

DIN 5031-10

ICS 17.180.01

Ersatz für
DIN 5031-10:2013-12

**Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik –
Teil 10: Photobiologisch wirksame Strahlung, Größen, Kurzzeichen und
Wirkungsspektren**

Optical radiation physics and illuminating engineering –
Part 10: Photobiologically effective radiation, quantities, symbols and action spectra

Physique de radiation optique et technique d'éclairage –
Partie 10: Grandeurs et symboles de radiation efficace de façon photobiologique

Gesamtumfang 102 Seiten

DIN-Normenausschuss Lichttechnik (FNL)

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Photobiologische Wirkungen	8
4.1 Allgemeines	8
4.2 Inaktivierung von Mikroorganismen (Kurzzeichen: ia)	10
4.3 Wirkungen auf und über die menschliche Haut	13
4.3.1 Allgemeines	13
4.3.2 Wirkungen über DNS-Photoprodukte	13
4.3.3 Sonstige Wirkungen photochemischer Genese.....	24
4.3.4 Wirkungen mit Photosensibilisatoren	28
4.3.5 Erwärmungseffekte in der Haut durch optische Strahlung.....	30
4.4 Wirkungen auf und über das Auge	32
4.4.1 Allgemeines	32
4.4.2 Photokonjunktivitis (Kurzzeichen: ko)	32
4.4.3 Photokeratitis (Kurzzeichen: ke).....	34
4.4.4 Katarakt der Augenlinse (Kurzzeichen: ka).....	35
4.4.5 Blaulichtnetzhautschädigung (Kurzzeichen: blh; en: blue light hazard)	35
4.4.6 Thermische Netzhautschädigung (Kurzzeichen: rth; en: retinal thermal hazard).....	37
4.5 Gesundheitsgefährdung durch UV-Strahlung (Kurzzeichen: uvh; en: ultra violett hazard)	40
4.6 Wirkungen auf Pflanzen	42
4.6.1 Allgemeines	42
4.6.2 Photosynthese (Kurzzeichen: sy).....	42
4.6.3 Chlorophyllphotosynthese (Kurzzeichen: ch).....	44
4.6.4 Photomorphogenese (Kurzzeichen: mo).....	44
4.6.5 Phototropismus (Kurzzeichen: tp)	46
4.6.6 UV-Pflanzenschädigung (Kurzzeichen: cdw)	48
Anhang A (normativ) Wirkungsspektren in numerischer Darstellung	49
Anhang B (informativ) Wirkung der optischen Strahlung über Rezeptoren der Netzhaut	94
B.1 Wirkung über Zapfen und Stäbchen.....	94
B.2 Wirkung über retinale Ganglienzellen.....	94
Anhang C (informativ) Interpolation von Wirkungsspektren und Integration der effektiven Strahlungsleistung	96
C.1 Interpolation von Wirkungsspektren.....	96
C.2 Integration von spektralen Bereichen — praktische Summenbildung	97
C.3 Verallgemeinerung der Betrachtung	98
Literaturhinweise	99

Vorwort

Diese Norm wurde vom DIN-Normenausschuss Lichttechnik (FNL), Arbeitsausschuss NA 058-00-07 AA „Strahlenkunde“, erarbeitet.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. DIN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

DIN 5031 *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik* besteht aus den Teilen 1 bis 11 und dem Beiblatt 1:

- Teil 1: Größen, Formelzeichen und Einheiten der Strahlungsphysik
- Teil 2: Strahlungsbewertung durch Empfänger
- Teil 3: Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik
- Teil 4: Wirkungsgrade
- Teil 5: Temperaturbegriffe
- Teil 6: Pupillen-Lichtstärke als Maß für die Netzhautbeleuchtung
- Teil 7: Benennung der Wellenlängenbereiche (ersatzlos zurückgezogen 2015-08)
- Teil 8: Strahlungsphysikalische Begriffe und Konstanten
- Teil 9: Lumineszenz-Begriffe
- Teil 10: Photobiologisch wirksame Strahlung, Größen, Kurzzeichen und Wirkungsspektren
- Teil 11: Radiometer zur Messung aktinischer Strahlungsgrößen — Begriffe, Eigenschaften und deren Kennzeichnung
- Beiblatt 1: Inhaltsverzeichnis über Größen, Formelzeichen und Einheiten sowie Stichwortverzeichnis zu DIN 5031 Teil 1 bis Teil 10

Änderungen

Gegenüber DIN 5031-10:2013-12 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) die photobiologischen Wirkungsspektren wurden auf der Grundlage von Sekundär-/Originalliteratur, aktueller Standards und internationaler Empfehlungen überprüft und, wenn erforderlich, korrigiert. Die dazu verwendeten Veröffentlichungen wurden angegeben;
- b) das Wirkungsspektrum für die Inaktivierung von *Escherichia coli*-Bakterien wird ausschließlich auf [3] bezogen;
- c) die Tabelle 3 — Einteilung der Hauttypen nach der Reaktion auf Sonnenbestrahlung — wurde grundlegend überarbeitet;
- d) ein Hinweis auf die Überarbeitung der ICNIRP-Empfehlung wurde aufgenommen (4.4.6, Anmerkung 3);

- e) in den Abbildungen werden (soweit vorhanden) die Stützstellen aus der Originalliteratur als Rauten dargestellt. Auf idealisierte Darstellungen durch Spline-Interpolation wurde verzichtet. Stattdessen wurde zwischen den Stützstellen eine lineare Interpolation durchgeführt und als durchgezogene Linie dargestellt. (Dieses Vorgehen kann insbesondere bei der logarithmischen Darstellung zu Bögen zwischen den Stützstellen führen.) In den zugehörigen Tabellen im Anhang A werden die vorhandenen Stützstellen entsprechend hervorgehoben;
- f) im Anhang A wurden bei der tabellarischen Darstellung der Wirkungsspektren die vorhandenen Stützstellen durch Fettdruck hervorgehoben; falls nicht anderweitig vorgeschrieben, werden bei den linear interpolierten Werten in 1-nm-Schritten drei signifikante Stellen angegeben;
- g) die Abbildungen und die tabellarische Darstellung der spektralen Hellempfindlichkeit für Tages- und Nachtsehen wurden gestrichen (Anhang B);
- h) ein Hinweis zur Berechnung der Integrale/Summen mit radiometrisch bestimmten Strahlungsleistungsintervallen wurde aufgenommen (Anhang C.3).

Frühere Ausgaben

DIN 5031-10: 1979-11, 2000-03, 2013-01, 2013-12

Einleitung

Die behandelten photobiologischen Wirkungen betreffen Veränderungen in der chemischen Struktur der Materie und in der Gestaltbildung von Organismen. Diese Wirkungen hängen in erster Linie von der Anzahl der absorbierten Photonen, von ihrer Energie, von der Struktur des biologischen Objektes und seiner Bestrahlungsgeometrie ab. Sie sind demnach abhängig von:

- Bestrahlung (Dosis) H (siehe DIN 5031-1);
- Bestrahlungsstärke E (siehe DIN 5031-1);
- Strahldichte L (siehe DIN 5031-1);
- Strahlungsfunktion $S(\lambda)$ (siehe DIN 5031-8 [45]);
- Wirkungsspektrum $A_{\text{biol}}(\lambda)$: relative spektrale Empfindlichkeit des Empfängers (siehe DIN 5031-2 [43]) für die betrachtete Wirkung;
- Dauer t des Bestrahlungsvorgangs.

Die photobiologisch wirksame Strahlung wird durch wirksame Strahlungsgrößen beschrieben. Die individuell unterschiedlichen Empfindlichkeiten und Adaptationsvorgänge bleiben in dieser Norm unberücksichtigt.

Maßgebend für die betrachtete Wirkung ist die photobiologisch wirksame Bestrahlung (Dosis), d. h. das Produkt aus wirksamer Bestrahlungsstärke und Bestrahlungsdauer. Bei der Anwendung von Wirkungsspektren wird die Gültigkeit des Linearitätsgesetzes (Bunsen-Roscoe'sches Gesetz) und des Additivitätstheorems (van Krefeld Gesetz) vorausgesetzt, was umfassend jedoch nur für einige Wirkungen wie z. B. das UV-Erythem gilt. Um eine vergleichbare Wirkungsabschätzung durchzuführen, werden diese Prinzipien allerdings auf alle Wirkungen angewendet.

Mit den Wirkungsspektren werden Bezugsgrößen zur Beurteilung der biologischen Wirksamkeit verschiedener Strahlungsquellen erhalten. Bei biologischen Anwendungen werden häufig auch Photonengrößen zur Beschreibung der wirksamen Strahlungsleistungen verwendet. Die Definitionen und Erklärungen dazu sind in DIN 5031-1 festgelegt.

1 Anwendungsbereich

Diese Norm legt die Wirkungsspektren zur Beurteilung der photobiologischen und thermischen Wirkungen optischer Strahlung fest.

Phototherapeutische und photosensibilisierende Wirkungen sind nur zum Teil Gegenstand dieser Norm.

Diese Norm behandelt keine photometrischen und colorimetrischen Effekte.

Diese Norm gilt nicht für die Festlegung von Bewertungen und Expositionsgrenzwerten an Arbeitsplätzen.

