

Wärmetherapie mit wassergefilterter Infrarot-A-Strahlung

Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten

Herausgegeben von
Peter Vaupel und Winfried Krüger

Mit Beiträgen von

G. Becker, C. C. Cobarg, H. J. Feldmann, G. Hahn, G. Hellige,
A. Katalinic, D. K. Kelleher, W. Krüger, B. Leemann, H. v. Lieven,
S. Merle, B. Ryffel, J. Rzeznik, M. Saulnier, M. H. Seegenschmiedt,
E. Stofft, M. Stuschke, E. Sutter, U. Trostdorf, P. Vaupel, E. Walther,
W. Weyland, F. Zywietz

2., neubearbeitete und erweiterte Auflage

78 Abbildungen, 27 Tabellen



Hippokrates Verlag Stuttgart

Physikalische Grundlagen der wassergefilterten Infrarot-A-Strahlung

C.C. Cobarg

Einleitung

Seit dem Altertum wurde immer wieder von überraschenden Heilungen oder Besserungen bei schweren akuten oder chronischen, sogar malignen, Erkrankungen durch hochfieberhafte Prozesse berichtet. Ebenso lange wird versucht, die dem Fiebers zugeschriebene Heilwirkung durch Ganzkörper-Überwärmung "von außen", also mit physikalischen Mitteln, hervorzurufen. Hierfür eignet sich auch heißes Wasser, wie die bereits in der Antike hochentwickelte Heizungstechnik und Badekultur zeigen.

Ebenso galten die wärmenden Sonnenstrahlen von jeher als heilkräftig und gesundheitsfördernd (Heliotherapie). Jedoch begannen erst um die Wende vom 18. zum 19. Jahrhundert manche mystischen Vorstellungen, bedingt durch die stürmische Entwicklung der exakten Naturwissenschaften, gesichertem Wissen Platz zu machen.

Noch bevor genauere spektroskopische Untersuchungen zur Farbenzerlegung des Sonnenlichtes möglich waren, hatte man zu dieser Zeit erkannt, daß sich die Wirkungen der Sonnenstrahlen über den Bereich des sichtbaren Spektrums hinaus erstrecken. Um 1800 wies *J.W. Ritter* unter Verwendung von Silberchlorid-Papier die UV-Strahlung nach (6). Der als Entdecker des Uranus und Erforscher der Struktur des Milchstraßensystems berühmt gewordene Astronom *F.W. Herschel* veröffentlichte 1801 seine Arbeit über die Entdeckung der infraroten Strahlen durch thermometrische Messungen (4).

Wenn in diesem Buch über Aufbau, Wirkungsweise und Anwendung eines neuen medizinischen Behandlungsgerätes zur loko-regionalen Erwärmung mit wassergefilterter Infrarot-A-Strahlung berichtet wird, ist eingangs ein kleiner Exkurs in einige Bereiche der elementaren Strahlenphysik angebracht. Wie notwendig in diesem Zusammenhang eine Auffrischung grundlegender Kenntnisse ist, zeigt sich immer wieder beim Gespräch in der Praxis.

Spätestens seit Bekanntwerden der verheerenden gesundheitlichen Folgen nach Atombombenabwürfen und -tests sowie nach den bisherigen Reaktorkatastrophen wird "Strahlung" aller Art als bedrohlich betrachtet. Der Nicht-Physiker hat dabei aber selten eine genaue Vorstellung über den Energieinhalt einer bestimmten Strahlung und damit über ihre Reaktionsfähigkeit gegenüber lebendem Gewebe. So sind z.B. UV-Strahlen im Vergleich mit Infrarot-Strahlen in dieser Beziehung bis zu 10.000fach energiereicher und damit "gefährlicher". Solche Wissenslücken haben in Einzelfällen sogar dazu geführt, daß Patienten gegen mögliche Wär-

meschäden durch *Infrarotstrahlung* im Gesichtsbereich der Gebrauch einer *UV-Schutzbrille* empfohlen wurde.

Daher soll im folgenden dem Anwender der neuen Bestrahlungseinrichtung, deren physikalische Grundlagen seit fast 100 Jahren bekannt sind, von Anfang an gezeigt werden, was das Gerät für die loko-regionale therapeutische Erwärmung beim Menschen zu leisten vermag und was es, aus prinzipiellen Gründen, nicht kann. Erst auf einer solchen Grundlage ist eine optimale Nutzung möglich.

