip wie ein Doppelmonochromator. Das Licht bzw. die Strahlung wird in das Gerät eingekoppelt und trifft auf ein optisches Gitter und wird auf diese Weise in die spektralen Anteile zerlegt. Die quasi monochromatische Strahlung wird durch einen Spalt zur Auswertung auf einen Detektor geführt.

Das Diodenarrayspektrometer arbeitet meist mit einem Diodenarray, auf welches die gebeugte Strahlung trifft. Jedem Pixel auf diesem Diodenarray wird ein Wellenlängenbereich zugewiesen. Zusammengesetzt ergibt sich das gemessene Spektrum.

Wie bei jedem anderen Messsystem wird das Messergebnis vom Signal- zu Rausch Verhältnis bestimmt. Die Geometrien der Einfachmonochromatoren und Diodenarrays verursachen, dass nicht nur der monochromatische Anteil auf den Detektor trifft, sondern auch ein Teil des gesamten Strahlungsspektrums. Dieser Effekt wird durch Reflexionen am Innenleben der Messsysteme verursacht. Dieses sogenannte Streulicht ist dafür verantwortlich, dass im Verhältnis zum gesamten eingestrahlt Licht, geringes Licht, wegen dieser Überlagerung, nicht mehr aufgelöst werden können. Bei Einfachmonochromatoren kann eine Messdynamik von drei Dekaden erreicht werden. Bei einem Diodenarray wird wegen der größeren Arrayabmessung eine größere interne Blendenöffnung benötigt. Zudem fällt auf alle Dioden des Diodenarrays das Streulicht. Die dadurch sehr geringe Dynamik ist im UV-Bereich problematisch, da die Intensität der UV Strahlung meist nur einen kleinen Bruchteil der Gesamtstrahlung ausmacht. Durch diese Einschränkung sind beide Systeme nur bedingt geeignet um eine Gefährdungsbeurteilung im UV-Bereich durchzuführen.

2.3 Integrierende Messgeräte

Integrierende Messgeräte sind Messgeräte, die aus einer oder mehreren Photodioden als Grundempfänger bestehen. Diese Photodioden werden mit Hilfe von Filtern an die vorgegebenen Wichtungsfunktionen angepasst.

Die nachzubildende UV Wichtungsfunktion nach ICNIRP [3] Vorgaben umfasst ein breites Wellenlängenspektrum (200-400nm). Die Kante im Übergang vom UVB zum UVA Bereich überstreicht vier Dekaden in der Dynamik. Dies mit einer einzelnen Photodiode und mit optischen Filter nachzubilden, ist eine schwierige Herausforderung und nur durch großen Aufwand realisierbar. Meist weisen diese Lösungen eine größere Abweichung von der Sollkurve auf. Diese Abweichungen tragen zur Messunsicherheit bei. Je nach Wellenlängenbereich und den spektralen Eigenschaften der zur vermessenden Strahlungsquelle kann dies zu erheblichen Abweichungen führen. Eine Möglichkeit zur Reduzierung der Messunsicherheit besteht darin, die Wichtungsfunktion in Wellenlängenbereiche zu unterteilen und durch mehrere gefilterte Photodioden nachzubilden (Abb.2).

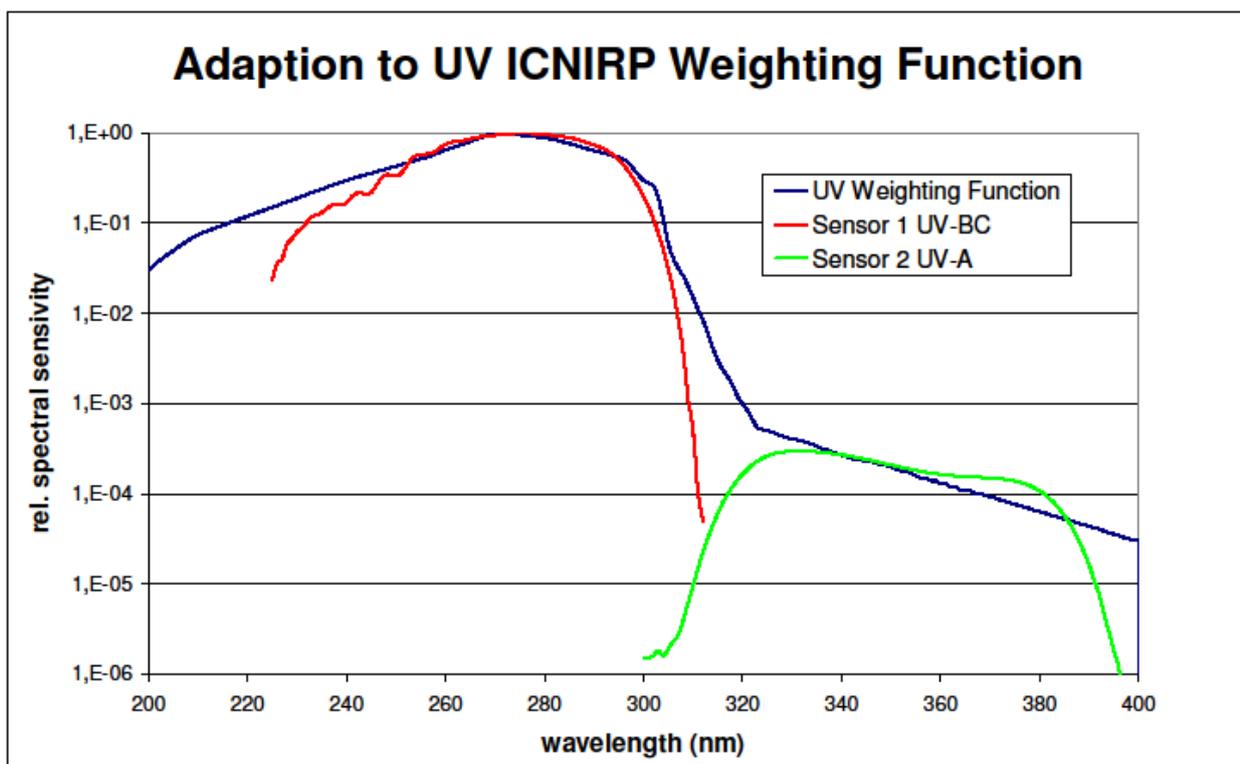


Abbildung 2: Nachempfindung der UV Wichtungsfunktion nach ICNIRP Vorgabe durch zwei gefilterte Photodioden

Die Photodiodenempfindlichkeit lässt sich so genauer an die Wichtungsfunktion anpassen und so der Anpassungsfehler reduzieren. Als Ergebnis wird die Messgenauigkeit erhöht. Zudem hat diese Lösung den Vorteil, dass man Informationen der verschiedenen Spektralbereiche erhält. So kann z.B. eine Aussage darüber getroffen werden, ob, wie viel und in welchem Verhältnis der gemessene UV-A und UV-B Strahlungsanteil vorliegt.

Zusätzlich zu der begrenzten Anpassungsgenauigkeit ist der spektrale Unterschied der zu vermessenden Quelle zum Spektrum der Kalibrierlampe ein weiterer Unsicherheitsfaktor [5]. Um diesen Unsicherheitsfaktor zu minimieren können Korrekturfaktoren bestimmt werden. Dazu wird das Emissionsspektrum der Testlampe benötigt. Dieses wird mit der spektralen Empfindlichkeit des Messgerätes und dem Kalibrierspektrum verrechnet und ein Korrekturwert bestimmt. Durch diese Maßnahme lässt sich die Messunsicherheit wesentlich reduzieren. Eine Bibliothek von gebräuchlichen Strahlern kann diese Prozedur vereinfachen. Hierbei wird durch ein gängiges relatives Spektrum eine Simulation vorgenommen und so ein Korrekturwert ermittelt. Dieser kann dann im Gerät abgelegt werden und vereinfacht dadurch das Vorgehen und erhöht die Messgenauigkeit.

In der vorab beschriebenen Ausführung erfüllt die integrierende Messtechnologie die Anforderungen der Normen.

3 Zusammenfassung

Ein entscheidendes Kriterium bei der Auswahl des Messgerätes ist die Applikation und die geforderte Genauigkeit der Messwerte. So kann ein Doppelmonochromator, wegen der langen Messzeiten, ausschließlich zur Beurteilung einer zeitlich stabilen Lichtquelle verwendet werden. Zur Messung von instabilen oder gepulsten Lichtquellen könnte ein korrigiertes integrierendes Handmessgerät ein gutes Analysewerkzeug darstellen (Abb.3). Aufgrund der technisch begrenzten Streulichtunterdrückung eignen sich Einfachmonochromatoren und Diodenarrayspektrometer nur sehr bedingt zur Gefährdungsbeurteilung.

Letztendlich muss für den Einsatzzweck durch die verschiedenen Kriterien, wie Norm, Messgenauigkeit und Strahlungsquelle entschieden werden, welches Messgerät zum Einsatz kommen kann oder muss.

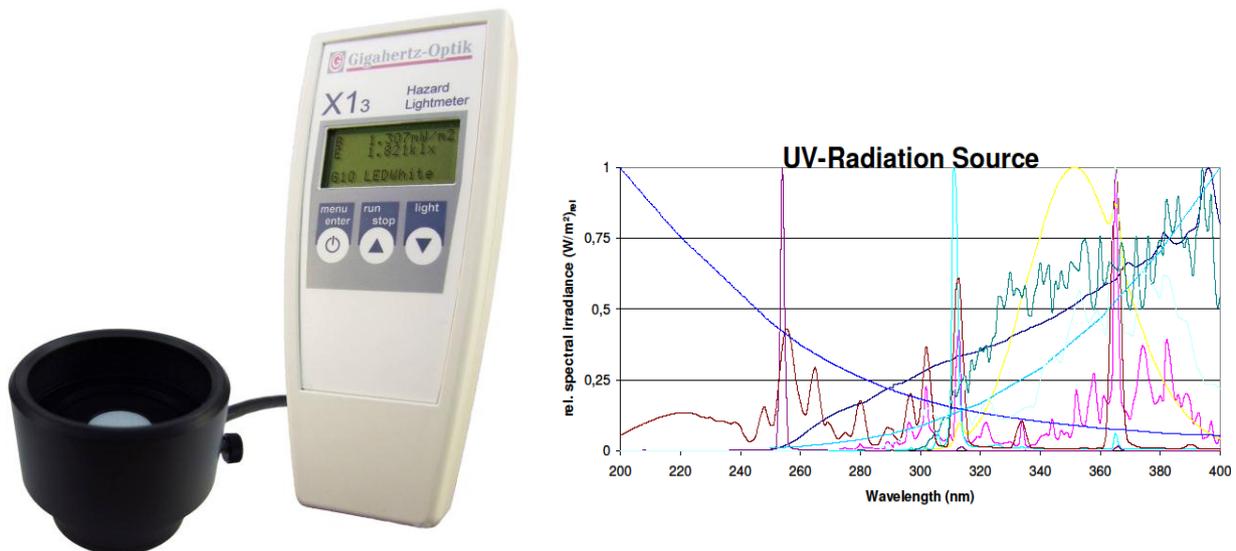


Abbildung 3: Integrierendes Messgerät mit integrierter Strahlungsquellenbibliothek

Literatur

- [1] DIN EN 62471: Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen.
Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik, Februar 2009
- [2] DIN EN 14255-1: Messung und Beurteilung von personenbezogenen Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung-Teil 1: Von künstlichen Quellen am Arbeitsplatz emittierte ultraviolette Strahlung.
Normenausschuss Lichttechnik, Juni 2005
- [3] ICNIRP Guidelines: Guidelines on Limits of exposure to Ultraviolet radiation of wavelengths between 180nm and 400nm (Incoherent Optical Radiation)
Health Physics 87 (2): 171-186; 2004
- [4] ICNIRP: Guidelines on Limits of Exposure to Broad-Band Incoherent Optical Radiation (0.38 to 3 μ m).
Health Physics 73 (3): 539-554; 1997
- [5] UV News, Petri Kärhä, Helsinki University of Technology: The official newsletter of the Thematic Network for Ultraviolet Measurement.
Helsinki, Issue 6 / November 2000

Parameter für die Sanierung von Beleuchtungsanlagen am Beispiel einer Schulbeleuchtung

Stefan Gramm, Sirri Aydınli

Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik, Einsteinufer 19, 10587, Berlin

1 Sanierung von Beleuchtungsanlagen in Schulgebäuden

Der Sanierung der Beleuchtung in Schulen wurde in den letzten Jahren vermehrt Aufmerksamkeit gewidmet. Die Gründe liegen zum einen in dem großen Energieeinsparpotential von Beleuchtungsanlagen, was durch einen enormen Investitionsstau begünstigt wird. Andererseits werden zunehmend adaptive Beleuchtungskonzepte gefordert, mit denen die Beleuchtung den verschiedenen Erfordernissen angepasst werden kann.

Im Folgenden werden am Beispiel einer Schulklassenraumbeleuchtung unterschiedliche Gesichtspunkte erörtert, die bei der Sanierung einer Beleuchtungsanlage Beachtung finden sollten.

2 Energetische Aspekte

Ein Hauptargument für die Erneuerung von Beleuchtungsanlagen ist das Energieeinsparpotential, welches ältere Beleuchtungsanlagen in der Regel aufweisen. Abbildung 1 zeigt die in einer Querschnittsanalyse über 75 Schulgebäude ermittelten installierten elektrischen Leistungen pro Fläche in Klassenräumen und Fachräumen.