ANMERKUNG Expositionsgrenzwerte sind in der EU-Richtlinie 2006/25/EG [2] festgelegt und in Deutschland in der Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV) umgesetzt.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 5031-1, *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik — Größen, Formelzeichen und Einheiten der Strahlungsphysik*

DIN 33403-3:2011-07, *Klima am Arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung — Teil 3: Beurteilung des Klimas im Warm- und Hitzebereich auf der Grundlage ausgewählter Klimasummenmaße*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe. Größen, Formelzeichen und Einheiten sind in DIN 5031-1 festgelegt.

3.1 photobiologisch wirksame Strahlungsgröße

X_{biol}

Strahlungsgröße, die in allgemeiner Form nach Gleichung (1) beschrieben wird:

$$X_{\text{biol}} = \int_{\lambda_u}^{\lambda_o} X_{\lambda}(\lambda) \cdot A_{\text{biol}}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1)$$

Dabei ist

X_{biol} photobiologisch wirksame Strahlungsgröße;

$X_{\lambda}(\lambda)$ spektrale strahlungsphysikalische Größe;

$A_{\text{biol}}(\lambda)$ relative spektrale Empfindlichkeit des betrachteten photobiologischen Vorganges, dessen Werte als spektrale Wirkungsfaktoren bezeichnet werden;

λ_u, λ_o untere und obere Grenzwellenlänge für den Empfindlichkeitsbereich.

Anmerkung 1 zum Begriff: Entsprechend den in Tabelle 1 angeführten photobiologischen Wirkungen wird zur Kennzeichnung der jeweiligen photobiologischen Strahlungsgröße statt des Index „biol“ der jeweils maßgebende Index gesetzt. So gilt z. B. der Index „er“ zur Kennzeichnung der Strahlungsgrößen für die UV-Erythemreaktion nach Gleichung (2):

$$X_{\text{er}} = \int_{\lambda_u = 250 \text{ nm}}^{\lambda_o = 400 \text{ nm}} X_{\lambda}(\lambda) \cdot A_{\text{er}}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2)$$

Dabei ist

- X_{er} wirksame Strahlungsgröße bezüglich des UV-Erythems;
 $A_{\text{er}}(\lambda)$ relative spektrale Empfindlichkeit für die UV-Erythemreaktion.

3.2 photobiologisch wirksame Bestrahlung

H_{biol}

Integral der photobiologisch wirksamen Bestrahlungsstärke E_{biol} über die Dauer Δt des Bestrahlungsvorganges

Anmerkung 1 zum Begriff: Die photobiologisch wirksame Bestrahlung berechnet sich nach Gleichung (3):

$$H_{\text{biol}} = \int_{t_1}^{t_2} E_{\text{biol}}(t) \cdot dt \quad (3)$$

Dabei ist

- t_1 Beginn des Bestrahlungsvorgangs;
 t_2 Ende des Bestrahlungsvorgangs;
 $\Delta t = t_2 - t_1$ Dauer des Bestrahlungsvorgangs.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Einheit der photobiologisch wirksamen Bestrahlung H_{biol} ist Jm^{-2} .

Anmerkung 3 zum Begriff: Die photobiologisch wirksame Bestrahlung wird auch als photobiologisch wirksame Dosis bezeichnet.

3.3 photobiologisch wirksame Bestrahlungsstärke

E_{biol}

mit der relativen spektralen Empfindlichkeit des jeweiligen photobiologischen Vorganges $A_{\text{biol}}(\lambda)$ bewertete Bestrahlungsstärke E

Anmerkung 1 zum Begriff: Die photobiologisch wirksame Bestrahlungsstärke berechnet sich nach Gleichung (4):

$$E_{\text{biol}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda}(\lambda) \cdot A_{\text{biol}}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4)$$

Dabei ist

- E_{biol} photobiologisch wirksame Bestrahlungsstärke;
 $E_{\lambda}(\lambda)$ spektrale Bestrahlungsstärke.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Einheit der photobiologisch wirksamen Bestrahlungsstärke E_{biol} ist Wm^{-2} .

3.4 mittlere photobiologisch wirksame Bestrahlungsstärke

$\bar{E}_{\text{biol}}$

über den Beobachtungszeitraum gemittelte photobiologisch wirksame Bestrahlungsstärke

3.5

Schwellenbestrahlung

$H_{\text{biol},s}$

photobiologisch wirksame Bestrahlung H_{biol} , die eine gerade merkbare Reaktion oder einen definierten Effekt erzeugt

Anmerkung 1 zum Begriff: Eine gerade merkbare Reaktion oder ein definierter Effekt werden auch als Schwellenreaktion bezeichnet. In Tabelle 1 sind für verschiedene photobiologische Wirkungen, soweit bekannt, die Schwellenbestrahlungen $H_{\text{biol},s}$ angegeben.

3.6

Schwellenbestrahlungsdauer

$t_{\text{biol},s}$

Bestrahlungsdauer, für die bei einer mittleren photobiologisch wirksamen Bestrahlungsstärke $\bar{E}_{\text{biol}}$ die Schwellenbestrahlung $H_{\text{biol},s}$ erreicht wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Schwellenbestrahlungsdauer berechnet sich nach Gleichung (5):

$$t_{\text{biol},s} = H_{\text{biol},s} / \bar{E}_{\text{biol}} \quad (5)$$

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Einheit der Schwellenbestrahlungsdauer $t_{\text{biol},s}$ ist s.

3.7

photobiologisch wirksame Strahldichte

L_{biol}

mit der relativen spektralen Empfindlichkeit des jeweiligen photobiologischen Vorganges $A_{\text{biol}}(\lambda)$ bewertete Strahldichte L

Anmerkung 1 zum Begriff: Die photobiologisch wirksame Strahldichte berechnet sich nach Gleichung (6):

$$L_{\text{biol}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda}(\lambda) \cdot A_{\text{biol}}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (6)$$

Dabei ist

L_{biol} photobiologisch wirksame Strahldichte;

$L_{\lambda}(\lambda)$ spektrale Strahldichte.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Einheit der photobiologisch wirksamen Strahldichte L_{biol} ist $\text{Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}$.

3.8

Wellenlänge der maximalen photobiologischen Wirkung

λ_{max}

Wellenlänge der photobiologischen Wirksamkeit, die auf den maximalen Wert bezogen ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Meist ist A_{biol} bei λ_{max} auf 1 normiert.

4 Photobiologische Wirkungen

4.1 Allgemeines

Photobiologische Wirkungen werden durch primär ablaufende photochemische Reaktionen, unter anderem durch photooxidative Vorgänge hervorgerufen und ausgelöst (siehe Tabelle 1). Diese Mechanismen können auf die DNS (Desoxyribonukleinsäure), Proteine und andere Makromoleküle einwirken.

Tabelle 1 — Photobiologische Wirkungsspektren: Kurzzeichen, Schwellenbestrahlung $H_{\text{biol},s}$, Bereich der spektralen Empfindlichkeit $[\lambda_u; \lambda_o]$ und Wellenlänge der maximalen Empfindlichkeit λ_{max}

Abschnitt	Photobiologische Wirkung	Kurzzeichen	$H_{\text{biol},s}$ Jm^{-2}	$[\lambda_u; \lambda_o]$ nm	λ_{max} nm
4.2	Inaktivierung von Mikroorganismen	Ia	—	[235,3; 313]	265
4.2	Mikrobizide Wirkung auf B. subtilis-Sporen	Mik	400 ^a	[200; 340]	200
4.3.2.1	Pyrimidindimerisierung	Py	—	[275; 366]	296
4.3.2.2	UV-Erythem	Er	< 200 bis > 1 000 ^c	[250; 400]	[250; 298]
4.3.2.4	Langanhaltende Pigmentierung	Pp	450	[250; 405]	296
4.3.2.5	Bleibende Pigmentdunkelung	Ppd	—	[330; 400]	330
4.3.2.6	Photokarzinogenese	NMSC	—	[250; 400]	299
4.3.2.8	Phototherapie der Psoriasis	Ps	—	[290; 313]	300
4.3.2.11	Phototherapie des seborrhoischen Ekzems und der Acne vulgaris	Ipa	—	[320; 440]	320
4.3.3.1	Prävitamin D ₃ -Bildung	Vd	—	[252; 330]	298
4.3.3.2	Photoisomerisierung von Bilirubin	Bi	—	[410; 520]	455
4.3.3.3	Sofortpigmentierung	Pi	10 ⁵	[300; 440]	[338; 342]
4.3.3.4	Bildung freier Radikale	Ra	—	[280; 690]	355
4.3.4.1	Photochemotherapie der Psoriasis (PUVA)	Pu	—	[338; 367]	355
4.4.2	Photokonjunktivitis	Ko	50	[220; 310]	260
4.4.3	Photokeratitis	Ke	100	[240; 316]	288
4.4.5	Blaulichtgefährdung des Auges	Blh	b	[300; 700]	435
4.4.6	Thermische Netzhautschädigung	Rth	b	[380; 1 400]	435
4.5	Gesundheitsgefährdung durch UV-Strahlung	Uvh	b	[180; 400]	270
4.6.2	Photosynthese (Modell 1)	sy1	—	[380; 750]	660
4.6.2	Photosynthese (Modell 2)	sy2	—	[350; 750]	675
4.6.3	Chlorophyllphotosynthese	Ch	—	[405; 680]	650
4.6.4	Photomorphogenese, Vorwärtskonversion Pr660	mo, Pr	—	[315; 723]	665
4.6.4	Photomorphogenese, Rückwärtskonversion Pfr730	mo, Pfr	—	[315; 803]	723
4.6.5	Phototropismus (Modell 1)	tp1	—	[350; 525]	450
4.6.5	Phototropismus (Modell 2)	tp2	—	[354; 513]	437
4.6.6	Pflanzenschädigung	Cdw	—	[250; 313]	250

^a Vorgeschrieben in der Trinkwasserverordnung [1].