Elektromagnetische Strahlung

Jegliche Strahlung läßt sich nach den Gesetzen der klassischen Physik als elektromagnetische Welle beschreiben, die Energie transportiert. Die Menge an Energie, die einer bestimmten Wellenlänge entspricht, ergibt sich aus der *Planckschen Formel*

$$E = h \cdot \nu \quad (1)$$

in der h eine Naturkonstante (das *Plancksche Wirkungsquantum*) und ν die Frequenz der Strahlung darstellt. Frequenz ν und Wellenlänge λ sind über die Gleichung

$$c = \lambda \cdot \nu \quad \text{oder} \quad c / \lambda = \nu \quad (2)$$

miteinander verknüpft. Da c (Lichtgeschwindigkeit) konstant ist, verhalten sich Wellenlänge und Frequenz umgekehrt proportional: Je kürzer die Wellenlänge, desto höher die Frequenz ν und umso höher die Energie der betreffenden Strahlung.

Das riesige Spektrum der elektromagnetischen Wellen reicht von der Gammastrahlung des Weltraums bis zu langen Rundfunkwellen zur Übertragung von Sprache und Musik über mehr als 20 Zehnerpotenzen bezüglich der Wellenlängen. Dazwischen liegt, vergleichsweise sehr schmal, der Bereich des sichtbaren Lichtes zwischen $\lambda = 0,38\text{-}0,76 \mu\text{m}$ mit seinen unsichtbaren "Randbezirken" Ultraviolett (UV) zwischen $\lambda = 0,01\text{-}0,38 \mu\text{m}$ auf der kurzwelligen und Infrarot (IR), auch Ultrarot (UR) genannt, mit $0,76\text{-}1000 \mu\text{m}$ auf der langwelligen Seite. Infrarotstrahlung ist, wie oben ausgeführt, aufgrund ihrer größeren Wellenlänge (kleinerer Frequenz) energieärmer als sichtbares Licht und erst recht energieärmer als UV-Strahlung.

UV-Strahlen können bestimmte chemische Bindungen spalten und damit auch zu Schäden an lebenswichtigen Verbindungen im Körper führen. Andererseits sind UV-Strahlen ("Höhensonne") fähig, durch Spaltung chemischer Bindungen u.a. aus körpereigenen Stoffen D-Vitamine zu bilden und so in gewissem Maße zur

Rachitisprophylaxe beizutragen. Diese in der Natur oft anzutreffende Ambivalenz von Wirkungen aller Art, die schon von *Paracelsus* (1493-1541) für Arzneimittel mit dem berühmten "...et dosis facit venenum" beschrieben wurde, kann dem Patienten nicht oft genug ins Bewußtsein gerückt werden.

Sichtbares Licht vermag vergleichsweise "milde" photochemische Reaktionen auszulösen, auf denen unser Gesichtssinn beruht und welche die Photographie ermöglichen. Infrarotstrahlung ist lediglich noch in der Lage, die Eigenschwingung von Molekülen mehr oder weniger stark anzuregen. Die Zunahme der molekularen Schwingungsenergie wird makroskopisch als Erwärmung des bestrahlten "Körpers" wahrgenommen.

Bei kompliziert zusammengesetzten Stoffen wie tierischen (bzw. menschlichen) Geweben mit ihrem komplexen, feinstrukturierten Aufbau, werden nicht alle Molekülararten gleichmäßig "erwärmt". Voraussetzung für eine durch Bestrahlung verursachte Temperaturerhöhung ist, daß die Strahlung von den Molekülen absorbiert werden muß. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Struktur absorbieren aber die Moleküle nur Strahlung mit bestimmten Wellenlängen, die - vereinfacht formuliert - die verschiedenen Moleküle unterschiedlich stark erwärmen.