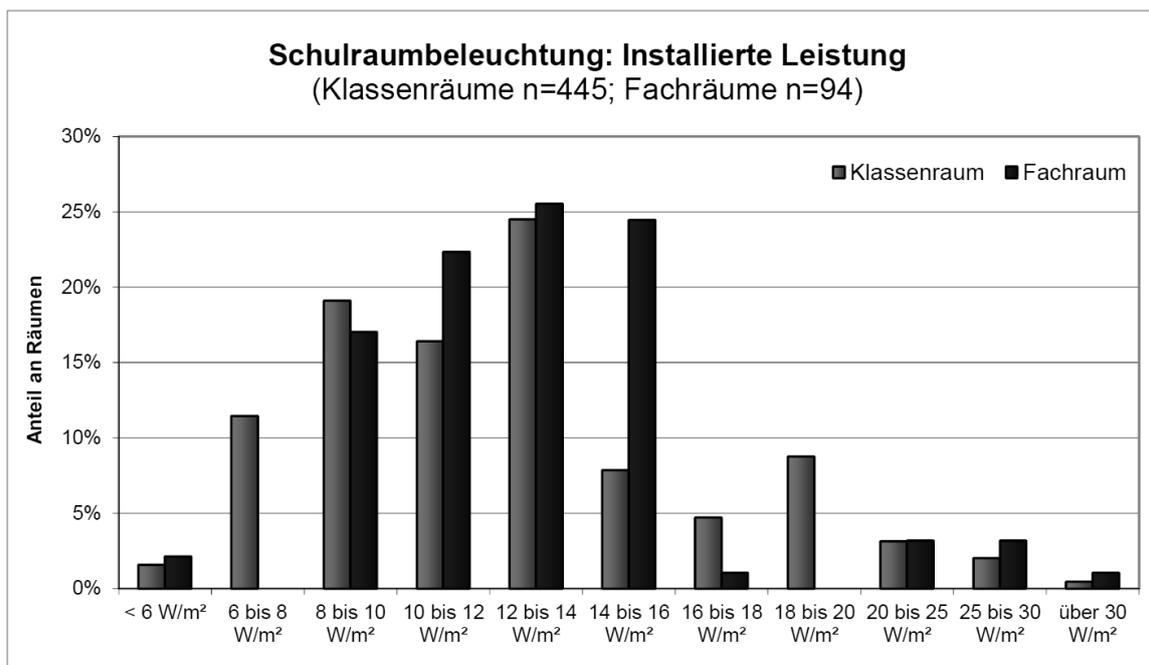


Abbildung 1: Installierte Leistung für die Beleuchtung in Klassenräumen (Querschnittsanalyse) [1]

Oft sind in den alten Leuchten konventionelle (KVG) oder verlustarme Vorschaltgeräte (VVG) im Einsatz, die im Vergleich mit elektronischen Vorschaltgeräten (EVG) eine um bis zu dreimal so hohe Verlustleistung aufweisen [2].

Moderne Beleuchtungsanlagen mit EVG und T5-High Efficiency Leuchtstofflampen ermöglichen in Kombination mit Leuchten mit hohem Betriebswirkungsgrad installierte Leistungen von unter 6 W/m². Werden diese Leuchten tageslichtabhängig geregelt und über eine Präsenzdetection bei Abwesenheit der Nutzer ausgeschaltet, kann die Energieeinsparung nach Abbildung 2 erheblich erhöht werden.

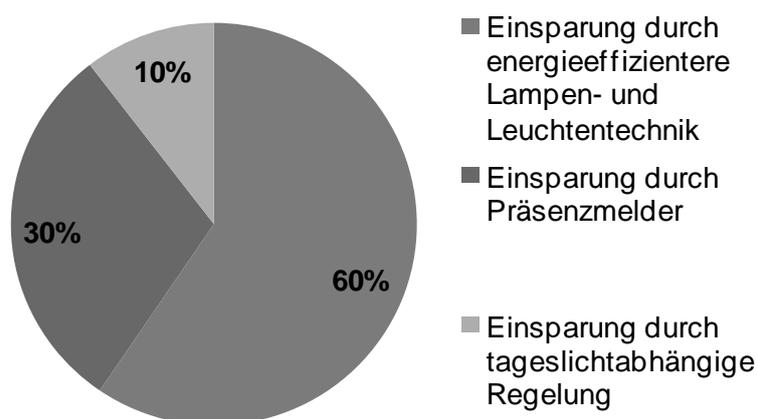


Abbildung 2: Anteile an den Einsparmöglichkeiten bei der Sanierung von Beleuchtungsanlagen

Für einen derart modernisierten Klassenraum mit geringer Tageslichtversorgung (30 m²; 4x 35 W HE T5-Lampe) wurde die über ein Jahr gemessene umgesetzte elektrische Energie mit den nach DIN V 18599 berechneten Werten für die Referenzanlage verglichen. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse. Die Bestandsanlage setzte sich aus vier Leuchten mit jeweils 4x 18 W T8-Lampen mit VVG zusammen.

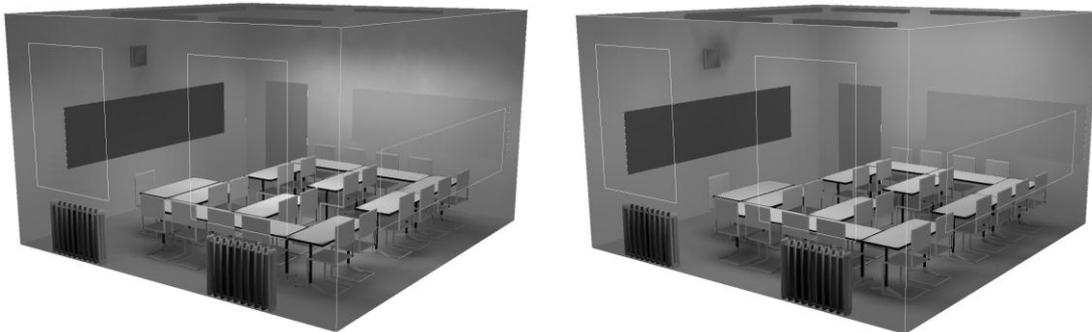
Tabelle 1: Vergleich des Energieaufwands für die Raumbelichtung in einem Klassenraum mit geringer Tageslichtversorgung

	nach DIN V 18599 berechneter Energieumsatz in kWh/a	gemessener Energieumsatz in kWh/a
Bestandsanlage	339	253
Referenzanlage (EnEV 2009)	189	-
optimierte Anlage (Energieeffizienz)	89	29
optimierte Anlage (Lernförderung)	267	215

Es ist zu sehen, dass die energetisch optimierte Beleuchtungsanlage in der Jahresbilanz weniger als ein Drittel der Energie der Bestandsanlage umsetzt. Es zeigt sich aber auch, dass die Berechnungen von den Ergebnissen der realen Nutzung abweichen können.

3 Lichttechnische Bewertung

Zur Bewertung der lichttechnischen Parameter der künstlichen Beleuchtung legt die DIN EN 12464 in Tabelle 5.36 die Vorgaben bezüglich der Beleuchtungsstärke, der Blendung, der Gleichmäßigkeit sowie der Farbwiedergabe fest. Abbildung 3 zeigt die Simulation der Klassenraumbelichtung. In den realen Räumen durchgeführte Messungen ergaben, dass die geforderten Werte mit der neugeplanten optimierten Beleuchtungsanlage eingehalten werden.



*Abbildung 3: Simulation der Schulklassenbeleuchtung:
links – energieeffiziente Beleuchtung; rechts – lernfördernde Beleuchtung*

4 Photobiologische Bewertung

Alternativ zu der auf die Energieeinsparung optimierten Beleuchtung wurde eine Variante geplant und realisiert, die durch spezielle Leuchten eine bessere Ausleuchtung des Raumes, speziell der Wände und Decke, ermöglicht (Abbildung 3). Damit soll besonders in tageslichtarmen Jahreszeiten das Lernen gefördert werden. In diesen Leuchten waren jeweils drei 35 W HE T5-Lampen verbaut, zwei davon mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 8000 K. Die gemessenen Spektren dieser Leuchten sind in Abbildung 4 relativ aufgetragen.

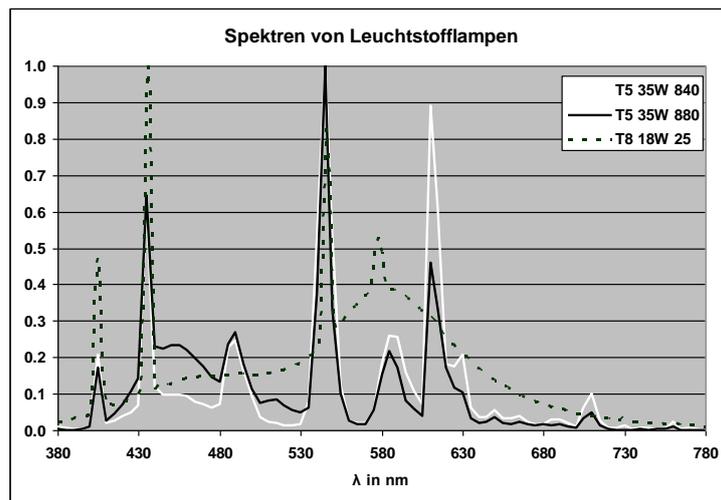


Abbildung 4: gemessene Spektren von Leuchtstofflampen für die Innenraumbeleuchtung

In Tabelle 2 sind die daraus berechnete ähnlichste Farbtemperatur T_{CP} sowie der circadiane Wirkungsfaktor a_{cv} eingetragen. Der a_{cv} stellt relativ das Verhältnis der mit $c(\lambda)$ gewichteten Strahlung zur mit $V(\lambda)$ gewichteten Strahlung dar.

Tabelle 2: ähnlichste Farbtemperatur und circadianer Wirkungsfaktor von Leuchtstofflampen

Lichtquelle	T_{CP} [K]	a_{cv}
T5 840	3920	0,53
T5 880	7514	0,99
T8 25 (Bestand)	4191	0,53
mittleres Tageslicht D65	6504	0,95

Es zeigt sich, dass aufgrund des deutlich höheren Blauanteils in den T5-Lampen mit Lichtfarbe 880 der circadiane Wirkungsfaktor fast doppelt so hoch wie bei den „neutralweißen“ Lampen 840 bzw. Lichtfarbe 25 ausfällt.

5 Zusammenfassung

Verlässt man sich bei der Sanierung einer Beleuchtungsanlage lediglich auf die in der Energieeinsparverordnung vorgegebene Referenztechnik, wird ein erhebliches Einsparpotential vergeben. Durch die Kombination der modernen Lampen- und Leuchtentechnik mit intelligenten Regelungssystemen mit Präsenzüberwachung lässt sich weitere Energie einsparen.

Werden vom Nutzer Optimierungen unter anderen Gesichtspunkten wie z. B. Lernförderung gewünscht, müssen z. T. erhebliche Abstriche bei der Energieeffizienz hingenommen werden. Letztlich ist eine Abwägung der verschiedenen Aspekte nötig.

Literatur

- [1] Anteil IBUS vom Abschlussbericht zum Verbundprojekt: „Energieoptimierte Beleuchtung bei gleichzeitiger Verbesserung der Lebensqualität durch Nutzung von Tageslicht und neuer Lampen- und Vorschalttechnik“, gefördert vom BMWi, Förderkennzeichen: 0329037 L, Projektlaufzeit: 01.12.2007 bis 31.12.2011
- [2] DIN V 18599-4:2011 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung (Beuth-Verlag GmbH, Berlin, 2011)
- [3] DIN EN 12464-1:2011-08 Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen; Deutsche Fassung EN 12464-1:2011 (Beuth-Verlag GmbH, Berlin, 2011)

The Radical Status of the skin after UV irradiation

Thomas Herrling^{1,2}, Katinka Jung²

¹Department of Medical Physics, University of Applied Sciences TFH Berlin,

²GEMATRIA Test Lab, Berlin, Pestalozzistr. 5-8, 13187 Berlin, Germany,

Summary

A scale of skin classification is introduced, which bases on the detection of UV generated free radicals. The determination of the Radical Status offers the possibility to see in an early stage the effect of exterior and interior influences on the status of skin. The detection of the skin's response after a normalized radical generation combined with the application of external and internal influences enables a comprehensive and easy classification of skin products and therapies. The RSF (Radical Status Factor) distinguish between beneficial (radical scavenging) or detrimental (radical generating) effects.

Biological, physical and chemical influences change the Radical Status. Corresponding to their effect on the Radical Status, a classification in terms of a Radical Status Factor (RSF) can be performed. This factor compares directly different impacts from physical treatments over chemical reactions up to biological effects. Especially the effect of substances applied topically on the skin, like it is usual in cosmetics and pharmacy, can be classified and compared directly by using the RSF.

Introduction

The classification of skin is a vital necessity for the evaluation of the effect of different skin care products and skin treatments.

World demographics continue to evolve and diversify at unprecedented levels. With this growth and mixing of ethnicities come significant changes in the composition of world skin types (1). It is becoming increasingly aware that the world composition includes many variations and combinations of skin types. To date, the medical community has lacked a comprehensive system to classify and communicate the dynamic skin typing of all global people in a clear and reproducible fashion. There is an important medical need to determine the skin effects of insult, injury, and inflammation (i/i/i). There is also a need to assess the likelihood of i/i/i effects occurring in a skin type, document this in the medical literatur, and communicate potential effects to patients. To answer these needs, an industry standard is required for skin type classification upon which to facilitate study

designs and the reporting of data. Corresponding to this necessity various scales of skin classification were proposed:

The Fitzpatrick Scale (2), Kawada Skin Classification System for Japanese Individuals (3), Lancer Ethnicity Scale (4), Goldman World Classification of Skin Type (5), Willis and Earles Scale (6), Taylor Hyperpigmentation Scale (7), Roberts Skin Type Classification System(8).

All classifications bases on the physiological response of human skin due to different treatments detected by various physiological endpoints. These endpoints will intrinsically be dependent on the individual and ethical skin morphology. Undeniably, these classifications are meaningful for clinical evaluation, but not for the classification of an external agent, that potentially protects or damage the skin. A new parameter that enables the classification of an agent (a chemical substance, a cosmetic or pharmaceutical formulation, a stimulus, or other chemical or physical actives on the skin), independent from the individual skin's response is needed. The detection of the response to different skin treatments inclusive the application of numerous active ingredients is the precondition for a comprehensive skin classification. This classification should consider physical, chemical and biological effects.

The Radical Status Factor Scale (9)

The Radical Status Factor RSF is an universal factor which characterizes the radical status of the skin, considering different external and internal influences. This status is characterized by the evaluation of redox processes which are the beginning of skin changes. UVA and UVB are the only wave length which generate free radicals. IR and near VIS shows no effect for generating free radicals.