^b Grenzwerte hierfür, siehe Richtlinie 2006/25/EG [2].

^c Siehe Tabelle 3 zur Erklärung.

4.2 Inaktivierung von Mikroorganismen (Kurzzeichen: ia)

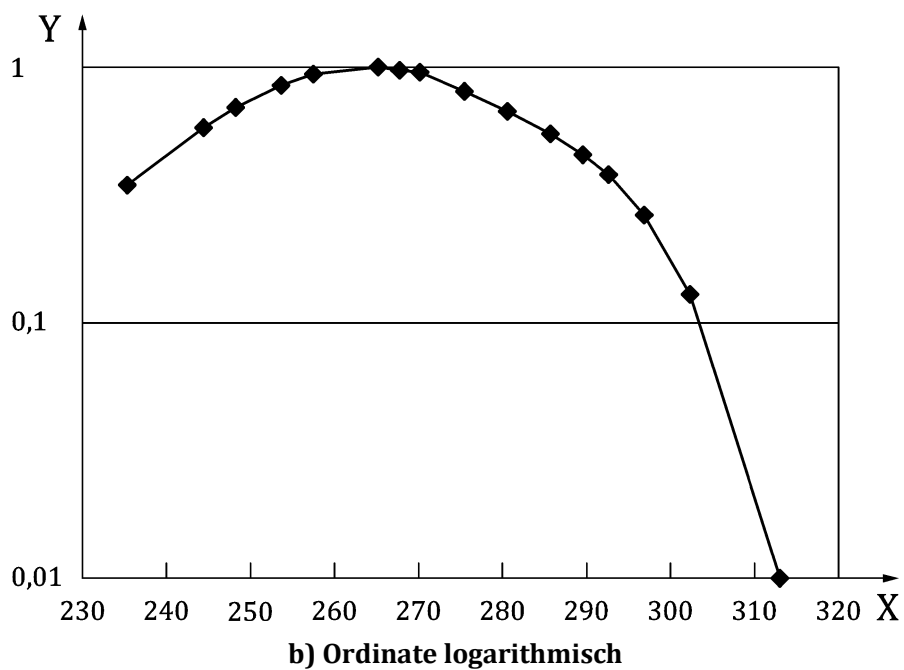
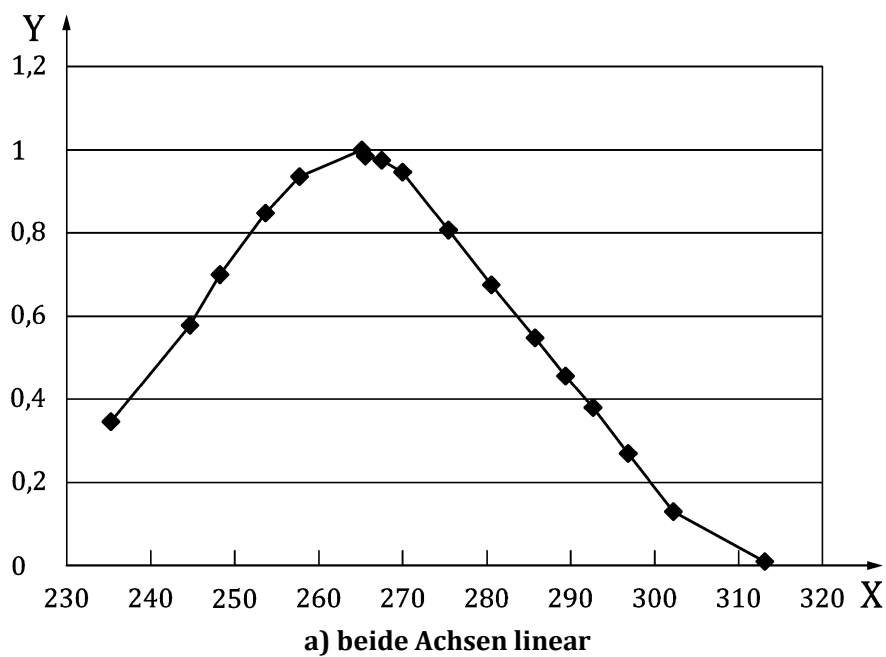
Zur Inaktivierung von Mikroorganismen in Luft, Flüssigkeiten und auf Oberflächen eignet sich Strahlung im UV-C-Bereich. Die erforderliche Bestrahlung ist abhängig von der Art der Mikroorganismen. Um die Abtötungsrate von 90 % auf 99,9 % zu erhöhen, muss die Bestrahlung etwa verdreifacht werden. Die in Tabelle 2 angegebenen Werte sind Näherungswerte [3], [51].

Zu beachten ist die umkehrende Wirkung durch Reaktivierung mit kurzwelliger sichtbarer Strahlung.

Tabelle 2 — Schwellenbestrahlung $H_{s,ia}$ für 90 %ige Inaktivierung verschiedener Mikroorganismen mit einer bei 254 nm emittierenden UV-Strahlungsquelle

Mikroorganismus (Beispiele)	$H_{s,ia}$ für 90 %ige Inaktivierung Jm^{-2}
Bakterien	
Escherichia coli	7 bis 30
Staphylococcus aureus	20 bis 50
Viren	
Influenza	35
Algen	
Diatomeen (Kieselalgen)	3 000 bis 6 000
Grünalgen	3 000 bis 6 000
Blualgen	3 000 bis 6 000
Schimmelpilze	
Aspergillus amstelodami (Fleisch)	700
Aspergillus niger (Teigwaren)	1 500
Penicillium chrysog. (Früchte)	500
Scopulariopsis brevicaulis (z. B. Käse)	800
ANMERKUNG Weitere Mikroorganismen siehe CIE 155:2003 [51]	

In Bild 1 ist das Wirkungsspektrum zur Inaktivierung von Escherichia coli Bakterien in Abhängigkeit von der Wellenlänge nach dem IESNA Lighting Handbook [3] dargestellt (tabellarische Werte siehe Tabelle A.1).

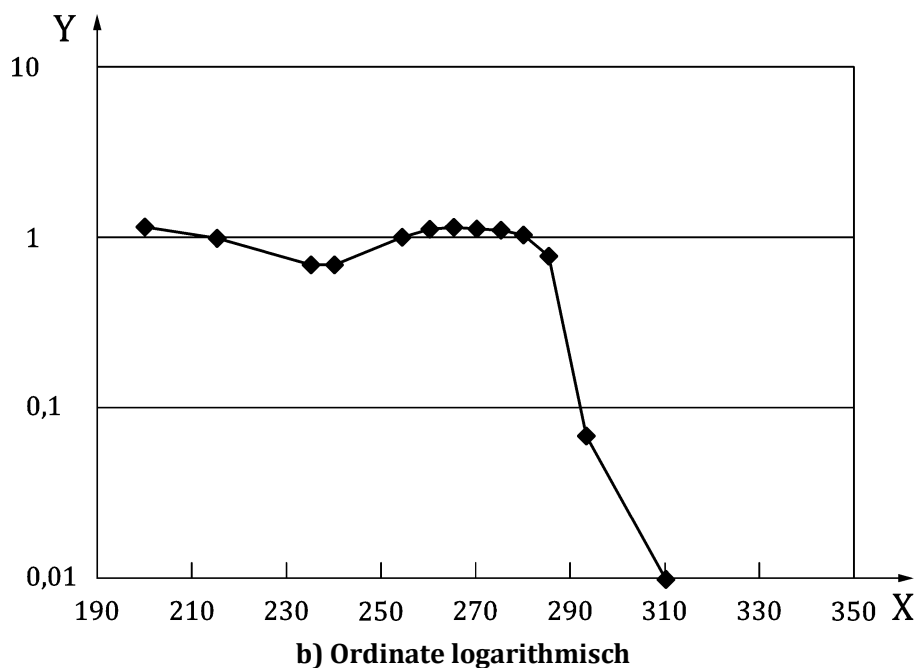
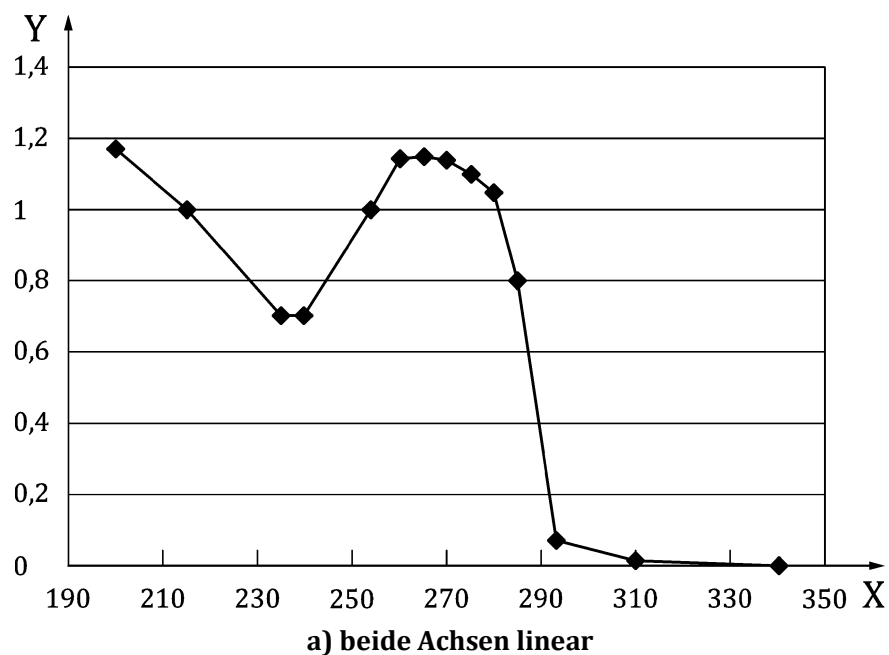


Legende

X Wellenlänge λ in nm
 Y spektraler Wirkungsfaktor $A_{ia}(\lambda)$

Bild 1 — Wirkungsspektrum für die Inaktivierung von Escherichia coli Bakterien $A_{ia}(\lambda)$

Für die öffentliche Wasserversorgung hat der DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.) das Wirkungsspektrum $A_{\text{mik}}(\lambda)$ für die Desinfektion von Wasser mit UV-Strahlung festgelegt [4]. Die mikrobizide Wirkung bezieht sich auf *B. subtilis*-Sporen (siehe Bild 2, tabellarische Werte siehe Tabelle A.1).