Wechselwirkungen zwischen Strahlung und Materie

Aus der Optik ist bekannt, daß ein Körper, der alles Licht absorbiert, schwarz aussieht. In der Theoretischen Physik spielt der ideale "Schwarze Körper", der Strahlung aller Bereiche absorbiert und in Wärme umwandelt, als Modellfall für grundlegende Berechnungen eine große Rolle. Ein solcher "Schwarzer Körper" ist vorstellbar als ein geschlossenes Gefäß mit einer kleinen Öffnung, durch die Strahlung eindringen, aber den Innenraum wegen der dort an den Wänden stattfindenden mehrfachen Streuungen praktisch nicht wieder verlassen kann. Die Strahlung wird letztlich absorbiert und in Wärme umgewandelt. Bei andauernder Strahlenabsorption und absoluter (nicht erreichbarer) Isolierung müßte sich der "Schwarze Körper" unendlich aufheizen. Dies widerspricht aber jeder praktischen Erfahrung. Es zeigt sich, daß ein Körper, der Strahlung absorbiert, neben Wärme auch Strahlung abgeben muß, um mit seiner Umgebung in einen gewissen Gleichgewichtszustand zu kommen (2). Dies gilt für jeden Körper oberhalb des absoluten Nullpunktes, also auch für den menschlichen Körper.

Die *Plancksche* Gleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen der Wellenlänge einer Strahlung und der Energie ihrer Strahlungsquanten. Außer dieser Gleichung spielen zwei weitere Gesetze zum Verständnis der Physik der wasser-gefilterten IR-A-Strahlung eine wichtige Rolle. Die Beziehung zwischen der Temperatur eines strahlenden Körpers und der Wellenlänge des Strahlungsmaximums λ_{\max} der von ihm ausgesandten Strahlung beschreibt das *Wiensche* Verschiebungsgesetz:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2880 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (3)$$

wobei T, gemessen in Kelvin (K), die für λ_{\max} zugehörige Temperatur ist. Ein glühender Körper von 2880 K (vgl.: $2880 - 273 = 2607^\circ\text{C}$) strahlt mit einer maximalen Wellenlänge von

$$\lambda_{\max} = \frac{2880 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{2880 \text{ K}} = 1 \mu\text{m}$$

Die vom menschlichen Körper (37°C bzw. $37 + 273 = 310 \text{ K}$) abgegebene Strahlung hat ihr Strahlungsmaximum bei einer Wellenlänge von

$$\lambda_{\max} = \frac{2880 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{(273 + 37) \text{ K}} \approx 9,3 \mu\text{m}$$

Vom Vorhandensein dieser Strahlung kann man sich leicht überzeugen, wenn man in die Nähe des Infrarot-Bewegungsmelders einer Alarmanlage kommt.

Die beiden Beispiele sind Einzelfälle der in *Abbildung 1* dargestellten Gesetzmäßigkeit: Die Wellenlänge λ_{\max} des jeweiligen Strahlungsmaximums ist um so kürzer, je höher die Temperatur, gemessen in Kelvin, ist. In der Abbildung ist ein weiteres Strahlungsgesetz, das *Stefan-Boltzmannsche* Gesetz enthalten. Die Intensität E der Gesamtstrahlung ist der 4. Potenz der absoluten Temperatur T proportional:

$$E = \sigma \cdot T^4 \quad (4)$$

wobei σ eine Konstante darstellt. In *Abbildung 1* kommt diese Gesetzmäßigkeit dadurch zum Ausdruck, daß sich mit steigenden Temperaturen ($K_1 \rightarrow K_4$) nicht nur die Kurven nach links, zu kürzeren Wellenlängen hin, verschieben, sondern dabei noch sehr stark ansteigen und immer größere Flächen umschließen.

Aus diesen theoretischen Erörterungen geht hervor, daß jede Strahlungsquelle eine ihrer Temperatur entsprechende, durch das Strahlungsmaximum λ_{\max} und die Intensität gekennzeichnete Strahlung emittiert. Es ist also für die Wärmetherapie beim Menschen von großer Bedeutung, in welchem Wellenlängenbereich eine Heizquelle überwiegend strahlt. Davon hängt in entscheidendem Maße die Verträglichkeit der Strahlung und auch die Menge an Energie ab, die der Körper aufnehmen kann (oder soll). Wie *Tabelle 1* zeigt, ist es durchaus nicht gleichgültig, ob man sich von einem Kachelofen, der Heizspirale einer Elektrokochplatte oder einer Glühlampe (Infrarotstrahler) mit Wasserfilter bestrahlen läßt.