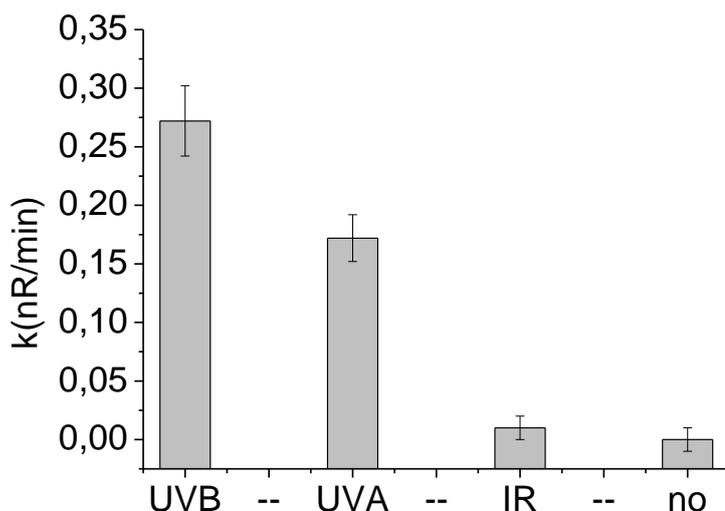


Fig. 1 Radical density is proportional to the $1/\lambda$ within $\lambda = 280 \text{ nm}$ and $\lambda = 400 \text{ nm}$.

$\lambda \gg 400 \text{ nm}$ gives no free radical.

Up to now there is no universal classification for the evaluation of skin changes. Biological, physical and chemical influences may change the Radical Status. Corresponding to their effect on the Radical Status a classification in terms of a Radical Status Factor RSF offers a comprehensive possibility of skin characterization. This factor gives the possibility of comparing different impacts from physical treatments over chemical reactions up to biological effects. Especially the effect of substances applied topically on the skin like it is usual in cosmetics and pharmacy can be classified and compared directly by the RSF. The relevance of the RSF – Method is demonstrated with the application of numerous different treatments to the skin. The RSF distinguish between beneficial (radical scavenging) or detrimental (radical generating) effects. A special case of the RSF-Method is the determination of the Radical Sun Protection Factor (9,10).

Methods

The skin as the biggest human organ is permanently treated by various intrinsic and extrinsic influences. It is the meeting point of the organs internal and external Radical Stress (11,12,13,14).

The Radical Status has been investigated as a one channel information system. A black box model is used to describe interactions within the system between free radicals causing the input component in a response after UV activation. It appears that the skin free radical

system shows a sensitive interaction with external and internal impacts. This response characterizes the Radical Status classified by the RSF, which is a normalized factor. The determination of the RSF starts with the generation of free radicals by a defined number of photons characterized by irradiance and irradiation time followed by the measurement of the Radical Response (Radical Status) of the skin.

Calculation: of the RSF by analyzing the data of untreated and treated skin

$$RSF = \frac{N(\text{free radicals in untreated skin})}{N(\text{free radicals in treated skin})}$$

Processes or substances which increase the number of generated free radicals are characterized by $RSF < 1$ and which decrease the number of generated free radicals are characterized by $RSF > 1$. The normal untreated skin is characterized by a $RSF = 1$ and the number of measured free radicals corresponds to a concentration of 100 %.

Results

Active ingredients differentiate between RADICAL PROTECTOR ($RSF > 1$) and RADICAL PROMOTOR ($RSF < 1$). Thereby the highest protection is reached by using a UV-filter combination of UVA – filter and UVB – filter. UV filter especially in the UVA range have the highest influence on the free radical generation at all. The antioxidant Rooibos with $RSF = 1,9$ can be a second defence line. The radical scavenger DMSO $RSF = 2,5$ is used as radical scavenger in the case of skin inflammation. As radical promoters the two substances tenside SDS (sodium dodecyl sulphate) and DHA (Dihydroxyacetone) must be seen.

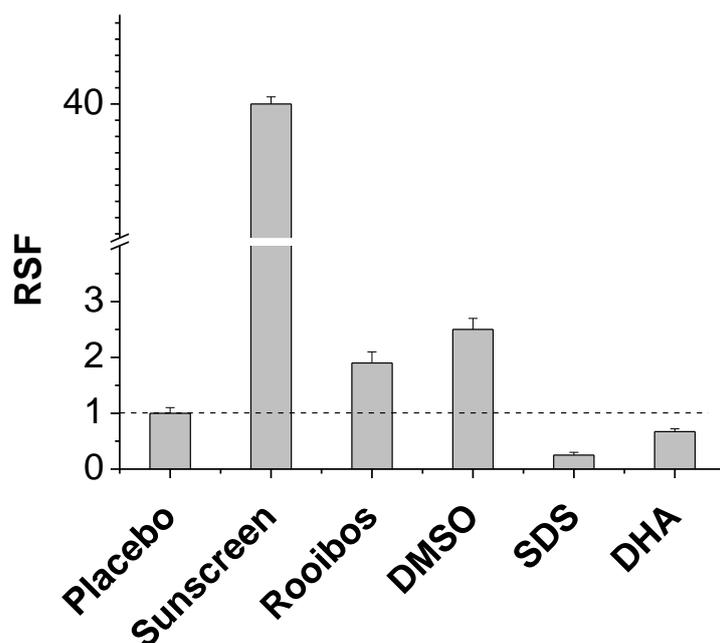


Fig.2 RSF values of different substances

A wide range of different applications of this technique is shown. The universality of the RSF enables comparing and assessing of various products and treatments with each other. A simple number determines the redox -status of the skin. It offers the possibility of a comparative classification of all products and treatments. So that selective or complex activities for prevention of radical damages in skin are possible.

References

- (1) US census bureau , 1990, 2000. Available at: www.census.gov Accessed March 01, 2008
- (2) Fitzpatrick TB. The validity and practicality of sun-reactive skin types I through VI. Arch Dermatol. 1988;124:869-871
- (3) Kawada A. UVB-induced erythema, delayed tanning, and UVA-induced immediate tanning in Japanese skin. Photodermatol. 1986; 3:327-331
- (4) Lancer HA. Lancer ethnicity scale (LES). Lasers Surg Med. 1998; 22:9.
- (5) Goldman M. Universal classification of skin type. J Cosmet Dermatol. 2002;15:53-54,57-
- (6) Willis I, Earles MR A new classification system relevant to people of African descent. J Cosmet Dermatol. 2005; 18:209-216.
- (7) Taylor SC. Noninvasive techniques for the evaluation of skin color. J Am Acad Dermatol. 2006;54:S282-S290.

- (8) Roberts W.E.:The Roberts skin type classification system *Journal of Drugs in Dermatology*, May, 2008
- (9) Herrling T, Jung K, Fuchs J Measurements of UV-generated free radicals/reactive oxygen species (ROS) in skin.*Spectrochim Acta A Mol BiomolSpectrosc.*2006Mar13;63(4):840-5.
- (10) Herrling T, Jung K, Chatelain E, Langenauer M
Radical Skin/Sun Protection Factor RSF – Protection against UV-induced Free Radicals
SÖFW-Journal 132 7-2006 24
- (11) Darr D, Fridovich I. Free radicals in cutaneous biology. *J Invest Dermatol.* 1994 May;102(5):671-5. Review.
- (12) Ananthaswamy HN, Pierceall WE. Molecular mechanisms of ultraviolet radiation carcinogenesis.*Photochem Photobiol.* 1990 Dec;52(6):1119-36. Review.
- (13) Ogura R, Sugiyama M, Nishi J, Haramaki N. Mechanism of lipid radical formation following exposure of epidermal homogenate to ultraviolet light.*J Invest Dermatol.* 1991 Dec;97(6):1044-7.
- (14) Jurkiewicz BA, Buettner GR. Ultraviolet light-induced free radical formation in skin: an electron Paramagnetic resonance study.*Photochem Photobiol.* 1994 Jan;59(1):1-4.

Simulation of the Sun Protection Factor (SPF) and of UVA Protection: The BASF Sunscreen Simulator

Bernd Herzog¹ and Uli Osterwalder²

¹BASF Grenzach GmbH, Grenzach-Wyhlen, Germany

²BASF PCN GmbH, Düsseldorf, Germany

1 Introduction

During the development of sunscreen formulations a simple method for the estimation of the expected product performance can be very helpful. This can be achieved by model calculations, based on the algorithm used with *in vitro* SPF measurements. The *in vitro* transmission measurement is replaced by the calculation of the combined extinction of the UV filters in an irregular sunscreen film. In addition, the *in vivo* endpoint is simulated by taking into account the changes occurring due to filter photoinstabilities during transmission of one erythemal dose through the sunscreen film. There are a couple of prerequisites to realize this *in silico* approach: a database with UV spectra of the relevant UV filters, a mathematical description of the irregularity profile of the sunscreen film on the skin, the treatment of changes in UV filter concentration due to photoinstabilities, and consideration of formulation influences like the distribution of the UV filters in the oil and water phase of an emulsion. Models of film irregularity profiles contain adjustable parameters, which can be determined by comparison with sunscreen standards.

2 Calculations

2.1 SPF

The basic relationship for the simulation of the SPF is the formalism first introduced by Sayre in 1979 [1]. The SPF is calculated from the average of the inverse transmission ($1/T$) of the respective sunscreen in the spectral range between 290 and 400 nm, including weighting with the irradiance spectrum of a UV source, $S_s(\lambda)$, and the erythemal action spectrum, $s_{er}(\lambda)$ [2]:

$$SPF = \frac{\sum_{290}^{400} s_{er}(\lambda) \cdot S_s(\lambda)}{\sum_{290}^{400} s_{er}(\lambda) \cdot S_s(\lambda) \cdot T(\lambda)} \quad (1)$$

Whereas irradiance data $S_s(\lambda)$ and erythemal action spectrum $s_{er}(\lambda)$ data are taken from literature [3], the transmittance $T(\lambda)$ has to be calculated for each composition of UV filters. In order to generate relevant transmission data, mixed absorbance spectra are calculated according to the amounts and UV spectroscopic performances of the filters [4], based on an average optical pathlength of 20 μm (corresponding approximately to an application amount of 2 mg/cm^2). Further, the irregularity of the sunscreen film is taken into consideration. A step film model for this purpose had been described by O'Neill in 1984 [5]. In the model described here we use a continuous height distribution model based on the gamma distribution [6]. The parameter of this model was calibrated using standard sunscreen formulations with well-known SPF data. In addition, the calculation takes photoinstabilities of the individual filters into account [7] as well as stabilizing and destabilizing effects from inter-molecular interactions [8]. Also the effect of the distribution of the filters in the oil and the water phase of the formulation is taken into consideration for the simulation procedure [9].

2.2 Treatment of Photoinstabilities

Equation (1) refers to a static value of the SPF without consideration of transmission changes due to photoinstabilities, which may occur in the course of the irradiation process involved with SPF determination *in vivo*. In order to take this into account also with *in vitro* SPF measurements, equation (1) was modified by Stanfield et al. [10], with t_{MED} referring to the time, after which one minimal erythemal dose (1 MED) is transmitted.

$$SPF = \frac{\sum_0^{t_{\text{MED}}} \sum_{290}^{400} s_{er}(\lambda) \cdot S_s(\lambda)}{\sum_0^{t_{\text{MED}}} \sum_{290}^{400} s_{er}(\lambda) \cdot S_s(\lambda) \cdot T(t, \lambda)} \quad (2)$$

This approach mimics the conditions of SPF determination *in vivo*. A similar and equivalent method was described by Wloka et al. [8]. With *in silico* calculations of the SPF the procedure given by equation (2) can also be applied. In that case, decay constants for the photodegradation of the UV filters are needed, including the treatment of stabilizing and destabilizing interactions of certain UV absorbers [8, 11]. Stanfield's approach also allows the determination of the UV-spectrum resulting from integration of the transmitted UV-dose with and without protection, designated as the integrated spectrum. The UV-dose, non-

weighted with the erythemal action spectrum, without protection (D_u = dose, unprotected) at wavelength λ is:

$$D_u(\lambda) = \int_0^{t_{MED}} S_s(\lambda) dt \quad (3)$$

The non-weighted UV-dose with protection (D_p = dose, protected) at wavelength λ is correspondingly:

$$D_p(\lambda) = \int_0^{t_{MED}} S_s(\lambda) \cdot T(t, \lambda) dt \quad (4)$$

The integrated transmission at wavelength λ is obtained from

$$T_{int}(\lambda) = D_p(\lambda) / D_u(\lambda) \quad (5)$$

and the integrated absorbance with

$$E_{int}(\lambda) = \lg\left(\frac{1}{T_{int}(\lambda)}\right) \quad (6)$$

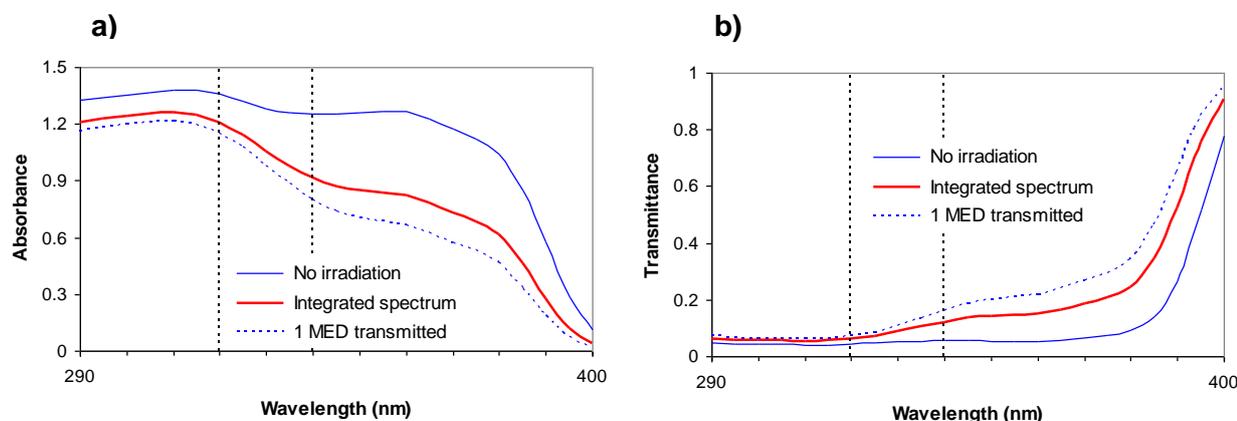


Figure 1:

Simulated absorbance (a) and transmittance (b) spectra of the composition 5% EHMC, 4% BMDBM, and 3% OCR without irradiation, after transmission of 1 MED, and integrated spectrum; EHMC = Ethylhexyl Methoxycinnmate, BMDBM = Butyl Methoxy Dibenzoylmethane, OCR = Octocrylene

An example of the integrated absorbance and transmittance of a sunscreen composition with a certain photoinstability is shown in Fig. 1a and b, together with the spectra without irradiation and after transmission of 1 MED.