Legende

X Wellenlänge λ in nm
Y spektraler Wirkungsfaktor $A_{\text{mik}}(\lambda)$

Bild 2 — Wirkungsspektrum für die Inaktivierung von *B. subtilis* $A_{\text{mik}}(\lambda)$

ANMERKUNG Das mikrobizide Wirkungsspektrum $A_{\text{mik}}(\lambda)$ ist nicht bei der Wellenlänge der maximalen photo-biologischen Wirkung sondern bei 254 nm auf 1 normiert.

4.3 Wirkungen auf und über die menschliche Haut

4.3.1 Allgemeines

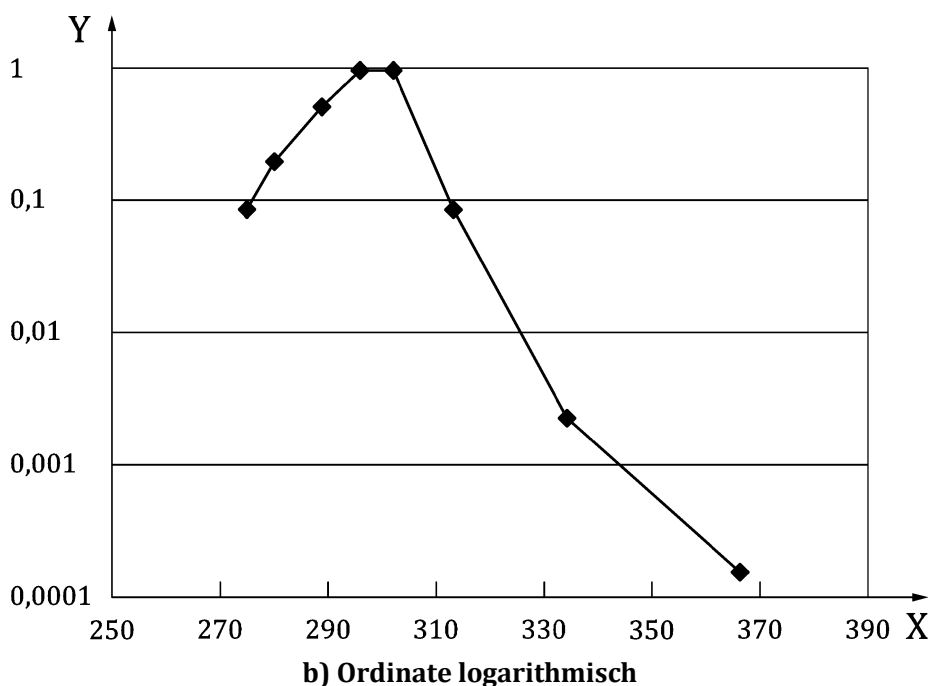
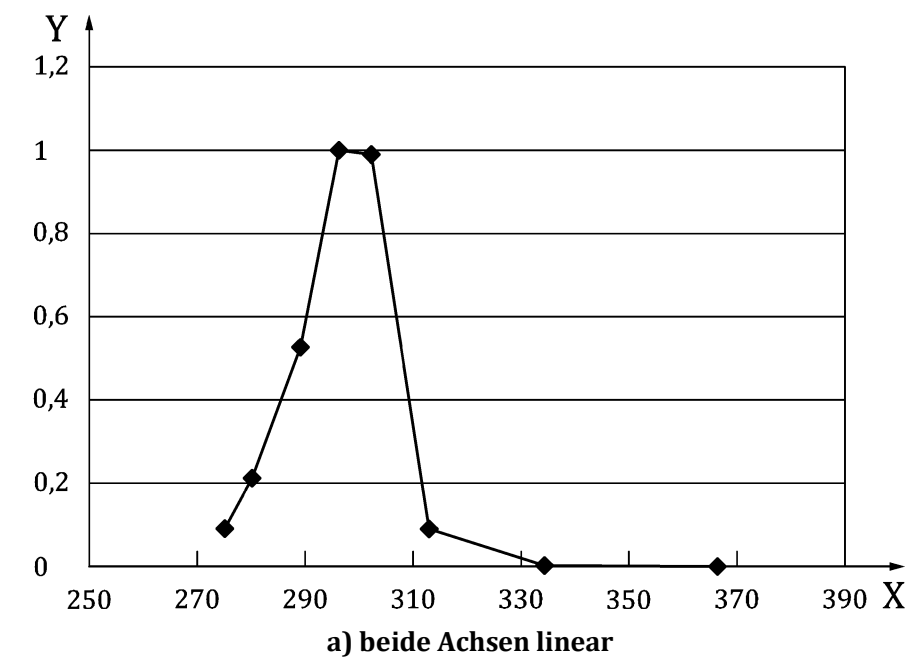
Positive und negative Wirkungen können direkt oder indirekt durch Bestrahlung des Hautgewebes ausgelöst werden und basieren auf photochemischen oder thermischen Reaktionen.

4.3.2 Wirkungen über DNS-Photoprodukte

Zahlreiche Wirkungen basieren auf der direkten Wechselwirkung mit der DNS. Während durch UVB-Strahlung überwiegend Pyrimidin-Dimere und Pyrimidin-Pyrimidon-Photoprodukte gebildet werden, verursacht UVA-Strahlung insbesondere Strangbrüche und DNS-Protein-Vernetzungen.

4.3.2.1 Pyrimidindimerisierung von DNS (Kurzzeichen: py)

Von den möglichen gebildeten Photoprodukten aus der DNS spielen Pyrimidindimere eine wichtige biologische Rolle (Wirkungsspektrum [5] siehe Bild 3 und Tabelle A.2). Im UVA-Bereich wird die Bildung von Dimeren durch Strangbrüche und DNS-Protein-Vernetzungen überlagert (Sensibilisierungseffekte).



Legende

- X Wellenlänge λ in nm
 Y spektraler Wirkungsfaktor $A_{py}(\lambda)$

Bild 3 — Wirkungsspektrum der Pyrimidindimerisierung $A_{py}(\lambda)$ von DNS aus UV-bestrahlter menschlicher Haut

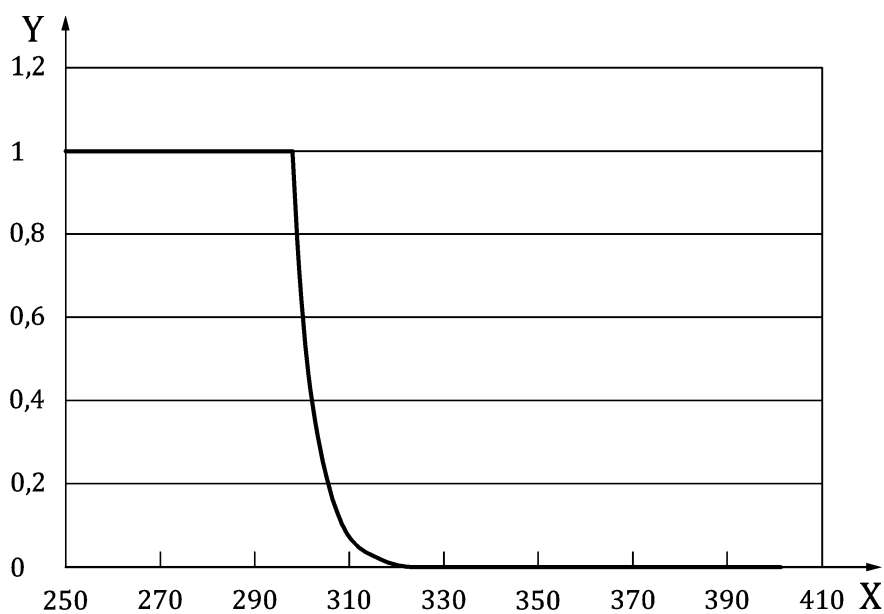
4.3.2.2 UV-Erythem (Kurzzeichen: er)

Das UV-Erythem ist Symptom einer akuten Hautentzündung, die durch UV-Bestrahlung entsteht. Die CIE hat für das UV-Erythem basierend auf experimentellen Daten ein Referenzwirkungsspektrum (siehe Bild 4 und Tabelle A.3) festgelegt [54]. Das Wirkungsspektrum wird als dreiteilige Funktion beschrieben:

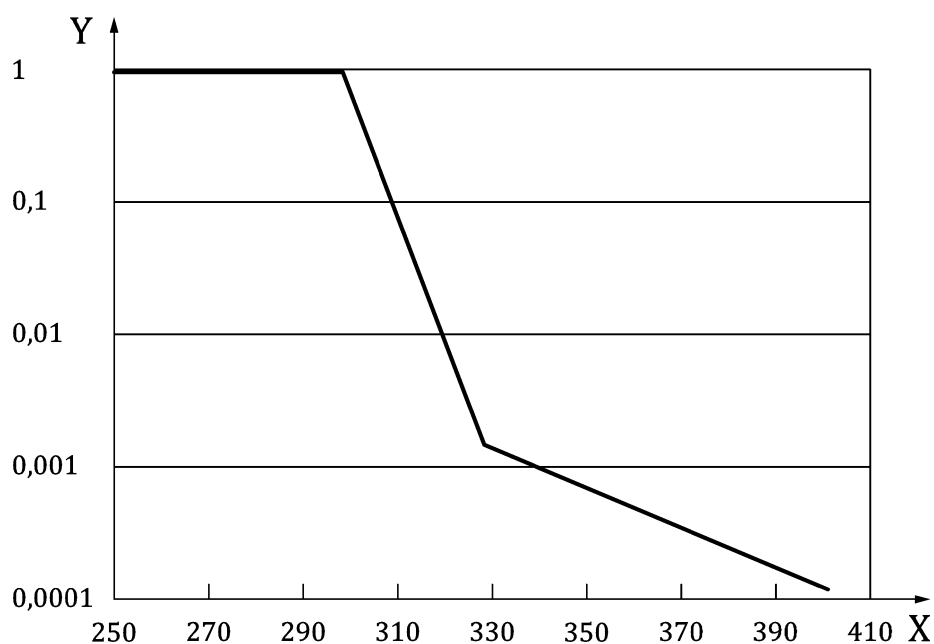
$$A_{\text{er}}(\lambda) = 1,0 \quad \text{für } 250 \text{ nm} \leq \lambda \leq 298 \text{ nm}$$

$$A_{\text{er}}(\lambda) = 10^{0,094 (298 - \lambda/\text{nm})} \quad \text{für } 298 \text{ nm} < \lambda \leq 328 \text{ nm}$$

$$A_{\text{er}}(\lambda) = 10^{0,015 (140 - \lambda/\text{nm})} \quad \text{für } 328 \text{ nm} < \lambda \leq 400 \text{ nm}$$



a) beide Achsen linear

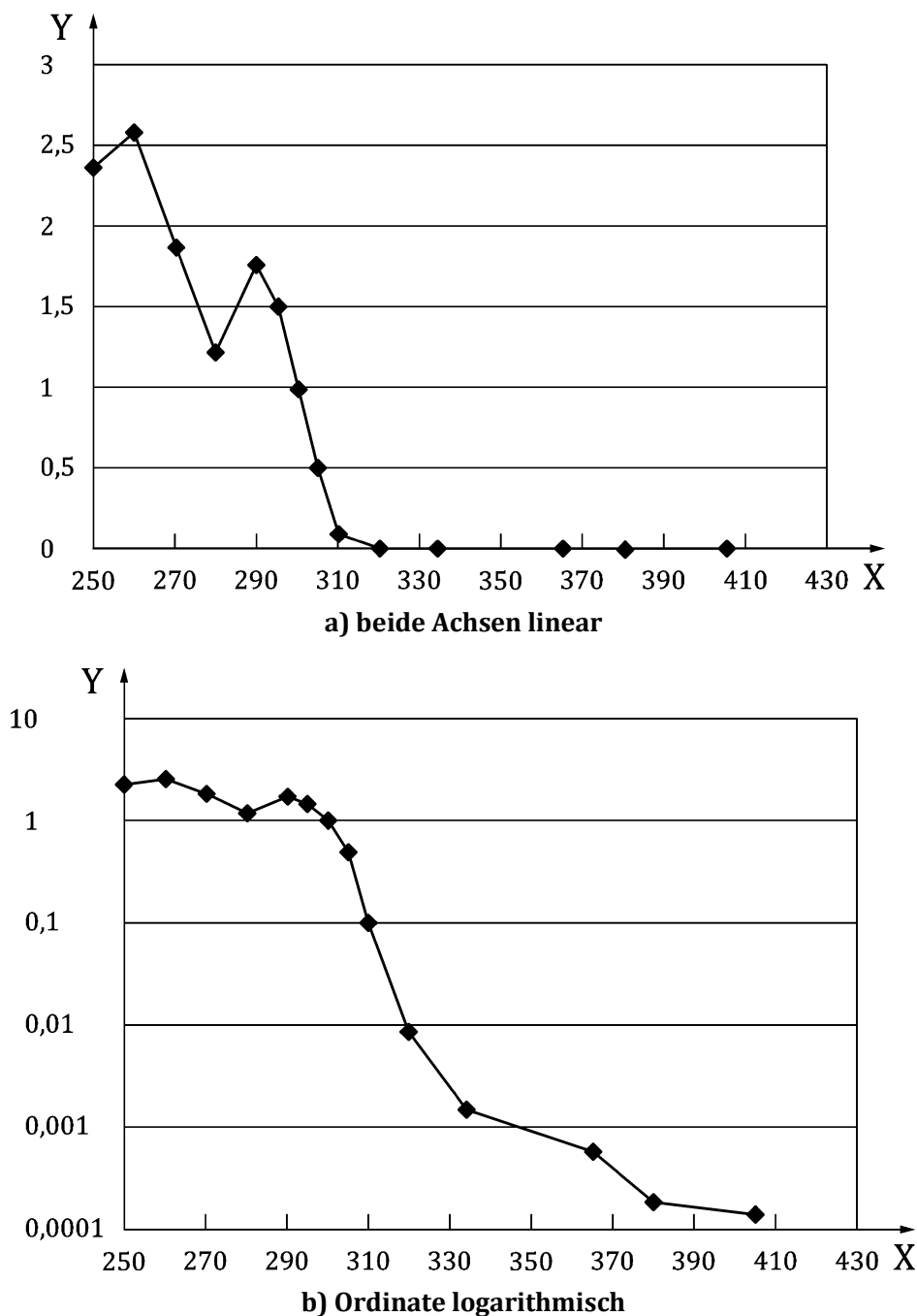


b) Ordinate logarithmisch

LegendeX Wellenlänge λ in nmY spektraler Wirkungsfaktor $A_{\text{er}}(\lambda)$ **Bild 4 — Referenzwirkungsspektrum des UV-Erythems $A_{\text{er}}(\lambda)$**

ANMERKUNG 1 Die Standard-Erythem-Dosis (SED) ist in ISO 17166/CIE S 007/E [54] mit $H_{\text{er}} = 100 \text{ Jm}^{-2}$ entsprechend einer SED festgelegt.

ANMERKUNG 2 Aufgrund des vereinfacht festgelegten spektralen Verlaufs des Referenzwirkungsspektrums können bei der Bewertung von Strahlungsquellen Abweichungen zwischen der berechneten und der tatsächlich vorliegenden Erythemwirksamkeit auftreten (Mittelwerte experimenteller Daten der relativen Erythemwirksamkeit siehe CIE 106/4 – 1st Edition 1993 [50] — Bild 5 und Tabelle A.3)



Legende

- X Wellenlänge λ in nm
- Y spektraler Wirkungsfaktor der experimentellen Erythemwirksamkeit

Bild 5 — Relative spektrale Wirksamkeit für das UV-Erythem (Mittelwerte aus Messungen)

Zur Bestimmung der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke von UV-Bestrahlungsgeräten zu kosmetischen Zwecken wird von der amerikanischen FDA (en: Food and Drug Administration) ein abweichendes Referenzwirkungsspektrum für das UV-Erythem vorgegeben [6] (siehe Bild 6 und Tabelle A.3), das sich ebenfalls als dreiteilige Funktion beschreiben lässt:

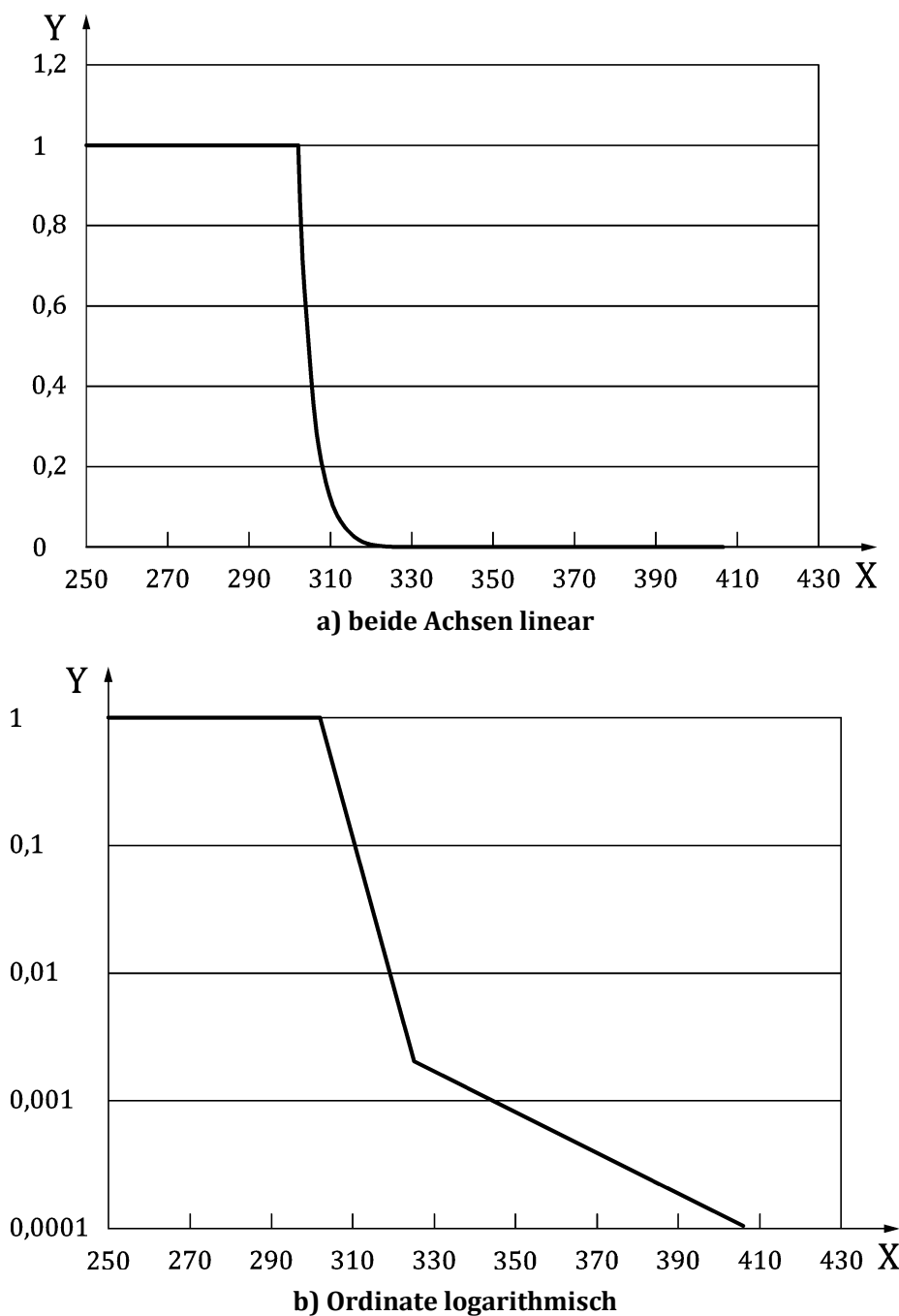
$$A_{\text{er-fda}}(\lambda) = 1,0 \quad \text{für } 250 \text{ nm} \leq \lambda \leq 302 \text{ nm}$$

$$A_{\text{er-fda}}(\lambda) = 10^{0,114 (302 - \lambda/\text{nm})} \quad \text{für } 302 \text{ nm} < \lambda \leq 325 \text{ nm}$$

$$A_{\text{er-fda}}(\lambda) = 10^{0,0161 (159 - \lambda/\text{nm})} \quad \text{für } 325 \text{ nm} < \lambda \leq 405 \text{ nm}$$

ANMERKUNG 3 Die angegebene Funktionsbeschreibung wurde im Geltungsbereich für die Wellenlängen dahingehend korrigiert, um mit der ebenfalls in [6] angegebenen Tabelle übereinstimmende Werte zu erreichen.

ANMERKUNG 4 Es wird erwartet, dass diese Definition von der FDA an die ISO/CIE-Definition in nächster Zeit angepasst wird.



Legende

- X Wellenlänge λ in nm
 Y spektraler Wirkungsfaktor $A_{\text{er-fda}}(\lambda)$

Bild 6 — Wirkungsspektrum des UV-Erythems nach FDA $A_{\text{er-fda}}(\lambda)$

4.3.2.3 UV-Empfindlichkeit der menschlichen Haut

Die UV-Empfindlichkeit der menschlichen Haut hängt von verschiedenen ethnischen und individuellen Faktoren wie z. B. Hauttyp, Hautadaptation und anamnestischen Faktoren ab, wodurch sich sehr große Unterschiede ergeben. Daher ist die aktuelle UV-Empfindlichkeit durch geeignete Testverfahren (z. B. durch Bestimmung der individuellen erythemwirksamen Schwellenbestrahlung) zu ermitteln. Üblich sind hierbei stufenweise (die sogenannte Lichttreppe) oder kontinuierliche Erhöhungen (Gradientverfahren) der UV-Bestrahlungen in Testarealen.

Bezüglich der genetisch vorgegebenen, individuell unterschiedlichen Erythemempfindlichkeit und des Pigmentierungsvermögens werden 6 verschiedene Phototypen bzw. Hauttypen (siehe Tabelle 3) unterschieden. Die Zuordnung erfolgt aufgrund einer einmaligen Besonnung im Frühjahr in Bezug auf die Erythem- und Bräunungswirkung.

Tabelle 3 — Einteilung der Hauttypen nach der Reaktion auf Sonnenbestrahlung [7], [8]

Hauttyp	Sonnenempfindlichkeit	Sonnenbrandempfindlichkeit ^d	Pigmentierungsvermögen	Klassifizierung für Individuen	Richtwerte für $H_{s,er}$ (nach 24 h, am Rücken)	
					in Jm^{-2}	in SED
I	sehr empfindlich	immer Sonnenbrand	keine Bräunung	Melanin ungeschützt ^a (keltischer Typ)	< 200	< 2
II	mäßig empfindlich	hoch	leichte Bräunung	Melanin ungeschützt (hellhäutiger europäischer Typ)	200 bis 300	2 bis 3
III	mäßig unempfindlich	mäßig	mäßige Bräunung	Melanin schutzfähig ^b (dunkelhäutiger europäischer Typ)	300 bis 500	3 bis 5
IV	unempfindlich	niedrig	dunkle Bräunung	Melanin schutzfähig (mediterraner Typ)	500 bis 700	5 bis 7
V	unempfindlich	sehr niedrig	braune Haut von Natur	Melanin geschützt ^c (dunkelhäutiger Typ)	700 bis 1 000	7 bis 10
VI	unempfindlich	extrem niedrig	schwarze Haut von Natur	Melanin geschützt (schwarzhäutiger Typ)	> 1 000	> 10

^a Wegen unzureichender Melaninpigmentierungsfähigkeit der Haut durch UV-Exposition gefährdet.

^b Durch Melaninpigmentierungsfähigkeit der Haut kann ein gewisser Schutz gegen das UV-Erythem (Sonnenbrand) bei UV-Exposition ausgebildet werden.

^c Durch Hautpigmentierung ist ein weitgehender Schutz gegen das UV-Erythem gegeben.

^d Die Bereiche der Sonnenbrandempfindlichkeit sind keine Vorschriften, sondern nur Hinweise.

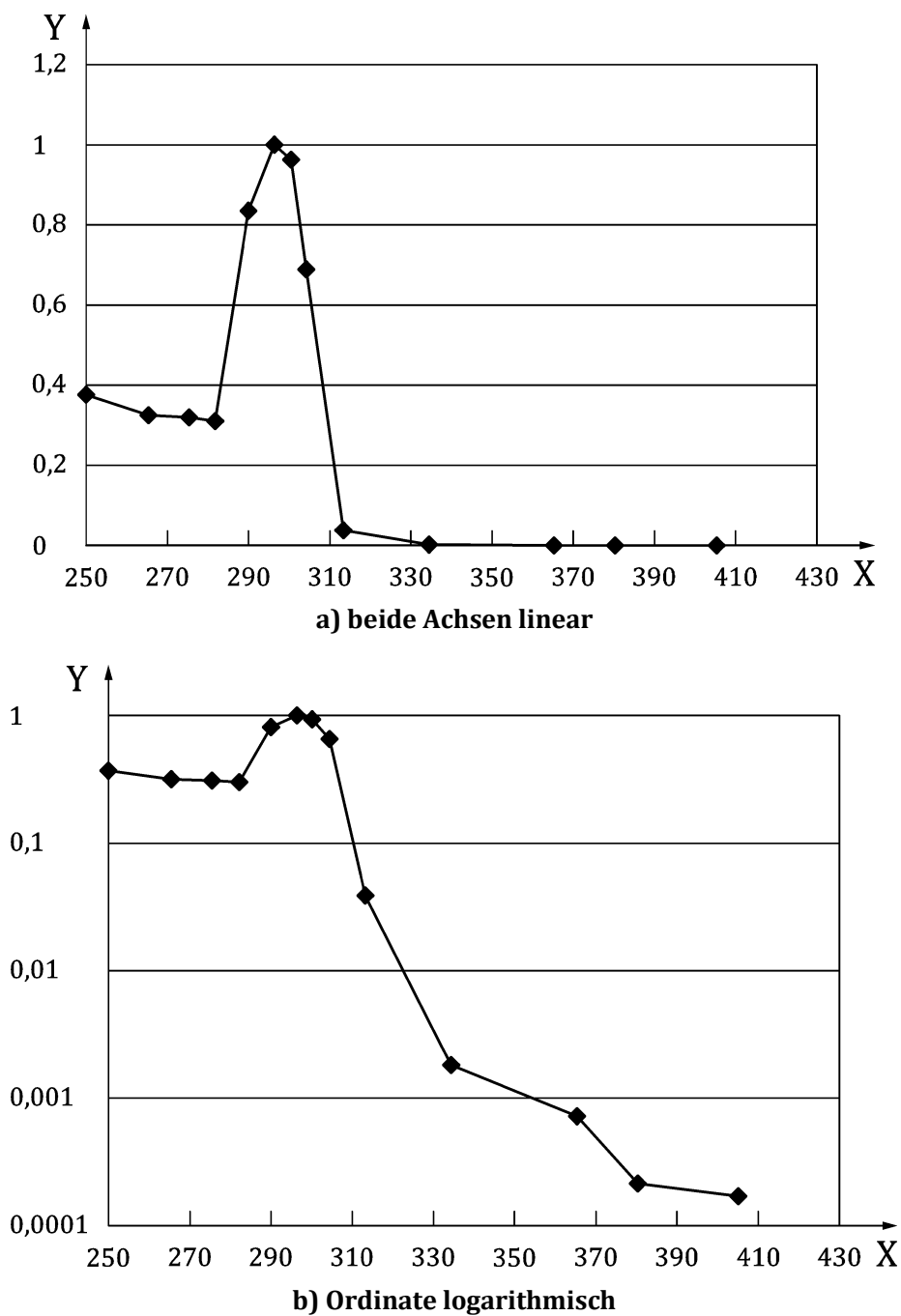
4.3.2.4 Langanhaltende Pigmentierung (Kurzzeichen: pp; en: persistent pigmentation)

Nach Überschreitung der Schwellenbestrahlung (siehe Tabelle 1) im Wellenlängenbereich $250 \text{ nm} \leq \lambda \leq 400 \text{ nm}$ zeigt sich zeitlich verzögert eine langanhaltende Pigmentierung, die auf einer Neubildung und Neuverteilung von Melaninpigment beruht.