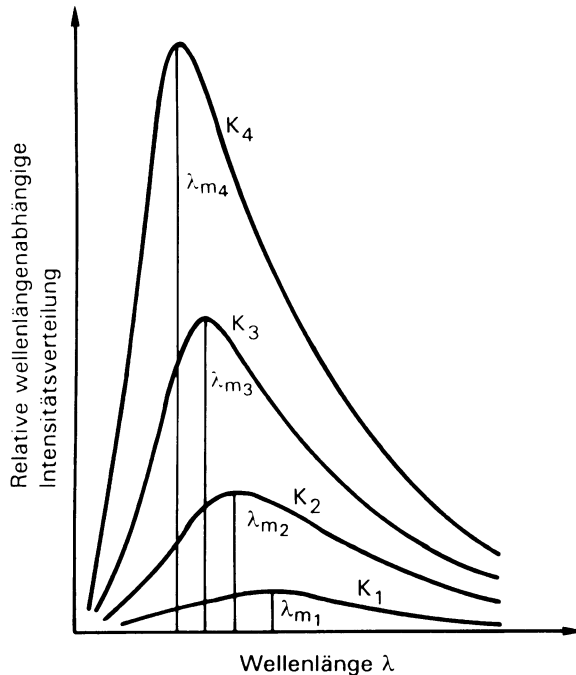


Abb. 1: Schematische Darstellung der temperaturabhängigen Strahlungsverteilung und -intensität, wie sie durch das *Wiensche Verschiebungsgesetz* und das *Stefan-Boltzmannsche Gesetz* beschrieben werden. Weitere Erläuterungen s. Text

Absorption von Infrarot-Strahlung im menschlichen Körper

Wie bereits erläutert, setzt die Erwärmung eines Körpers, also auch des menschlichen Körpers, durch Strahlung deren Absorption voraus. Voraussetzung hierfür ist allerdings, daß die Strahlung nicht schon an der Oberfläche des Körpers vollständig reflektiert oder gestreut wird, sondern - im Falle des Menschen - die Haut eine gewisse Durchlässigkeit für Wärmestrahlung besitzt. Hiervon und von anderen physikalischen Parametern hängt die "Tiefenwirksamkeit" einer solchen Bestrahlung ab (s. Beitrag von *G. Hellige u. Mitarb.*, S. 63ff.).

Diese Größen sind alle wellenlängenabhängig. Infrarote Strahlung wird gewöhnlich in Infrarot-A (IR-A; Wellenlänge 0,76-1,4 μm), Infrarot-B (IR-B; Wellenlänge 1,4-3,0 μm) und Infrarot-C (IR-C; Wellenlänge 3,0-1000 μm) unterteilt.

Die obige Einteilung ist historisch bedingt und geht auf frühere Messungen der Transmission und Reflexion von optischen Gläsern zurück. Da auch lebendes Gewebe sich unterschiedlich gegenüber den verschiedenen Spektralbereichen verhält, hat diese Einteilung auch ein gewisses physiologisches Korrelat.

Tabelle 1: Maximal verträgliche Bestrahlungsstärke aus unterschiedlichen Strahlenquellen (nach 3)

Strahler	Spektralbereich ¹⁾	Maximal verträgliche Bestrahlungsstärke ²⁾	Absorbierte Strahlung ³⁾
	μm	$\text{J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$	$\text{J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$
Heizspirale 400°C	1,1 - 40	5,44	5,11
Heizspirale 1000°C	0,7 - 8	4,82	4,53
Kohlebogenstrahler	0,3 - 7	6,79	6,24
Glühlampe	0,3 - 3,5	7,16	6,45
Glühlampe mit Wasserfilter	0,6 - 1,3	13,28	9,97

¹⁾ Innerhalb dessen liegen ca. 95 % der angegebenen Strahlung

²⁾ Erträglich ohne Zeitbegrenzung; kurzzeitig, z.B. < 3 min, werden wesentlich höhere Bestrahlungsstärken toleriert

³⁾ Unter Berücksichtigung von Reflexionsverlusten auf der Haut

Abbildung 2 zeigt die Absorption von Infrarotstrahlung verschiedener Wellenlänge durch die menschliche Haut. Nur der absorbierte Strahlenanteil kann in Wärme umgewandelt werden.