2.3 Different Sources of UV Light

The ratio of irradiances in the UVA and the UVB of the sun depends on the season, on the time of the day, and on the geographical position. In the calculations, a solar standard spectrum is employed. The lamp spectrum used for SPF determination *in vivo* strongly differs from solar radiation as the visible light is completely cut off, leading also to a reduction of the UVA part. We therefore calculate two values for the SPF referring to different irradiance spectra of the UV source. The first value is calculated with clinical conditions as defined in the international test method [12], using a source where the visible light is filtered out. The second SPF value is calculated for real-life conditions using a solar light spectrum occurring midday in midsummer at 40°N [3]. The erythemal action spectrum in both cases was taken from ref. [2]. In our software, besides the exact calculated value, a rating value rounded in accordance with the international SPF test method [13] is indicated.

Table 1: Comparison of the effect of UV source on a UV broad-spectrum and a UVB biased sunscreen

	Composition	SPF <i>in silico</i> , Clinical	SPF <i>in silico</i> , Real-life
UV broad-spectrum	3.5% DHHB, 3.5% EHMC, 2.0% BEMT	16.1	15.0
UVB biased	3.0% PBSA, 3.0% EHT, 6.0% EHMC	16.1	12.4

DHHB = Diethylamino Hydroxybenzoyl Hexyl Benzoate, EHMC = Ethylhexyl Methoxycinnamate, BEMT = Bis-Ethylhexyloxyphenol Methoxyphenyl Triazine, PBSA = Phenyl Benzimidazole Sulfonic Acid, EHT = Ethylhexyl Triazone

The results in Table 1 show that a UVB-biased sunscreen performs less under real-life conditions compared to what is measured when using a clinical lamp spectrum.

2.4 UVA-PF, *in vivo* and *in vitro*

The *in vivo* method used for UVA protection assessment is persistent pigment darkening (PPD). PPD is the official method for assessment of the UVA-protection in Japan [14]. In analogy to the erythemal response expressed by the SPF, the UVA-protection factor (UVA-PF) values are determined by the biological endpoint of spontaneous pigmentation after irradiation with an UVA light source. According to the height of the UVA-PF a protection category may be displayed on the package. The UVA-PF is simulated in a very similar way like the SPF from calculated transmissions $T(\lambda)$ taking photodegradation of the filter molecules into account, but now employing the spectrum of an UVA lamp, $S_{UVA}(\lambda)$, and the PPD action spectrum $s_{PPD}(\lambda)$ [15] in Stanfield's equation, and the time t_{MPD} after which one minimal pigmenting dose (1 MPD) is transmitted.

$$UVA - PF_{(in-vivo)} = \frac{\sum_{0}^{t_{MPD}} \sum_{320}^{400} s_{PPD}(\lambda) \cdot S_{UVA}(\lambda)}{\sum_{0}^{t_{MPD}} \sum_{320}^{400} s_{PPD}(\lambda) \cdot S_{UVA}(\lambda) \cdot T(t, \lambda)} \quad (7)$$

As with the SPF calculation, effects of the distribution of the filters in the oil and the water phase of the formulation are taken into account as well. The *in vitro* method employed for determination of the UVA-PF has been developed by COLIPA [16]. In order to simulate this method, the film irregularity model is not used, but a relationship between parent film extinction and extinction of the film on the substrate, based on *in vitro* data [17]. In that way an *in vitro* extinction spectrum is simulated, resulting in a simulated *in vitro* SPF, the value of which may differ from the simulated *in vivo* SPF. The corresponding simulated *in vitro* transmission spectrum is then transformed, such that the simulated *in vitro* SPF matches the simulated *in vivo* SPF. This is achieved by adjusting a parameter C as an exponent to the transmission $T(\lambda)$:

$$UVA - PF_{(in-vitro)} = \frac{\sum_{320}^{400} s_{PPD}(\lambda) \cdot S_{UVA}(\lambda)}{\sum_{320}^{400} s_{PPD}(\lambda) \cdot S_{UVA}(\lambda) \cdot T(\lambda)^C} \quad (8)$$

The irradiation step involved in this method [18] is simulated as well, leading to the indicated result of the UVA-PF (*in vitro*). The ratio of UVA-PF/SPF is calculated for both, the *in vivo* and the *in vitro* simulation result of the UVA-PF. If one of these results is greater

than 1/3, the requirements of the EC recommendation [18] are regarded as fulfilled. The additional requirement for the UVA logo that the critical wavelength must be equal or higher than 370 nm is also being considered. As well, all other indices which characterize the protection against UVA can be calculated. The program is freely available [19].

3 Conclusion

Simulation of the properties of sunscreens from the filter compositions are a valuable tool for the design of sunscreen formulations. Apart from this, such calculations can help improving the understanding of sunscreen performance in general. UVB-biased sunscreens show a lower sun protection factor under real-life conditions than expected from results obtained in clinics. In contrast, the protection by broadspectrum sunscreens is rather independent from the irradiation conditions. All metrics for the characterization of protection against UVA can be simulated including any irradiation condition. In that way the different methods can be easily compared.

References

- [1] R. M. Sayre, P. P. Agin, G. J. LeVee, E. Marlowe. A Comparison of *In Vivo* and *in Vitro* Testing of Sunscreening Formulas, *Photochem. Photobiol.* **29** (1979) 559 – 566
- [2] A. F. McKinlay, B. L. Diffey: A Reference Action Spectrum for Ultraviolet-Induced Erythema in Human Skin. *CIE Journal* **6** (1987), 17 – 22
- [3] B. L. Diffey, J. Robson. A New Substrate to Measure Sunscreen Protection Factors throughout the Ultraviolet Spectrum, *J. Soc. Cosmet. Chem.* **40** (1989) 127 – 133
- [4] B. Herzog. Prediction of Sun Protection Factors by Calculation of Transmissions with a Calibrated Step Film Model, *J. Cosmet. Sci.* **53** (2002), 11 – 26
- [5] J. J. O'Neill, Effect of Film Irregularities on Sunscreen Efficacy, *J. Pharm. Sci.* **73** (1984) 888 – 891
- [6] L. Ferrero, M. Pissavini, S. Marguerie, L. Zastrow: Efficiency of a Continuous Height Distribution Model of Sunscreen Film Geometry to Predict a Realistic Sun Protection Factor. *J. Cosmet. Sci.* **54** (2003) 463 – 481
- [7] M. Wloka, R. F. M. Lange, H. Flösser-Müller: An *in vitro* SPF Screening Approach Considering the Photostability of the UV filters. *Proc. Int. Sun Protection Conference*, London 2005
- [8] B. Herzog, S. Mongiat, K. Quass, C. Deshayes, "Prediction of Sun Protection Factors and UVA Parameters by Using a Calibrated Step Film Model", *J. Pharm. Sci.* **93** (2004) 1780 – 1795

- [9] B. Herzog, Models for Simulation of Sun Protection Factors and Indices Characterizing the UVA Protection of Sunscreens: Principles and Applications, *56th SEPAWA Congress and European Detergents Conference Proceedings*, Oct. 14 – 16, 2009
- [10] J. Stanfield, U. Osterwalder, B. Herzog. *In vitro* measurements of sunscreen protection, *Photochem. Photobiol. Sci.* **9** (2010) 489 – 494
- [11] B. Herzog. Models for the Calculation of Sun Protection Factors and Parameters Characterizing the UVA Protection Ability of Cosmetic Sunscreens”, in: *Colloids in Cosmetics and Personal Care*, ed. Tharwart F. Tadros, Vol. 4., Wiley-VCH, Weinheim 2008
- [12] COLIPA: International Sun Protection Factor (SPF) Test Method. European Cosmetic Toiletries and Perfumery Association - COLIPA, Brussels (2003)
- [13] M. Brown, SPF Testing in Europe, The International SPF Test Method, Chapter 39 in: *Sunscreens: Regulations and Commercial Development* (3rd edition), Edited by N. Shaath. Cosmetic Science and Technology Series, Vol 28; Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, 2005, p. 779-806
- [14] JCIA Measurement Standard for UVA Protection Efficacy, 1995 Japan Cosmetic Industry Association - JCIA, 9-14, Toranomon 2-Chome, Minato-Ku Tokyo, 105
- [15] A. Chardon, D. Moyal, and C. Hourseau. Persistent Pigment-Darkening Response as a Method for Evaluation of Ultraviolet A Protection Assays. *Sunscreens: Development, Evaluation, and Regulatory Aspects*, ed. Lowe, N.J., Shaath, N.A., Pathak, M.A., 559-582, 2nd Ed., Marcel Dekker, New York (1997)
- [16] COLIPA Method for the *In Vitro* Determination of UVA Protection Provided by Sunscreen Products. 2007, The European Cosmetics Toiletry and Perfumery Association - COLIPA, Rue de la Loi
- [17] Bernd Herzog, Models for the Calculation of Sun Protection Factors and Parameters Characterizing the UVA Protection Ability of Cosmetic Sunscreens, in: *Colloids in Cosmetics and Personal Care*, ed. Tharwart F. Tadros, Vol. 4., Wiley-VCH, Weinheim 2008
- [18] European Commission Recommendation on the Efficacy of Sunscreen Products and the Claims made relating thereto, OJ L265, 20067647/EC, 39 – 43
- [19] www.basf.com/sunscreen-simulator

Computerized Generation of Photopic and Mesopic Light for Psychophysical Experiments

Andreas Krensel, Werner Backhaus

Technische Universität Berlin and Freie Universität Berlin

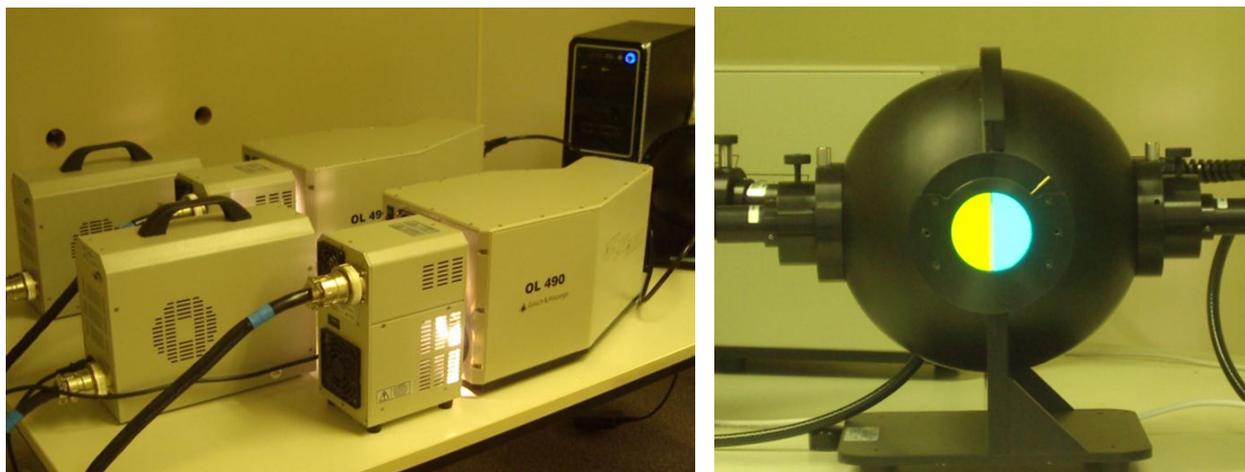
1 Introduction

Psychophysical measurements of absolute and relative visual thresholds for light intensity, wavelengths, and chromatic purity were widely performed over the decades for photopic light levels, but with different observers and apparatus under different viewing conditions. The results mostly show considerable deviations of data of individuals around mathematical average curves, see e.g. [6], not allowing for a direct psychophysiological interpretation. Thus, a computerized multipurpose-setup has been developed now for visual psychophysical experiments with individual observers and identical viewing conditions. The wavelength-range of 380 nm - 780 nm covers the visual range of the human visual system. The steerable light intensity ranges from photopic to mesopic light levels. The results will be especially helpful for the extension of the psychophysiological models of photopic and mesopic vision by spatial and temporal aspects, including effects of adaptation (Backhaus, this volume) [1], [2], [3]. The core of the setup consists of two gauged spectral light synthesizers, with two 500 W Xenon-lamps and two digital micro-mirror devices (DMDs) [4], Objective Light Source OL490 (Gooch & Housego, Orlando, Florida, U.S.A.; OPTE-E-MA Engineering GmbH, Martinroda, Germany). For each of the 1,024 wavelengths, with a step width of 0.39 nm, 768 mirrors allow for 49,152 different intensity levels, simultaneously for each wavelength, enabled by pulse-width modulation. The DMDs feed the light via two liquid-crystal light-guides into the separated halves of an Ulbricht-sphere that spatially homogenizes the mixture of monochromatic light by multiple reflections. A Software Development Kit (SDK) allows the user to develop own software for steering the setup completely by computer.

2 Results

2.1 Computerized Setup for Visual Psychophysics

We have computerized the OL490s now, using the delivered Software Development Kit (SDK) for sending steering-commands to both OL490s in parallel from the high-performance measurement PC, which also steers the psychophysical experiments. In these



*Fig. 1 Light generation system for psychophysical experiments. **Left:** Two Xe-lamps (500 W) and power supplies, connected with two OL490 spectral light synthesizers that feed their light spectrum via fluid-crystal light-guides into the separated halves of an Ulbricht-sphere. **Right:** Ulbricht-sphere for independent spatial mixture of the two light spectra that homogeneously illuminate the half-fields of the exit. The diameter of the exit can be reduced by an iris. The spectral intensity distributions of the two lights are steered by the computer that controls and protocols the psychophysical experiment. (See text).*

experiments, the observer judges subjective differences of two homogeneous lights of the two half-fields of the round exit of the Ulbricht-sphere. Arbitrary spectral light intensity distributions are generated via two numerical arrays, sent from a self-written PowerBASIC program, including self-written C-Sharp DLLs, via two USB-ports to the spectral light synthesizers. Interfacing from the measurement computer to the on-board USB-chip of each OL490, enables direct and fast communication. This allows us to generate not only monochromatic light of different wavelengths and bandwidths, but arbitrary spectral light intensity distributions, including mixtures of monochromatic and white light. For measurements of e.g. absolute thresholds, i.e. against darkness, the intensity range can be shifted by neutral density filters ND-1, ND-2, and ND-1 + ND-2, by 1, 2 and 3 log units, which in addition reduces stray light in the mesopic range. Interchangeable slits at the exit of the light source allow for changing the half-width of the monochromatic lights and thus the total intensity of the light at the exit of the Ulbricht-sphere. Different visual fields can be realized in the experiments via an adjustable iris at the exit of the Ulbricht-sphere. The stimulus-settings and the judgments of the observer in the psychophysical experiments will be recorded by our steering-, control-, and data-acquisition program for further data-evaluation.