Das Wirkungsspektrum basiert auf human-experimentellen Untersuchungen von Parrish [9] und wird auch von der FDA zur Bewertung von UV-Bestrahlungsgeräten verwendet (siehe Bild 7 und Tabelle A.4).

ANMERKUNG 1 Pigmentierung tritt nur bei Personen auf, die zu einer Pigmentierung fähig sind; also definitionsgemäß nicht bei Hauttyp I.

ANMERKUNG 2 Üblicherweise geht die langanhaltende Pigmentierung mit einem Begleiterythem einher. Dieses Begleiterythem kann aber durch die Exposition mit einer insgesamt zwar pigmentwirksamen Strahlungsdosis, die in erythemunterschwelligem Einzeldosen kumulativ appliziert wird, vermieden werden.



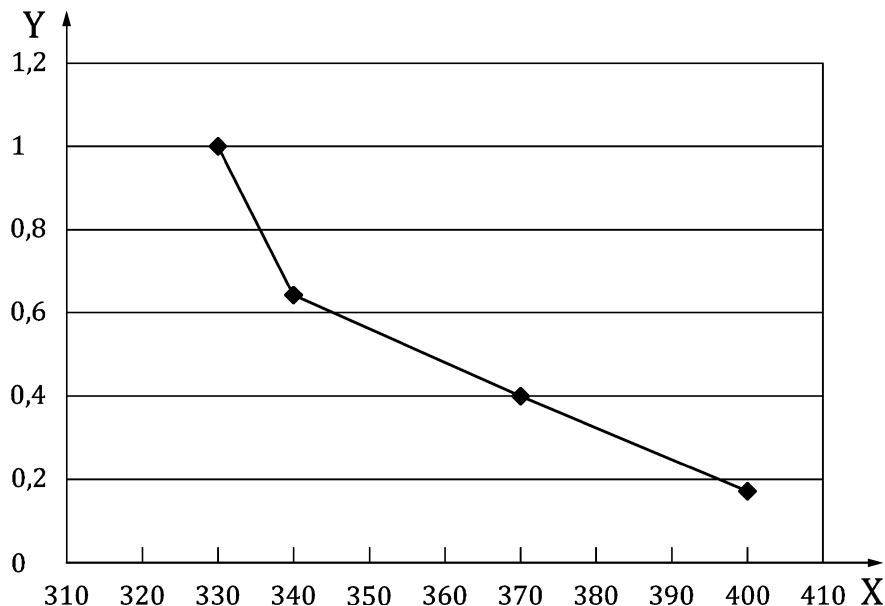
Legende

- X Wellenlänge λ in nm
 Y spektraler Wirkungsfaktor $A_{pp}(\lambda)$

Bild 7 — Wirkungsspektrum der langanhaltenden Pigmentierung $A_{pp}(\lambda)$

4.3.2.5 Bleibende Pigmentdunkelung (Kurzzeichen: ppd; en: persistent pigment darkening)

Bei der bleibenden Pigmentdunkelung handelt es sich um eine Sonderform der langanhaltenden Pigmentierung, ausgelöst durch langwellige UV-Strahlung. Nach Anwendung von Strahlung im Wellenlängenbereich $330 \text{ nm} \leq \lambda \leq 400 \text{ nm}$ zeigt sich eine anhaltende Hautbräunung. Das Wirkungsspektrum der bleibenden Pigmentdunkelung [10] (siehe Bild 8 und Tabelle A.5) wird insbesondere bei der Bewertung des UVA-Schutzes von Sonnenschutzmitteln verwendet (siehe DIN 67502).



Legende

X Wellenlänge λ in nm
Y spektraler Wirkungsfaktor $A_{ppd}(\lambda)$

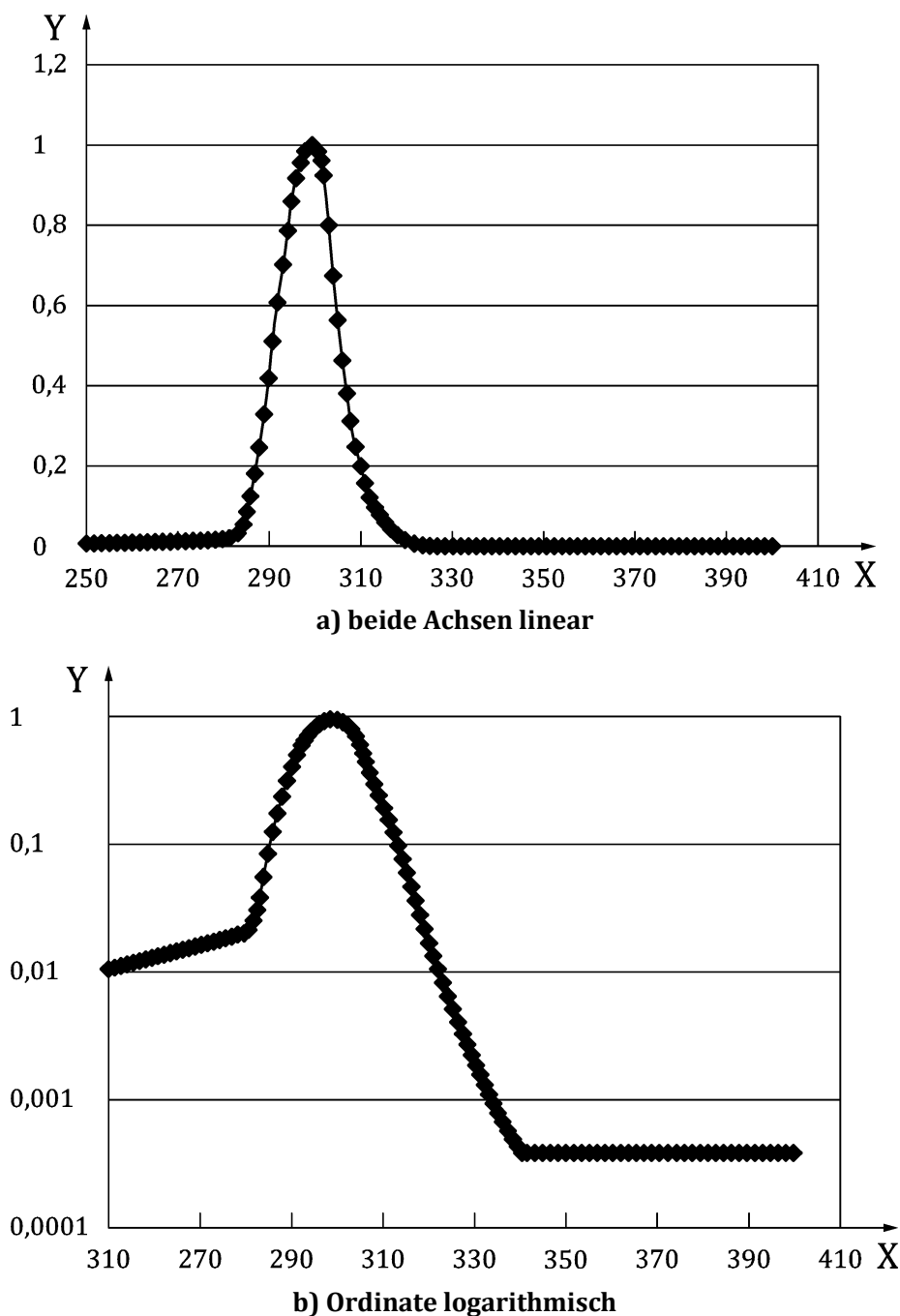
Bild 8 — Wirkungsspektrum der bleibenden Pigmentdunkelung $A_{ppd}(\lambda)$

4.3.2.6 Photokarzinogenese (Kurzzeichen: NMSC; en: non melanoma skin cancer)

Das Wirkungsspektrum ähnelt dem des UV-Erythems (Referenzwirkungsspektrum, siehe 4.3.2.2).

UV-Strahlung wird als die Hauptursache für die Entstehung des weißen Hautkrebses (Nicht-Melanom-Hautkrebs wie Plattenepithel- oder Basalzellkarzinome) beim Menschen angesehen und entsteht am häufigsten in den am meisten exponierten Hautpartien, wobei eine Korrelation mit der Bestrahlungsstärke und Anzahl und Dauer der Expositionen besteht [56].