Die starke oberflächliche Absorption besonders im IR-B und IR-C-Bereich bewirkt nicht nur die mangelnde Tiefenwirksamkeit herkömmlicher Infrarot-Bestrahlungen, sondern verursacht auch äußerst schmerzhaft Überhitzungserscheinungen an der Hautoberfläche, die zu einem Abrücken von der "Rotlichtlampe" zwingen, wodurch der Tiefeneffekt erst recht gemindert wird.

Dieser prinzipielle Mangel einer jeden Wärmebehandlung mit konventioneller Infrarotbestrahlung läßt sich durch die Anwendung wassergefilterter IR-A-Strahlung vermeiden. Dabei werden Beobachtungen in der Natur und die Wiederentdeckung eines alten Prinzips genutzt, das zu technischer Reife gebracht wurde (s. Beitrag von J. Rzeznik, S. 29ff.).

Wassergefilterte Infrarot-A-Strahlung

Schon lange ist aus spektrometrischen Messungen mit Hilfe von Ballons und Satelliten bekannt, daß sich die Sonneneinstrahlung in Meeresspiegelhöhe deutlich von der Sonnenstrahlung oberhalb der Erdatmosphäre unterscheidet. Die auf der Erde ankommende Strahlung ist nicht nur insgesamt "schwächer", sondern ihr fehlen ganz oder teilweise bestimmte spektrale Anteile (Abb. 4), wie sich an den

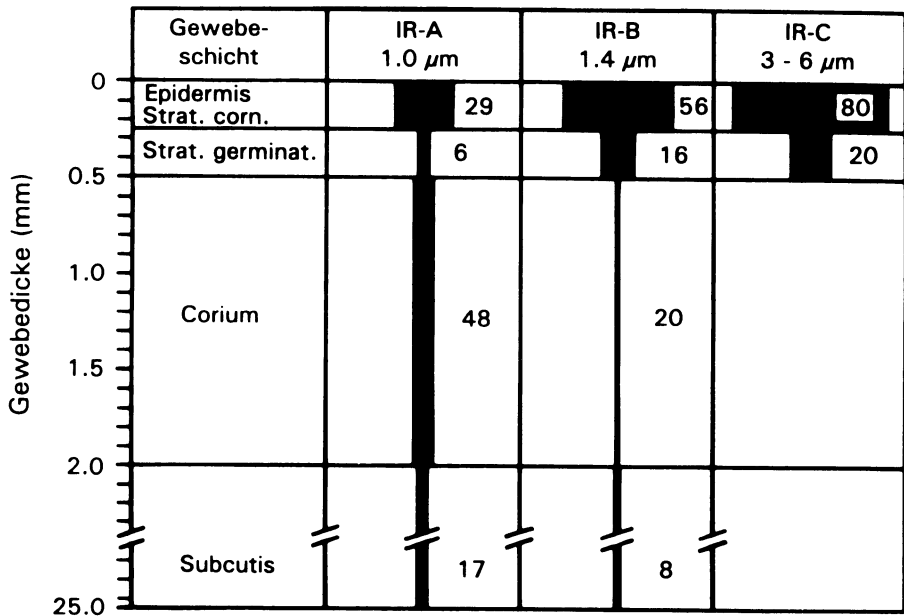


Abb. 2: Absorption von Infrarotstrahlung verschiedener Wellenlängen in den Gewebeschichten der menschlichen Haut, dargestellt in Prozent der gesamten absorbierten Strahlung der angegebenen Wellenlängen (nach I)