2.2 Measured Properties

The irradiance of monochromatic light, exiting the Ulbricht-sphere at a distance of 15 mm, has been exemplarily measured for different wavelengths, slit-widths, in relation to the relative number of reflecting mirrors, with a calibrated 1400-A radiometer with an SEL033 / F / W Flat Radiometric Head (International Light Technologies, Peabody, U.S.A.). **Fig. 2** shows that the irradiance is proportional to the number of mirrors (compare measured data and linear regression-lines) in the range of 0 - 80 % (max. rel. error: ± 2.3 %), with additional intensity calibration, to 100 %. This holds for different slits (150 μm - 750 μm), and for different neutral density filters (ND).

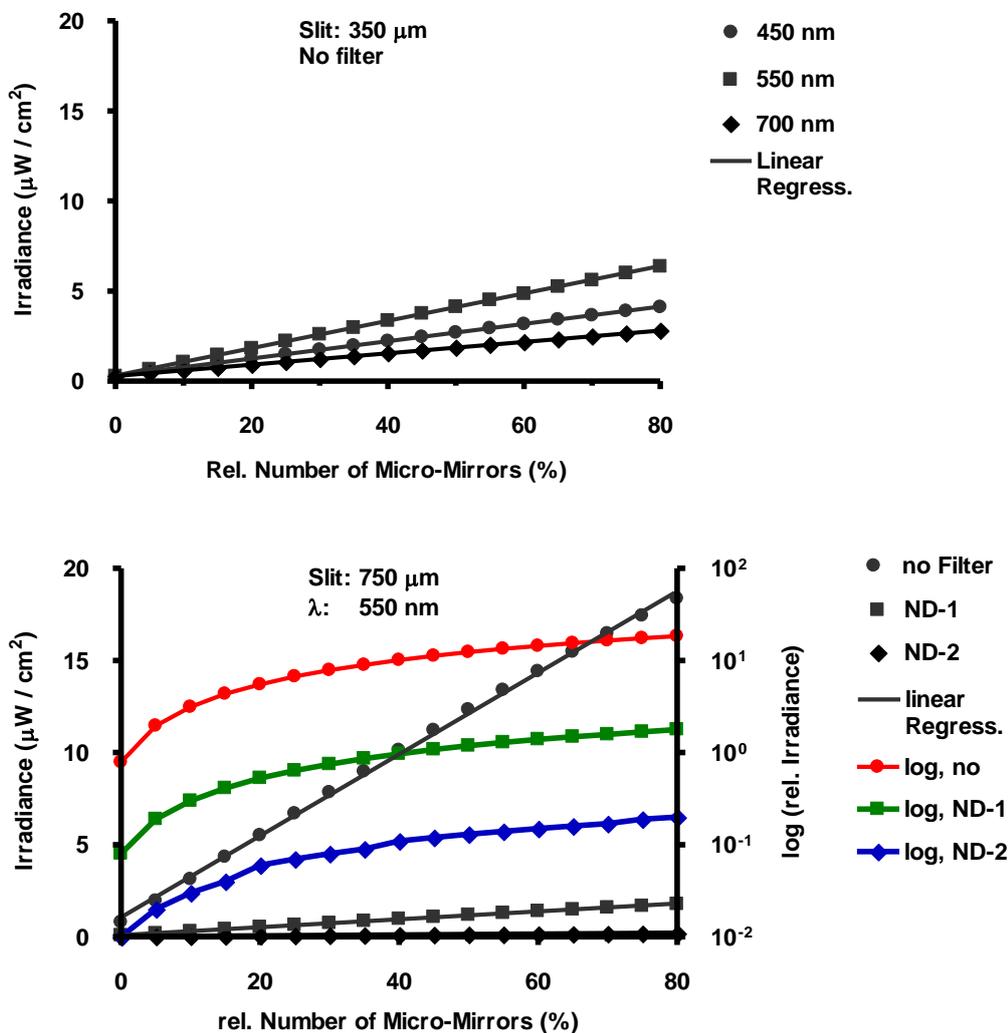


Fig. 2 Measured intensity of monochromatic lights increases linearly with the relative number of micro-mirrors, in the range of 0 - 80 %; **upper**: performed at three wavelengths, with a slit of 350 μm , without filter; **lower**: performed for 550 nm, slit 750 μm , without filter and reduced by neutral density filters of 1 and 2 log units. In addition, the curves are drawn on a logarithmic y-scale. (See text).

The different slopes of the intensity curves for different wavelengths are due to the spectral intensity distribution of the Xe-lamp. With white light and a slit-width of 750 μm , the maximum achievable irradiance is 2.23 mW / cm^2 , at a distance of 15 mm.

3 Conclusions and Outlook

The presented results show that 1) the two spectral light synthesizers can be steered simultaneously, via two USB-ports, from a PowerBASIC program that also controls the psychophysical experiments and records the judgments of the observer. 2) Neutral density filters allow reducing the light intensity, shifting the range by three log units to mesopic light levels. 3) The intensity can be linearly varied over an intensity range via 768 mirrors per wavelength (0.39 nm steps). 4) 49,152 intensity values are possible for all 1,024 wavelengths, realized by pulse-width coding of the spectral light synthesizer. 5) Swapping of two different spectral light intensity distributions (steady states), takes about 10 ms. 6) Thus, wavelengths can be interpolated by temporal mixture of two monochromatic lights by the steering program, at a frequency of 100 Hz, which is well beyond the fusion frequency of the human eye. 7) The size of the round viewing field of the Ulbricht-sphere ranges from $\pm 90^\circ - < 5^\circ$ (fovea), viewed at a distance of 0.5 m [5]. 8) Thus the presented setup is best suited for psychophysical experiments, related to discrimination of two lights, presented by the two halves of the circular field, including temporal effects due to alternating flicker of up to 100 Hz. 9) The setup allows us now to measure data from individual observers, with one experimental setup, under identical viewing conditions. 10) The spectra of critical stimuli, e.g. at thresholds, will be measured at the location of the eye of the observer with a calibrated spectral camera [2]. So the angular and spectral intensity distribution can be determined that enters the eye. 11) Combined with the subjective judgments of the observer, this allows for gauging the psychophysiological models of human vision for photopic and mesopic intensity ranges.

Acknowledgements

This research is part of the fundamental research project "Measurement and Simulation of Photopic and Mesopic Vision", funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF-13N10915).

Literature

- [1] W. Backhaus, Psychophysiological measurement and simulation of photopic and mesopic vision, (this volume)
- [2] W. Backhaus, Spectral measurement of photopic and mesopic light, (this volume)
- [3] W. Backhaus, Physiological and psychophysical simulations of color vision in humans and animals. In: *Color Vision - Perspectives from Different Disciplines*, eds. W. Backhaus, R. Kliegl, J.S. Werner, pp. 45-77 (De Gruyter, Berlin, 1998)
- [4] Texas Instruments, Introduction to digital micromirror device (DMD) technology 3, Application Report DLPA008–July 2008, DMD 101 (2008)
- [5] E. Trautman, M.A. Trautman, P. Moskal, Preferred viewing distances for handheld and structurally fixed displays, *Ergonomics* 38, 385-1394 (1995)
- [6] G. Wyszecki, W.S. Stiles, *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, 2nd ed. (Wiley, Yew York, 1982)

Biometeorologische Aspekte in der Beurteilung des Tageslichtes in Hinsicht auf die Behandlung von SAD Patienten

Georgios Paissidis, Sotirios Bravos,

Stilvi Lighting Ltd, Ethn. Antistaseos 44, 15231 Halandri – Athens, GR ,

Harry Kambezidis ,

National Observatory of Athens, Lofos Nymphon, 11810 Athens GR

Die Weltwetterorganisation WMO hat für die Messung der Sonnenscheindauer den Schwellenwert $120\text{W}/\text{m}^2$ für die Messung der direkten solaren Strahlung eingeführt. Die Sonnenscheindauer bleibt somit eine eigentlich überschlägige quantitative Angabe, welche kaum etwas über die Qualität des Tageslichtes, seine Lichtfarbenvariationen und die temporalen bzw. biorythmischen Aspekte der entsprechenden Tageslichtphasen sowie andere gesundheitsrelevante Tageslichtmerkmale aussagen kann. Dies kann zu der Schlussfolgerung einer vermeintlichen Gleichwertigkeit aller Zeitintervalle innerhalb der Sonnenscheindauer führen, trotz aller anderen begleitenden radiometrischen Messungen des Tagesverlaufes der solaren Strahlung.

Auch wenn der Gegenteilbegriff der restlichen Tageslichtzeit bzw der "Nicht Sonnenscheindauer" bis heute nicht offiziell eingeführt wurde, ist dieser im Sinne solch einer dualistischen Auffassung angedeutet.

Trotzdem darf man im wissenschaftlichen Sinne und im Hinblick auf die aktuellen Befunde der Photobiologie die Qualität dieser restlichen dunkleren Tageslichtzeit nicht universalisiert betrachten.

Offensichtlich ist es Zeit, neue biometeorologisch gesinnte und die therapeutische Güte des Lichtes kennzeichnende Größen für die Beurteilung des Tageslichtes und insbesondere seiner Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit einzuführen. Ähnlich wie im Fall der Beurteilung diverser bekannten photobiologischen Risiken aufgrund eingebürgerter von entsprechenden individuellen sicherlich beträchtlich abweichender Empfindlichkeitsspektren und Expositionszeiten kann die therapeutische Güte des Tageslichtes bzw die damit verbundene biometeorologische Ressource nur krankheitsspezifisch und eingeschränkt aufgrund dosimetrischer Daten und über den

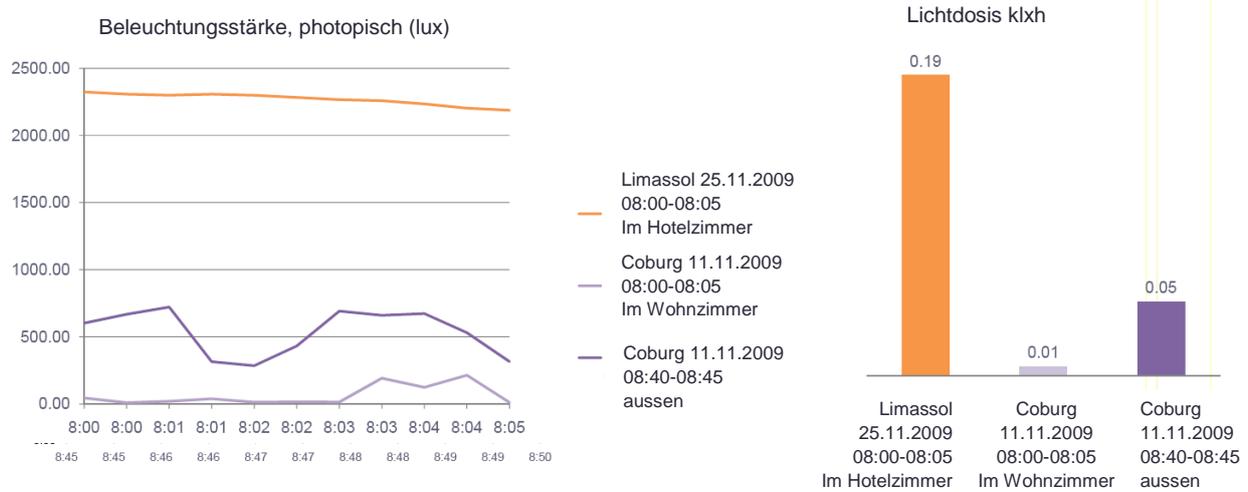
Rückgang der Krankheitssymptome aussagefähiger biologischen Indikatoren beschrieben werden.

Aufgrund dieser Gedanken wurde experimentell versucht, die biometeorologische Diskrepanz zwischen Südund Nordeuropa am Beispiel Coburg/ Deutschland - Limassol/ Zypern fuer den Monat November photodosimetrisch für verschiedene in Innen- und Außenräumen entfaltete Aktivitäten zu dokumentieren, sowie die möglichen biologischen Auswirkungen der Änderung der Tageslichtsequenz von Coburg nach Limassol reisender Testpersonen für einen Aufenthalt von einer Woche in südlich orientierten Hotelzimmern aufgrund von Blutproben zu erfassen und zu beurteilen. Die von den Testpersonen getragenen Photodosimeter haben sowohl $V(\lambda)$ gereches als auch circadianes Licht bewertet und haben alle 30 Sekunden einen integralen Messwert erfasst. Die nach einer Woche dramatische Änderung (+83%) von zu bestimmten Zeiten aufgenommenen Serotonin- und Melatoninwerten (-60%), welche im selben Labor in Coburg gemessen wurden kann kein Zufall sein, wenn man hierbei berücksichtigt, daß die gesamte während des Tages in Limassol empfangene Lichtdosis 100 mal höher ist bei ähnlicher Aktivität , 5 Minuten Lichtdosis früh morgens in besonnten Innenräumen 4 mal höher ist als 5 Minuten im Außenraum / Coburg und 20 Minuten Lichtdosis vor dem Sonnenuntergang in Limassol 10fach höher liegt als 20 Minuten Lichtdosis an einem wolkgigen Tag in Außenräumen von Coburg zwischen 13:20 und 13:40

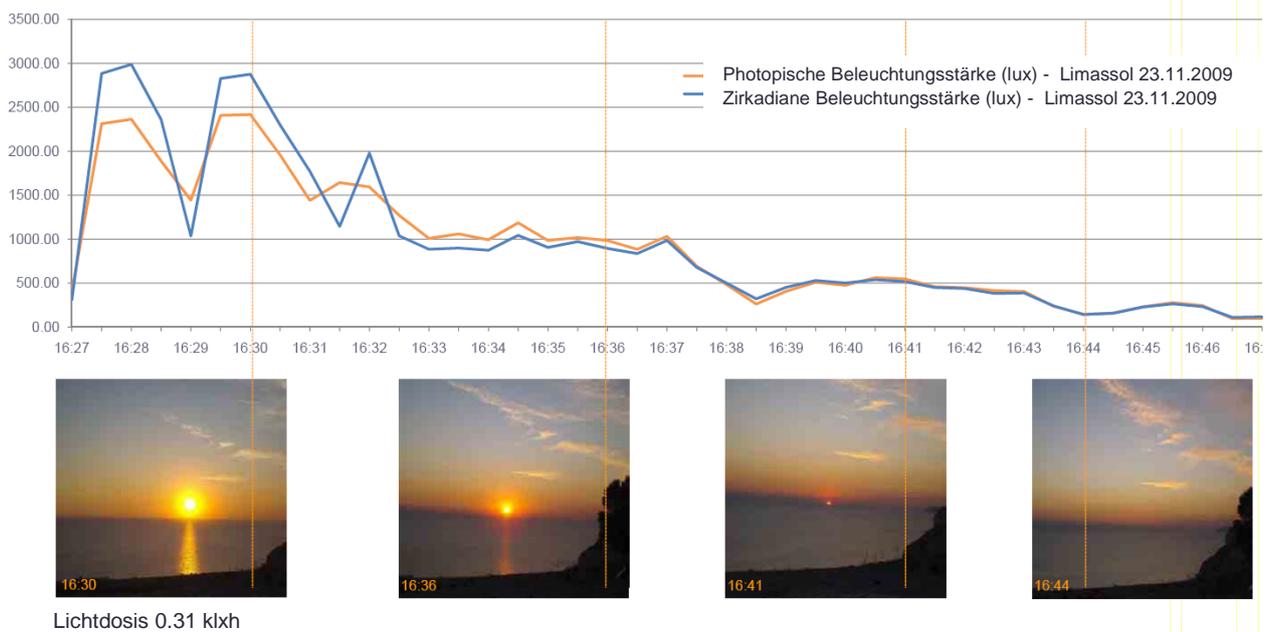
Literatur

- [1] Seasonal Affective Disorder and Beyond – Light Treatment for SA and non SAD Conditions, edited by Raymond W.Lam, M.D., American Psychiatric Press, Inc.
- [2] Light - Medicine of the Future, Jacob Liberman, O.D., Ph.D., Bear & Company
- [3] LuxBlick, Messung der täglichen Lichtexposition zur Beurteilung der nicht visuellen Wirkungen ueber das Auge, Sylvia Hubalek, Shaker Verlag, Aachen 2008

Photodosimetrischer Vergleich in Innenräumen von Limassol und Coburg und in Aussenräumen von Coburg



Photodosimetrische Erfassung des Sonnenunterganges in Limassol



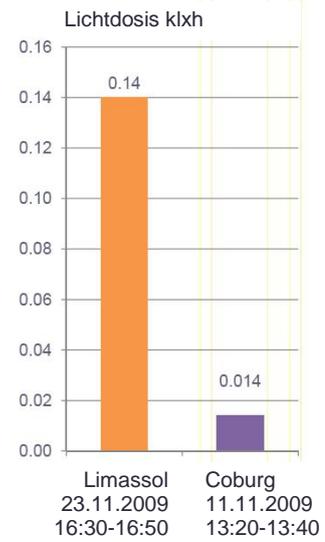
Komparative Photodosimetrische Beurteilung eines Sonnenunterganges in Limassol



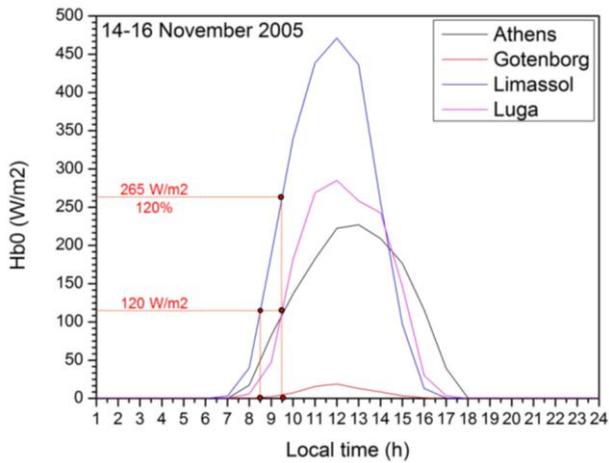
Limassol 23.11.2009 16:30-16:50
Lichtdosis 0,14klxh



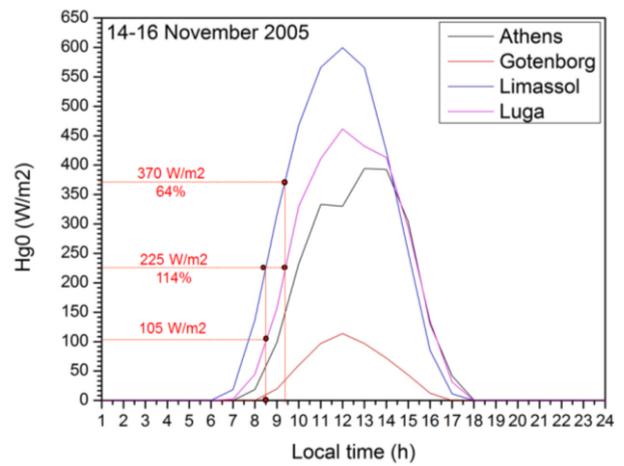
Coburg 11.11.2009 13:20-13:40
Lichtdosis 0,014klxh



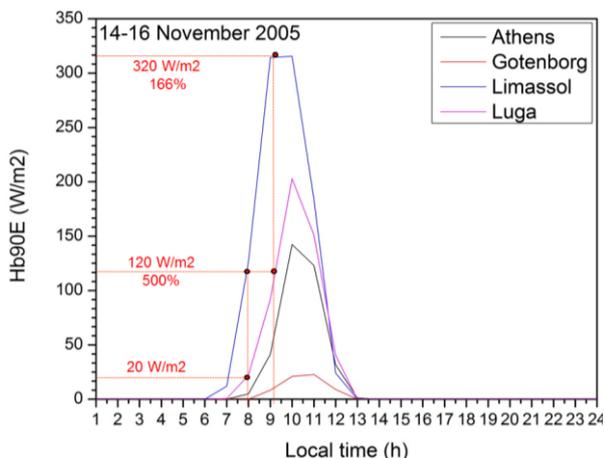
Direkte Solarstrahlung – Erdoberfläche



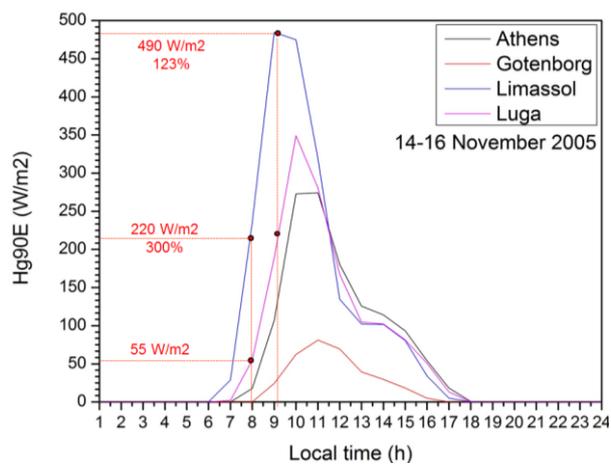
Globale Solarstrahlung – Erdoberfläche



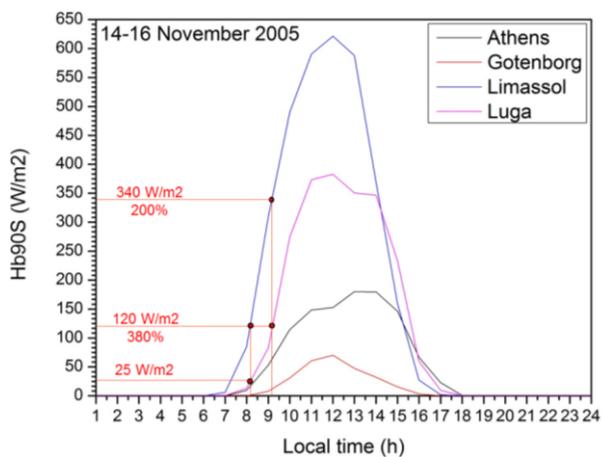
**Direkte Solarstrahlung – vertikal
Orientierung – Osten**



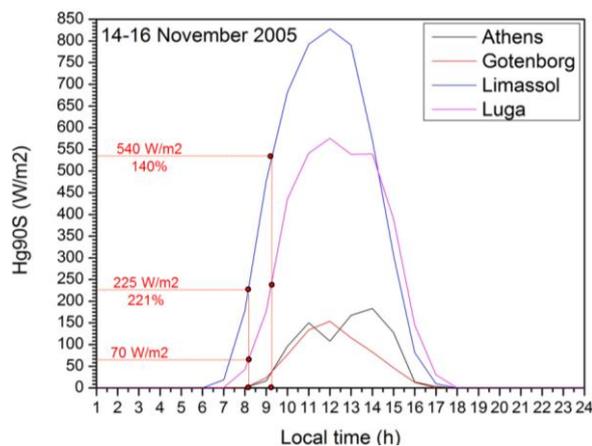
**Globale Solarstrahlung – vertikal
Orientierung – Osten**



**Direkte Solarstrahlung – vertikal
Orientierung – Süden**



**Globale Solarstrahlung – vertikal
Orientierung – Süden**



Messungen der natürlichen Beleuchtung im Freien und im Büro

Wjatscheslaw Pepler, Tran Quoc Khanh

Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Darmstadt

1 Einleitung

Die Entdeckungen, dass das circadiane System des Menschen hauptsächlich durch das Licht getriggert wird und dass es hierfür einen eigenen Rezeptor (lichtempfindlichen Ganglienzellen) im Auge gibt [Boy03, FGL10], haben in den letzten Jahrzehnten zu einem Aufschwung in der lichttechnischen Forschung geführt.

Es wurden seitdem verschiedene Konzepte aufgestellt, wie man durch die passende Beleuchtung auf den Menschen positiv einwirken könnte. Dies geschieht hauptsächlich durch die Änderung des Blauanteils des Lichts, da die lichtempfindlichen Ganglienzellen hier besonders empfindlich sind [FGL10].

Zum einen wurde eine aktivierende Beleuchtung vorgeschlagen, die zu verschiedenen Tageszeiten dem Menschen entweder durch das wärmere, gedimmte Licht zur Entspannung verhelfen soll, oder aber die Tiefphasen durch eine aktivierende kältere und hellere Beleuchtung ausgleichen könnte [Don06, DeK10]. Die Abbildung 1 bietet ein Beispiel hierfür.

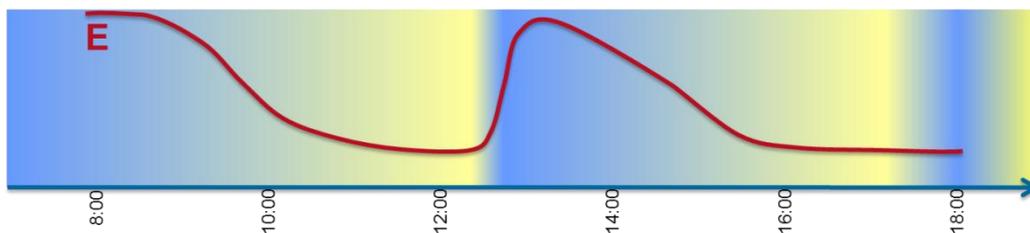


Abbildung 1: Konzept einer aktivierenden Beleuchtungssteuerung

Ein anderes Konzept versucht den natürlichen Verlauf des Tages abzubilden. Die Beleuchtungsstärke steigt zum Mittag hin auf ein Maximum und fällt im Laufe des Nachmittags. Die Farbtemperatur steigt und sinkt dazu (siehe Abbildung 2). Damit ist die Beleuchtung morgens und abends wärmer und dunkler, im Gegensatz zur Mittagszeit mit dem kalten und hellen Licht.

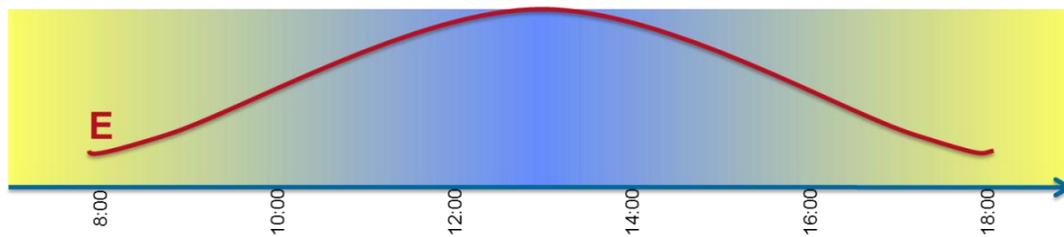


Abbildung 2: Konzept einer „natürlichen“ Beleuchtungssteuerung

Es sind zwar sowohl die Änderung der Beleuchtungsstärke über den Tag, als auch die Spektren des Sonnenlichts als auch des blauen Himmels bekannt [Fis82, Kro74]. Den Autoren liegen aber keine Studien vor, die gleichzeitig die Beleuchtungsstärke und Farbtemperaturänderung und damit auch die Änderung des Blauanteils über den Tag aufgezeichnet hätten, um die Dynamik der natürlichen Beleuchtung zu untersuchen.

2 Messergebnisse

2.1 Messungen in Freien

In einem nach allen Seiten offenem Feld wurden die Messungen im Freien an einem Tag im Sommer (29. Juni 2009) und einem Tag im Winter (17. Januar 2012) durchgeführt. Für die Messungen wurden möglichst klare Tage mit minimaler Bewölkung (Feder- und Schleierwolken) ausgesucht. Die Messungen wurden in der Nähe von Gelnhausen (50° nördliche Breite, 9° östliche Länge, 159 m ü. NN) durchgeführt.