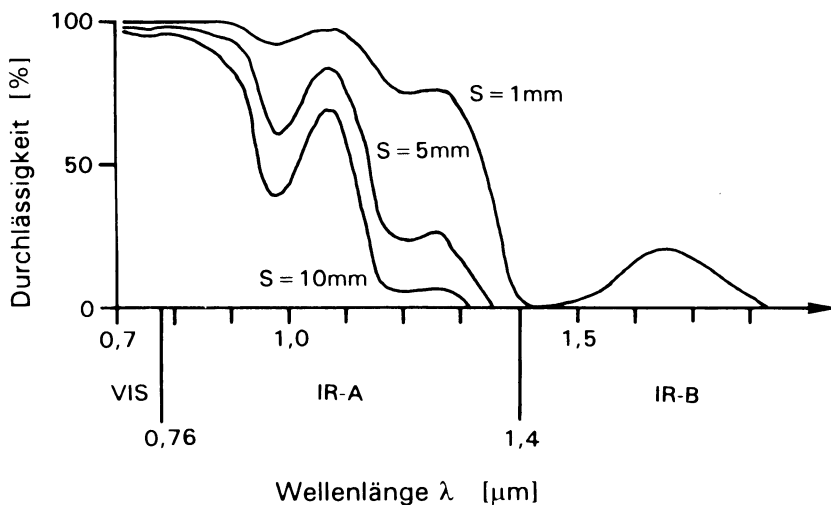


Abb. 3: Prozentuale Durchlässigkeiten für IR-A- und IR-B-Strahlung von Wasser bei verschiedenen Schichtdicken

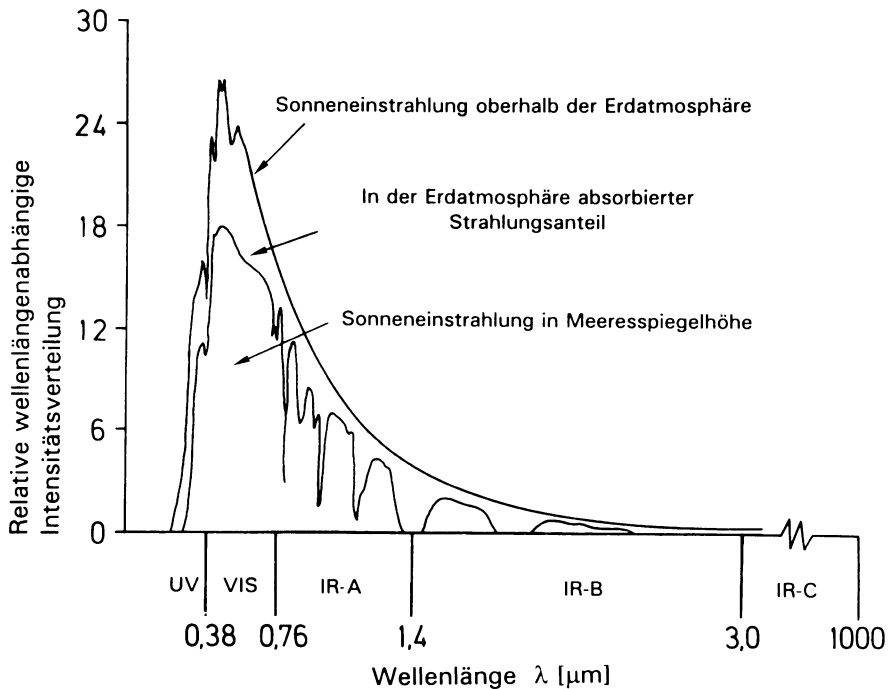


Abb. 4: Spektrum der Sonnenstrahlung vor und nach Passieren der Erdatmosphäre (modifiziert nach 5). Erläuterungen s. Text

besonders im Infrarot-Bereich ausgeprägten Absorptionsbanden leicht erkennen läßt.

Neben Sauerstoff, Ozon und Kohlendioxid ist hierfür besonders der Wasserdampf der Atmosphäre verantwortlich. Es handelt sich bei diesen Absorptionsbanden genau um die Wellenlängenbereiche der üblichen Rotlichtlampen, die auch von den Wassermolekülen der obersten Hautschichten absorbiert werden und zu Schmerzempfindungen führen können. *Abbildung 3* zeigt die prozentuale Durchlässigkeit von Wasser für IR-A- und IR-B-Strahlung in Abhängigkeit von der Schichtdicke, wie sie das *Lambert-Beersche* Gesetz beschreibt (s. Beitrag von *J. Rzeznik*, S. 29ff.). Simuliert man die Atmosphäre dadurch, daß man einer künstlichen Infrarot-Strahlenquelle eine Wasserschicht als Filter vorschaltet, so bleibt dieser Schmerzefekt aus (7). *Abbildung 5* zeigt das Spektrum einer modernen, leistungsfähigen Halogenlampe mit einem hohen Anteil an sichtbarer und Infrarot-A-Strahlung, ohne (A) und mit (B) Wasserfilter im Strahlengang. Man erkennt die Ähnlichkeit des Spektrums B mit dem Sonnenspektrum in Meeresspiegelhöhe (*Abb. 4*). Dies betrifft besonders die Hauptabsorptionsbanden bei $\lambda = 0,94, 1,13$ und $1,38 \mu\text{m}$.