Als Messgerät wurde ein Beleuchtungsstärke- und Farbmessgerät HCT-99 der Firma Gigahertz-Optik verwendet. Dabei wurden die Beleuchtungsstärke, Farbkoordinaten und die ähnlichste Farbtemperatur aufgezeichnet. Der Cosinus-angepasste Messempfänger wurde horizontal positioniert. Dadurch wurde sowohl die direkte Sonneneinstrahlung als auch die Strahlung des blauen Himmels erfasst.

Folgende Abbildungen zeigen die im Laufe des Tages aufgenommenen Werte für die Beleuchtungsstärke (Abbildung 3) und die ähnlichste Farbtemperatur (Abbildung 4) im Sommer und im Winter.

Die Beleuchtungsstärke steigt erwartungsgemäß morgen stark an, erreicht mittags (12 Uhr wahre Ortszeit) ein Maximum von ca. 105 klx am vermessenen Sommertag bzw. 30 klx am Wintertag und fällt wieder.

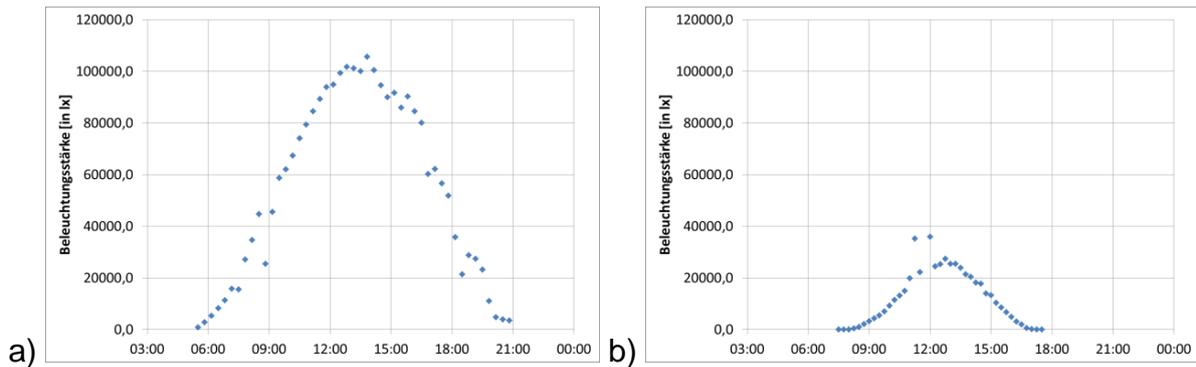


Abbildung 3: Verlauf der Beleuchtungsstärke, aufgenommen am 29. Juni 2009 (a) und am 17. Januar 2012 (b)

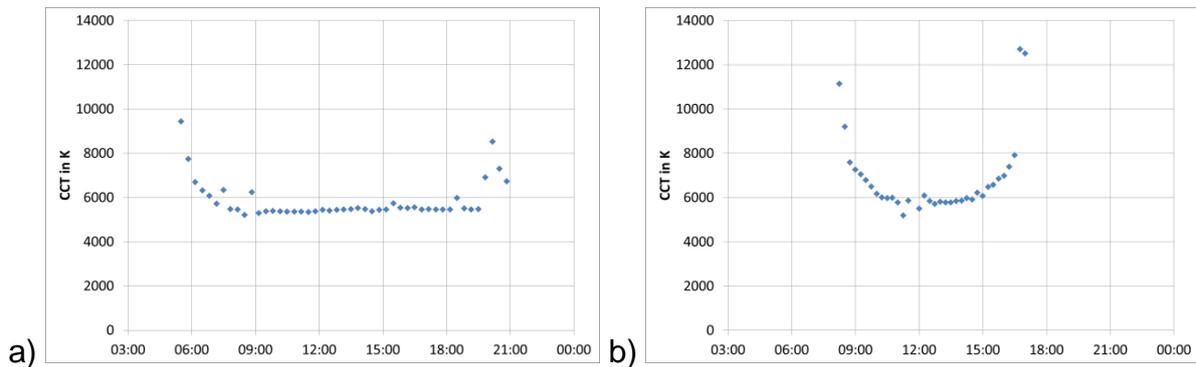


Abbildung 4: Änderung der ähnlichsten Farbtemperatur, aufgenommen am 29. Juni 2009 (a) und am 17. Januar 2012 (b)

Die ähnlichste Farbtemperatur zeigt dagegen einen anderen Verlauf. Vor dem Sonnenaufgang dominiert die Farbe des Himmels und die Farbtemperatur liegt bei ca. 10000-12000 K sehr hoch. Sie fällt dann zum Sonnenaufgang und bleibt danach den gesamten Tag über bei 5800-5900 K konstant. Nach dem Sonnenuntergang steigt die Farbtemperatur wieder an. In der Nacht bei sehr kleinen Beleuchtungswerten zeigt HCT-99 keine Werte für die Farbtemperatur an.

2.2 Messungen im Büro

In einem Büro des Fachgebiets in Darmstadt wurde der Verlauf der Beleuchtungsstärke und der Farbtemperatur mit dem gleichen Messgerät aufgezeichnet. Die künstliche Beleuchtung wurde während des Tages nicht eingeschaltet. Der Messempfänger wurde in der Mitte eines Büros platziert, wobei das Büro zwei Fenster in Richtung Süd-Ost und Süd-West besitzt. Die Abbildung 5 zeigt die Messergebnisse für den 27. Dezember 2011 an.

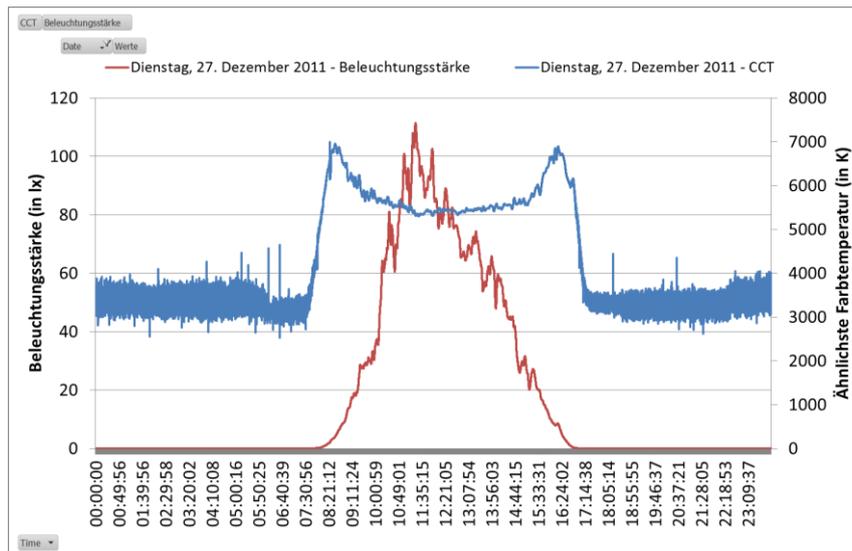


Abbildung 5: Verlauf der aufgezeichneten Beleuchtungsstärke (rot) und der ähnlichsten Farbtemperatur (blau)

Die Verläufe sowohl für die Beleuchtungsstärke als auch für Farbtemperatur entsprechen den im Freien aufgezeichneten Werten. Die nächtliche Farbtemperatur von ca. 3500 K kann durch die Straßenbeleuchtung, die bei den Messungen im Freien gefehlt hat, erklärt werden.

3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Es wurden die Verläufe der Beleuchtungsstärke und der Farbtemperatur der natürlichen Beleuchtung sowohl im Sommer als auch im Winter aufgezeichnet. Es hat sich dabei gezeigt, dass in der Natur im Laufe eines überwiegend klaren Tages die Farbtemperatur nahezu konstant bleibt. Die Dynamik in der Beleuchtung wird hauptsächlich durch die starke Änderung der Beleuchtungsstärke verursacht.

Literatur

- [Boy03] Boyce P. R.: *Human factors in lighting*. Taylor & Francis, London 2003
- [FGL10] Fördergemeinschaft Gutes Licht: *Wirkung des Lichts auf den Menschen*. Frankfurt 2010
- [Don06] Donnerbauer R.: *Besser arbeiten mit gutem Licht*. VDI nachrichten 2006
- [DeK10] De Kort Y., Smolders K.: *Effects of dynamic lighting on office workers*. Lighting Research and Technology 2010
- [Fis82] Fischer U.: *Tageslichttechnik*. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln 1982
- [Kro74] Krochmann J., Seidl M.: *Quantitative data on daylight for illuminating engineering*. Lighting Research and Technology 1974

LIGHT-CONTROLLED MELATONIN SUPPRESSION CONSIDERING PERSON'S AGE

Piazena, H.^{1,3}, L. Franke¹, R. Uebelhack¹ D. Kockott² and S. Völker³

¹Charité – Universitätsmedizin Berlin, AG Medizinische Photobiologie, Berlin
²DK UV-Technik, Hanau; ³Technische Universität Berlin, FG Lichttechnik, Berlin

ABSTRACT

The paper deals with the control of melatonin suppression in dependence of person's age by using white light sources of different spectra and geometry considering the needs to prevent glare.

1. INTRODUCTION

The discovery of retinal photoreceptors responsible for melatonin suppression and of their spectral sensitivity by Brainard et al. [1] and Thapan et al. [2] allows to develop both effective and energy-efficient light sources to stimulate the individual circadian rhythms based on age-depend spectral sensitivity of the eyes, on time of the day, on the needs to fulfil visual functions as well as on the needs for health protection. The circadian efficacy of light sources is sufficiently described by the spectrum, the irradiance, the geometry of exposure and the radiance.

2. METHODS

We exposed healthy volunteers of different ages and with free pupil adaptation to polychromatic (white) light sources of different spectra and determined the individual effective (circadian weighted) threshold irradiance responsible for melatonin suppression. In addition, we analyzed the effects of both different solid angles of exposure and of radiance.

3. RESULTS AND CONCLUSIONS

In case of exposure in 2π geometry, the effective (circadian weighted) threshold irradiance for getting saturation of melatonin suppression ranged between $E_{cm} \approx (0.3 \pm 0.1) \text{ W m}^{-2}$ for young adults and $E_{cm} \approx (0.6 \pm 0.2) \text{ W m}^{-2}$ for seniors. In addition, we have to take into consideration the threshold luminance concerning glare L_{VG} . Assuming a value of $L_{VG} =$

500 cd m⁻² as defined in DIN 5035-1 [3], the relative circadian effectiveness ($k_{cv} = E_c/E_v$) – or equivalently the Correlated Colour Temperature (CCT) – of white light sources has to exceed values k_{cv} of about 0.13 W m⁻² klx⁻¹ (or equivalently CCT ≥ 1450 K) for young adults and of about 0.25 W m⁻² klx⁻¹ (or equivalently CCT ≥ 1700 K) for seniors for getting sufficient melatonin suppression below the threshold value of glare (E_c - effective (weighted) circadian irradiance, E_v – illuminance).

In case of light exposures using threshold irradiance E_{cm} but with reduced solid angles (Ω) and adequately increased radiances, melatonin suppression decreased significantly in the range $0.1 \text{ sr} \leq \Omega \leq 0.5 \text{ sr}$ due to significant reduction of the number of exposed receptors on the retina whereas melatonin concentration increased for solid angles below about 0.1 sr. Moreover, increase of radiance is limited by glare. Thus, the criterion $k_{cv} \cdot \Omega > E_{cm}/L_{vG}$ has to be met in order to get sufficient melatonin suppression without glare.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to the Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Projektträger des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) for generous support of the investigation (Project No. 13N 8709).

REFERENCES

- [1] Brainard, G.C., Hanifin, J.P., Greeson, J.M., Byrne, B., Glickman, G., Gerner, E. and M.D. Rollag (2001): Action spectrum for melatonin regulation in humans: Evidence for a novel circadian photoreceptor.- *J. Neurosci.* August 15, 2001, **21(16)** 6405-6412.
- [2] Thapan, K., Arendt, J. and D.J. Skene (2001): An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans.- *J. Physiol.* **535.1**, 2001, 261-267.
- [3] DIN 5035-1 (1990): Beleuchtung mit künstlichem Licht – Teil 1: Begriffe und allgemeine Anforderungen.- Beuth-Verlag, Berlin, 1990.

Dämmen und Belichten – Lichtverlust in Wohnungen nach thermischer Sanierung

Arch. Dipl.-Ing. Gregor Radinger, MSc

Donau-Universität Krems, Dr.-Karl-Dorrek-Str. 30, 3500 Krems

1 Einleitung

Im Zuge der Sanierungen von Bestandswohnbauten wird primär auf die Dämmung der Gebäudehülle zur Minimierung thermischer Verluste abgezielt. Die damit einhergehenden Veränderungen der Geometrien von Fassadenöffnungen bewirken Reduktionen von Tageslichteinträgen.

Da die Quantifizierung von Tageslicht in Innenräumen gemäß DIN 5034¹ mehrheitlich durch die Ermittlung von Tageslichtquotienten (TQ) bei diffusem Licht erfolgt, bleiben Gebäudestandort, Orientierung und direkter Lichteinfall unberücksichtigt.

Im Sinne der ganzheitlichen Betrachtung sanierungsbedingter Veränderungen von Lichtsituationen in Wohnräumen wurden folgende, lichtrelevante Aspekte der Gebäudesanierung anhand realer Wiener Wohnungen ausgewertet und dargestellt:²

- Diffus- und Direktlichteintrag in Wohnungen, vor und nach Sanierungen
- Tageslichtautonomie und Kunstlichteinsatz, vor und nach Sanierungen
- Qualitative Analyse divergierender Lichtsituationen

2 Sanierungsbedingte Veränderungen von Diffuslichteinträgen

An insgesamt 10 Aufenthaltsräumen wurden Untersuchungen zur Quantifizierung von sanierungsbedingten Veränderungen der diffusen Lichteinträge durchgeführt. Die durchschnittlichen Raumdimensionen betragen 3,8m / 4,8m / 2,6m (l/b/h), Oberflächenqualitäten wurden nach DIN EN 12464 angenommen.³

¹ Vgl. DIN 5034, Teil 1, 3.12, 1999

² Studie im Auftrag der Wiener Magistratsabteilung 50

³ Vgl. DIN 12464, 4.2, 2009

2.1 Berechnungsmethode

Nach exakter Modellierung von Raum- und Fassadengeometrie wurden computerunterstützte Berechnungen von quantitativen Lichteinträgen vor und nach der Sanierung bei diffusem Licht – also bei gleichmäßig bedecktem Himmel - vorgenommen.⁴ Gemäß DIN 5034 wurden durchschnittliche Tageslichtquotientwerte errechnet und im Anschluss verglichen und quantitativ bewertet.