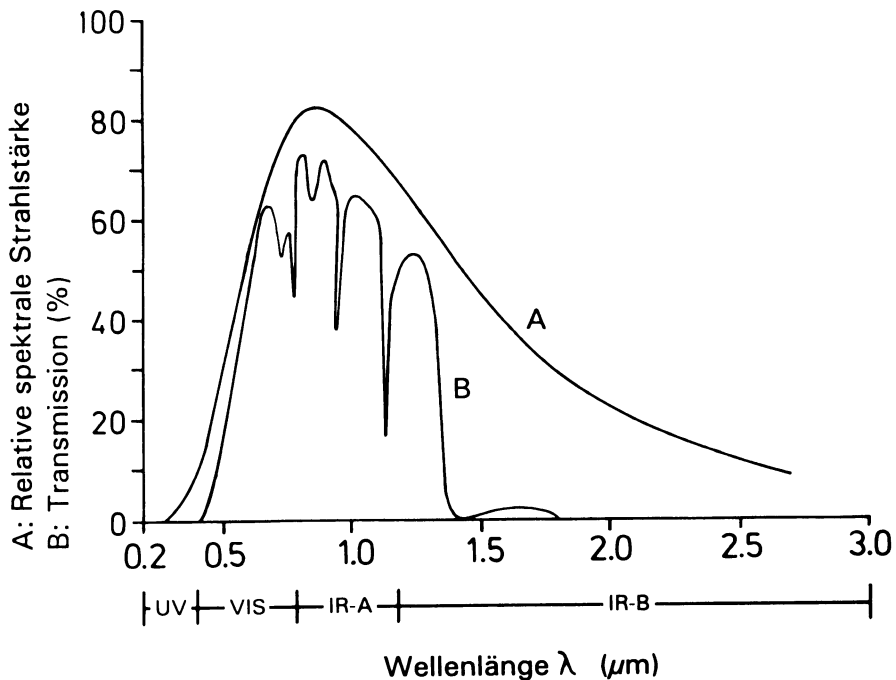


Abb. 5: Spektrale Zusammensetzung der Halogenlampen-Strahlung vor (A) und nach Passieren des Wasserfilters (B). Erläuterungen s. Text

Die gelungene technische Umsetzung dieses lange bekannten physikalischen Prinzips hat zu einer neuen, leistungsfähigen und den Ansprüchen der modernen Medizin genügenden Bestrahlungseinrichtung in Form des Infrarot-A-Strahlers hydrosun® 500 mit Wasserfilter geführt, dessen Aufbau, Wirkungsweise und medizinische Anwendungsbreite Gegenstand der folgenden Beiträge sind.

Literatur

1. *Bachem, A., Reed C.I.:* The penetration of light through human skin. *Amer. J. Physiol.* 97 (1931) 86-91
2. *Harten, H.U.:* Physik für Mediziner. 5. Aufl., Springer, Berlin 1987
3. *Henschke, U.:* Biologische und physikalische Grundlagen der Rot- und Ultrarotstrahlentherapie. *Strahlentherapie* 66 (1939) 646-662
4. *Herschel, F.W.:* Investigation of the power of the prismatic colours to heat and illuminate objects, with remarks that prove the different refrangibility of radiant heat. To which is added an inquiry into the method of viewing the sun advantageously with telescopes of large apertures and high magnifying power. *Gilbert's Ann.* 7 (1801) 137-157

5. Radio Corporation of America (Firmenschrift): *Electrooptics Handbook, a Compendium of Useful Information and Technical Data, Section 6: Sources of Radiation*. RCA Commercial Engng., Harrison (N.J.) 1968
6. *Westphal, W.H. (Hrsg.):* *Physikalisches Wörterbuch*, Springer, Berlin 1952, 751
7. *Witte, E.:* Über die qualitativen und quantitativen Unterschiede in den Strahlungen von Natursonne und therapeutisch benützem Kunstlicht sowie über eine neue Lampe zur künstlichen Herstellung praktisch sonnengleichen Lichtes. *Strahlentherapie* 58 (1937) 113-124