2.2 Sanierungsmethode

Als Sanierungsmethode wurde in allen Berechnungen eine außen liegende Wärmedämmung mit Schichtstärke $d = 10\text{cm}$ angenommen. Fensterleibungen wurden in allen Fällen mit 4cm überdämmt. Bestehende Fenster aus Kunststoff mit Zweischeiben-Isolierverglasung wurden belassen, die Position der Fenster in der Außenwand wurden nicht verändert.

2.3 Ergebnisse

In allen untersuchten Aufenthaltsräumen sind deutliche, sanierungsbedingte Reduktionen des Diffuslichteintrages darstellbar. Diese betragen im Mittel $11,73\%$, die höchsten Diffuslichtverluste liegen bei 21% , was dem Verzicht auf jedes fünfte Fenster gleichkommen würde.

3 Sanierungsbedingte Veränderungen von Direktlichteinträgen

Zusätzlich zu orientierungsunabhängigen Diffuslichtberechnungen wurden quantitative Direktlichteinträge für einen exemplarischen Aufenthaltsraum, Dimension $l/b/h = 5\text{m}/3\text{m}/2,6\text{m}$, Fensterfläche = $1,75\text{m}^2$, vor und nach thermischen Sanierungen unter Berücksichtigung der Raumorientierung berechnet. Die Untersuchungen erfolgten unter Berücksichtigung aller vier Haupthimmelsrichtungen (Nord- Ost- Süd und Westorientierung).

⁴ RELUX professional, Version 2, RELUX GmbH, www.relux.biz

3.1 Berechnungsmethode

Die sanierungsbedingten Unterschiede des quantitativen Direktlichteintrages wurden - in Anlehnung an TQ Berechnungsmethoden nach DIN 5034 - an Messpunkten auf einer Messfläche ermittelt. Dabei wurde die durchschnittliche Besonnungsdauer der Messpunkte während eines Jahres bzw. monatsweise errechnet. Sanierungsbedingte Unterschiede der Besonnungszeitender Wohnräume können so verglichen werden.⁵ Gleichzeitig wurden die Direktlicheinträge anhand von Raummodellen (Maßstab 1:20) in Künstlichen Himmel der Donau-Universität dargestellt.

3.2 Sanierungsmethoden

Um das Potential unterschiedlicher Sanierungsmethoden zur Optimierung von Lichteinträgen in Innenräumen darzustellen, wurden neben der Sanierungsvariante mit schachtartiger, rechtwinkliger Leibungen auch Abschrägungen der Dämmschicht im Leibungsbereich bzw. der Einbau von Fenstern mit verringerter Rahmenansichtsbreite untersucht.

3.3 Ergebnisse

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass Sanierungsvarianten mit abgeschrägten Leibungsausbildungen bzw. Verminderung von Rahmenansichtsbreiten eine Erhöhung der Direktlichteinträge gegenüber dem Bestandszustand ermöglichen. Konventionelle Sanierungsmaßnahmen bewirken dagegen in jedem Fall Verringerungen von Direkt- und Diffuslichteinträgen.

4 Sanierungsbedingte Veränderungen von Tageslichtautonomien

Tageslichtautonomieberechnungen geben Auskunft darüber, wie lange natürliches Tageslicht zur Aufrechterhaltung einer erforderlichen Beleuchtungsstärke ausreicht, bzw. Kunstlicht zugeschaltet werden muss und welche Veränderungen sich dabei durch Sanierungsmaßnahmen ergeben können. Die Ergebnisse sind Grundlage für die Bewertung des Energieverbrauches für künstliche Beleuchtung.

⁵ Berechnungen mit Autodesk Ecotect, <http://www.autodesk.de>,

4.1 Berechnungsmethode

Für die Untersuchungen wurde der im Punkt 3 beschriebenen Versuchsraum herangezogen. Als Rahmenbedingung für computerunterstützte Tageslichtautonomieermittlungen wurden ein errechneter Tageslichtquotient von 1,27%, eine Nutzungsdauer zwischen 7.00 Uhr und 22.00Uhr sowie eine erforderliche Beleuchtungsstärke von 300lux auf einer Nutzebene 50cm oberhalb des Fußbodens angenommen.⁶

4.2 Sanierungsmethoden

Sowohl konventionelle Sanierungsvarianten mit rechtwinkligen Leibungen als auch jene, die Abschrägungen von Leibungsgeometrien und Verringerungen der Ansichtsbreiten von Fensterrahmen vorsehen wurden für die Tageslichtautonomieberechnungen herangezogen.

4.3 Ergebnisse

Ausgehend von sehr niedrigen Tageslichtautonomiewerten von jährlich 23% vor der Gebäudesanierung (d.h. an weniger als einem Viertel der gesamtjährlichen Berechnungszeit ist natürliches Licht zur Aufrechterhaltung einer Beleuchtungsstärke von 300 lux ausreichend vorhanden) werden diese durch die gewählten Sanierungsvarianten zusätzlich um bis zu 35% reduziert. V.a. in Monaten mit hohem Tageslichtangebot (etwa von April bis September) verlängern sich Zuschaltzeiten von Kunstlicht verglichen mit der Lichtsituation vor der Sanierung.

5 Qualitative Analyse divergierender Lichtsituationen

Die Ausgewogenheit zwischen diffusem und gerichtetem Licht in Innenräumen trägt wesentlich zu visueller Behaglichkeit und zur Bewältigung von Sehaufgaben bei. Das Verhältnis von unterschiedlichen Beleuchtungsstärken auf horizontalen und vertikalen Fläche spielt dabei eine wesentliche Rolle.⁷ Deshalb wurde untersucht, welchen Stellwert Tageslicht in seinen unterschiedlichen Prägungen, vorwiegend diffus oder mit deutlichem

⁶ Berechnungen mit RELUX professional, Version 2, RELUX GmbH, www.relux.biz

⁷ Vgl. DIN 12464, Pkt.4.6.3, Modelling, 2009

Direktlichtanteil, in der allgemeinen qualitativen Beurteilung von Raumsituationen einnimmt.

5.1 Untersuchungsmethode

Über das Onlineportal einer großen österreichischen Tageszeitung wurde eine Umfrage durchgeführt, in der 25 Raumsituationen bei diffusem und direktem Lichteintrag gezeigt wurden. Die insgesamt 50 Einzelbilder wurden einer Gruppe von TeilnehmerInnen aus mehr als 100 Personen in randomisierter Reihenfolge vorgeführt. Das Erkennen von Bilderpaaren sollte dadurch vermieden werden.

Folgende Frage wurde zu jedem Einzelbild gestellt:

Ich empfinde den dargestellten Raum als...

Die Beantwortung erfolgte durch Anklicken folgender fünf vorgeschlagener Antworten:

+ sehr angenehm

+ eher angenehm

+ neutral

+ eher unangenehm

+ sehr unangenehm

Nach erfolgter Markierung erscheint das nächste der insgesamt 50 Bilder.

Die Umfrageauswertung erfolgte durch Vergabe von Akzeptanzpunkten (-2, -1, 0,+1,+2)

5.2 Ergebnisse

In den Auswertungen zeigt sich deutlich, dass hohe subjektive Raumakzeptanz mit dem Vorhandensein von Direktlicht einhergeht.

Bei 21 von 25 Raumpaaren wurden die gezeigten Direktlichtsituationen positiver wahrgenommen als Diffuslichtdarstellungen, die großteils deutlich schlechter bewertet wurden.

Dies verdeutlicht klar, dass der Umgang mit Direktlichteinträgen einen wesentlichen Beitrag zur allg. Raumakzeptanz leistet. Dies ist sowohl im Neubau als auch im Fall von Gebäudesanierungen zu berücksichtigen.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Um sanierungsbedingten Verschlechterungen von Lichtsituationen in Wohnräumen vorzubeugen, werden folgende Maßnahmen empfohlen:

- + Verwendung von Fenstern mit geringem Rahmenanteil
- + Verwendung von inneren und äußeren Bauteiloberflächen mit hohen Reflexionseigenschaften
- + Modellierung von Fensterleibungen, Abschrägungen im Sturz- und Flankenbereich
- + Verwendung von transparenten Brüstungsausfachungen von Balkonen zur Steigerung des Lichteintrages im Bodenbereich der dahinterliegenden Aufenthaltsräume
- + Optimierung der Lichttransmissionseigenschaften von Verglasungen
- + Berücksichtigung und Ermöglichung von Direktlichteintrag

Literatur

DIN 5034-1 Tageslicht in Innenräumen, allgemeine Anforderungen, 1999

DIN 12464 Licht und Beleuchtung von Arbeitsstätten, 2007

Bernard Erich: Wiener Fenster Gestalten und Erhalten, Studie im Auftrag der MA 19, seit 1998

Schierz Christoph: Wie wird Leuchtdichte subjektiv als Helligkeit wahrgenommen? Paper Lux Junior 2007, TU Ilmenau, FG Lichttechnik

Abbildungen

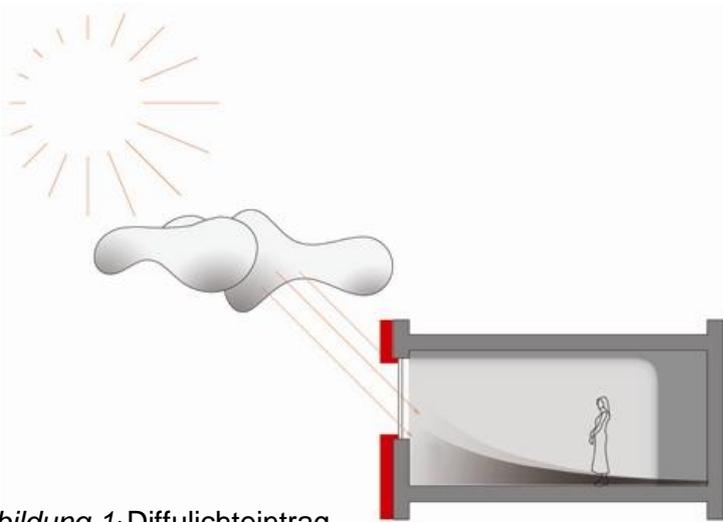


Abbildung 1: Diffuslichteintrag

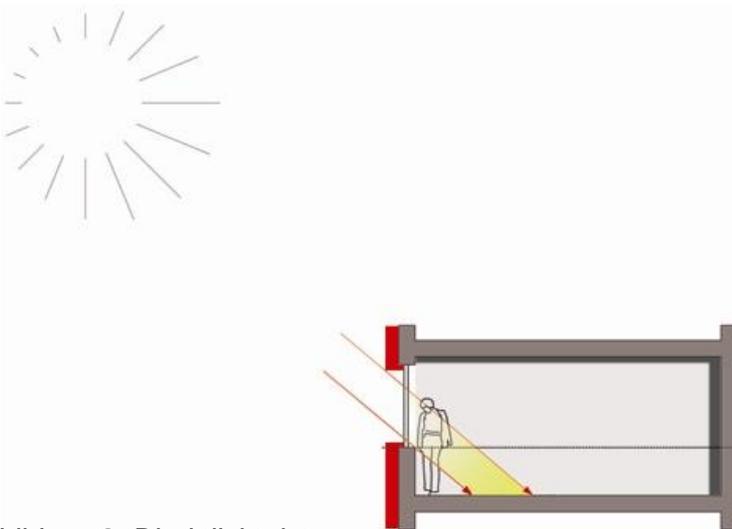


Abbildung 2: Direktlichteintrag

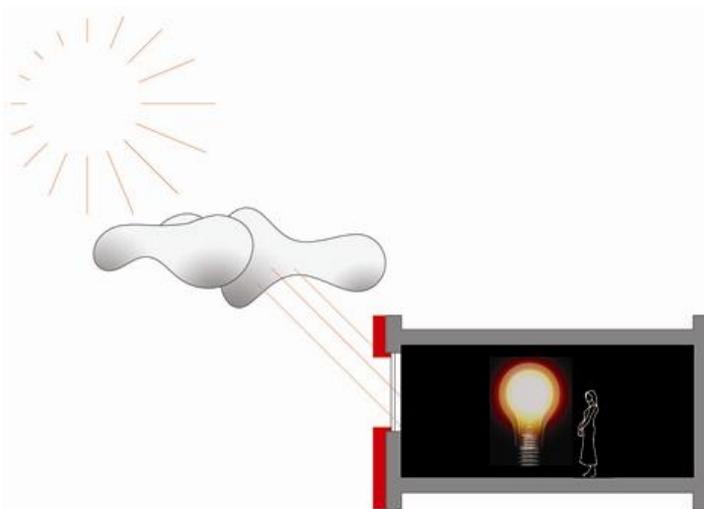


Abbildung 1: Tageslichtautonomie



Abbildung 2: Beispiel Bilderpaar für Umfrage zur qualitativen Raumwahrnehmung bei diffusem und direktem Lichteintrag

Herausgeber: Stephan Völker, Fachgebiet Lichttechnik
Institut für Energie- und Automatisierungstechnik
Technische Universität Berlin
Einsteinufer 19, 10587 Berlin

**Druck/
Printing:** Endformat Gesellschaft für gute Druckerzeugnisse mbH
Köpenicker Str. 187-188, D-10997 Berlin

**Vertrieb/
Publisher:** Universitätsverlag der TU Berlin
Universitätsbibliothek
Fasanenstr. 88 (im VOLKSWAGEN-Haus), D-10623 Berlin
Tel.: (030)314-76131; Fax.: (030)314-76133
E-Mail: publikationen@ub.tu-berlin.de
<http://www.univerlag.tu-berlin.de>

Berlin, Februar 2012

ISBN 978-3-7983-2405-3 (Druckausgabe)

ISBN 978-3-7983-2406-0 (Online-Version)