Das Wirkungsspektrum basiert auf Daten aus Experimenten mit Mäusen, die auf die UV-Transmission der menschlichen Haut hochgerechnet und extrapoliert wurden (siehe Bild 9 und Tabelle A.6). Diese Übertragbarkeit ist noch nicht wissenschaftlich abgesichert, dennoch wurde das Wirkungsspektrum in dieser Form zur Abschätzung von Strahlungsrisiken von der CIE veröffentlicht (siehe ISO 28077/CIE 019/E:2016 [53]).



Legende

X Wellenlänge λ in nm
 Y spektraler Wirkungsfaktor $A_{\text{nmsc}}(\lambda)$

Bild 9 — Wirkungsspektrum der NMSC-Photokarzinogenese $A_{\text{nmsc}}(\lambda)$

4.3.2.7 Photoinduzierte Alterung der Haut (Kurzzeichen: pa)

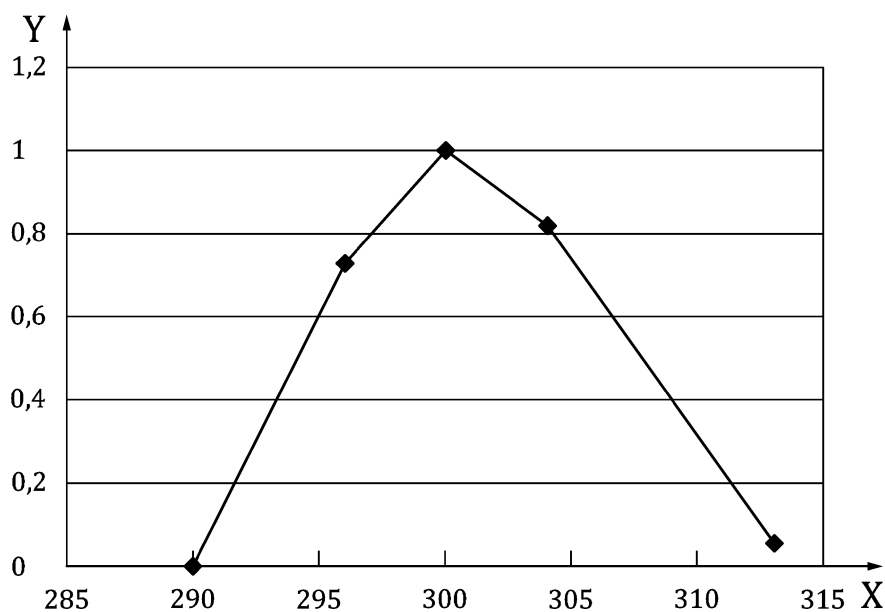
Nach langzeitiger übermäßiger UV-Strahlungseinwirkung können sich bereits im mittleren Lebensalter Falten, Furchen und chronisch-entzündliche Veränderungen der strahlenexponierten Haut sowie Hauterschlaffung, Altersflecken und solare Keratosen ausbilden. Spezifisch ist die Induktion elastotischen Bindegewebes (solare Elastose) und degenerierten kollagenen Bindegewebes in der Lederhaut [11]. Ein Wirkungsspektrum ist nicht bekannt.

4.3.2.8 Phototherapie der Psoriasis (Kurzzeichen: ps)

Die Psoriasis (Schuppenflechte) ist eine häufige dermatologische Indikation für die Phototherapie. Psoriasis ist im Wesentlichen durch erhöhte Zellteilungsrate gekennzeichnet, so dass lebende Zellen bis zur Hautoberfläche gelangen. UV-Strahlung hemmt die erhöhte Teilungsrate der Basalzellen in der Oberhaut. Die Behandlung erfolgt mit wiederholten Bestrahlungen.

Üblicherweise orientiert sich die Behandlung der Psoriasis am Wirkungsspektrum für das UV-Erythem unter Berücksichtigung der Unterschiede in den optischen Eigenschaften der Haut infolge Schuppenbildung und Tiefenausdehnung der Effloreszenzen. Für mehr oberflächliche Entzündungsherde sollte vorzugsweise UVB-Strahlung (UVB-Schmalbandspektrum) um 311 nm verwandt werden, während für tiefer liegende Herde länger wellige UV-Strahlung empfehlenswert ist.

In der Literatur ist ein Wirkungsspektrum der Phototherapie der Psoriasis beschrieben, das aufgrund serieller Expositionen mit monochromatischer Strahlung im Bereich von 254 nm bis 313 nm bestimmt wurde [12]. Der wirksame Wellenlängenbereich liegt zwischen 290 nm und 313 nm (siehe Bild 10 und Tabelle A.7).



Legende

X Wellenlänge λ in nm

Y spektraler Wirkungsfaktor $A_{ps}(\lambda)$

Bild 10 — Wirkungsspektrum für die Phototherapie der Psoriasis $A_{ps}(\lambda)$

4.3.2.9 Phototherapie der atopischen Dermatitis (Kurzzeichen: ad)

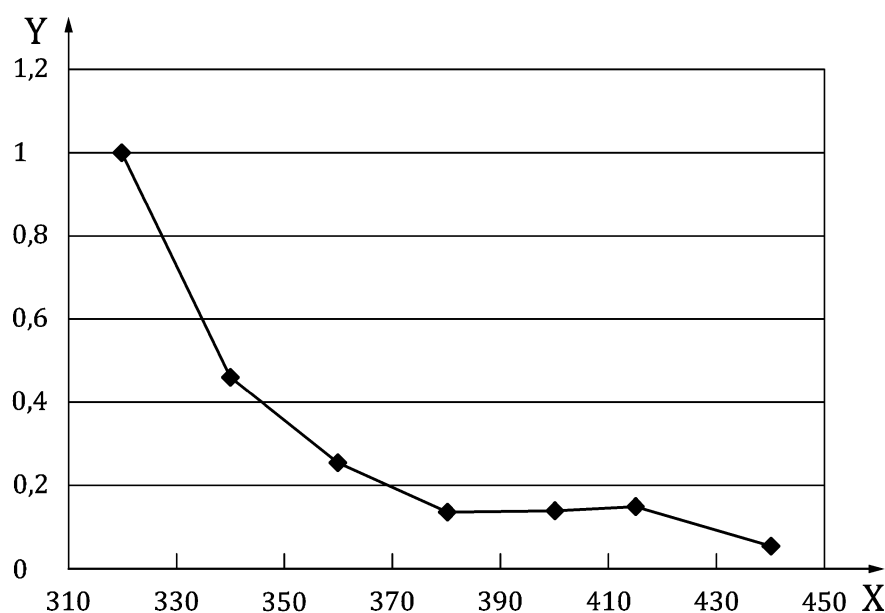
Die atopische Dermatitis (atopisches Ekzem, Neurodermitis) ist eine konstitutionell, meist chronisch verlaufende entzündliche Hauterkrankung. Bei der Mehrzahl der Patienten wirkt sich UV-Bestrahlung günstig aus. Der wirksame Spektralbereich erstreckt sich vorwiegend über den UV-Bereich $300 \text{ nm} \leq \lambda \leq 440 \text{ nm}$. In der Therapie wird überwiegend Strahlung des Wellenlängenbereichs $340 \text{ nm} \leq \lambda \leq 420 \text{ nm}$ verwendet [13]. Zunehmend häufig und erfolgreich wird derzeit die Therapie mit Schmalband-UVB (311 nm) angewendet [14].

4.3.2.10 Photoimmunologische Wirkungen

Bestrahlungen im UV-Bereich können durch systemische und lokale Effekte ausgewählte zellvermittelte Immunantworten modulieren. Die Folgen können einerseits eine Schwächung des Immunsystems, z. B. bei der Abwehr von UV-induzierten Hautkarzinomen sowie andererseits eine Immunantwort gegen bestimmte Krankheitserreger sein. Genutzt wird die immunsupprimierende Wirkung in der dermatologischen Phototherapie. Andererseits können UV-Bestrahlungen bestimmte Immunantworten auch verstärken. Der wirksame Spektralbereich erstreckt sich vorwiegend über den UV-Bereich $200 \text{ nm} \leq \lambda \leq 400 \text{ nm}$, wobei die unterschiedlichen UV-Wellenlängen verschiedene Auswirkungen haben.

4.3.2.11 Phototherapie des seborrhoischen Ekzems und der Acne vulgaris (Kurzzeichen: ipa)

Als Seborrhoe wird eine gesteigerte Sebumproduktion der Talgdrüsen besonders im Gesicht, am behaarten Kopf und im Bereich der vorderen und hinteren Schweißrinne bezeichnet. Verstopfungen der Talgdrüsen und Infektionen mit dem Bakterium *propioni acnes* führen zur Acne vulgaris. Die Bakterien bilden als Stoffwechselprodukt Protoporphyrin IX. Antiseborrhoische Wirkungen können sowohl durch direkte Inaktivierung der in den Talgabsonderungen enthaltenen *propioni acnes*-Bakterien über Expositionen im UV und im Blaulichtbereich erfolgen [15] (siehe Bild 11 und Tabelle A.8), als auch über eine photodynamische Reaktion durch Anregung des im Talg enthaltenen Protoporphyrin IX (siehe Bild 17), wie auch durch Kombination beider Effekte hervorgerufen werden [16].



Legende

X Wellenlänge λ in nm
Y spektraler Wirkungsfaktor $A_{ipa}(\lambda)$

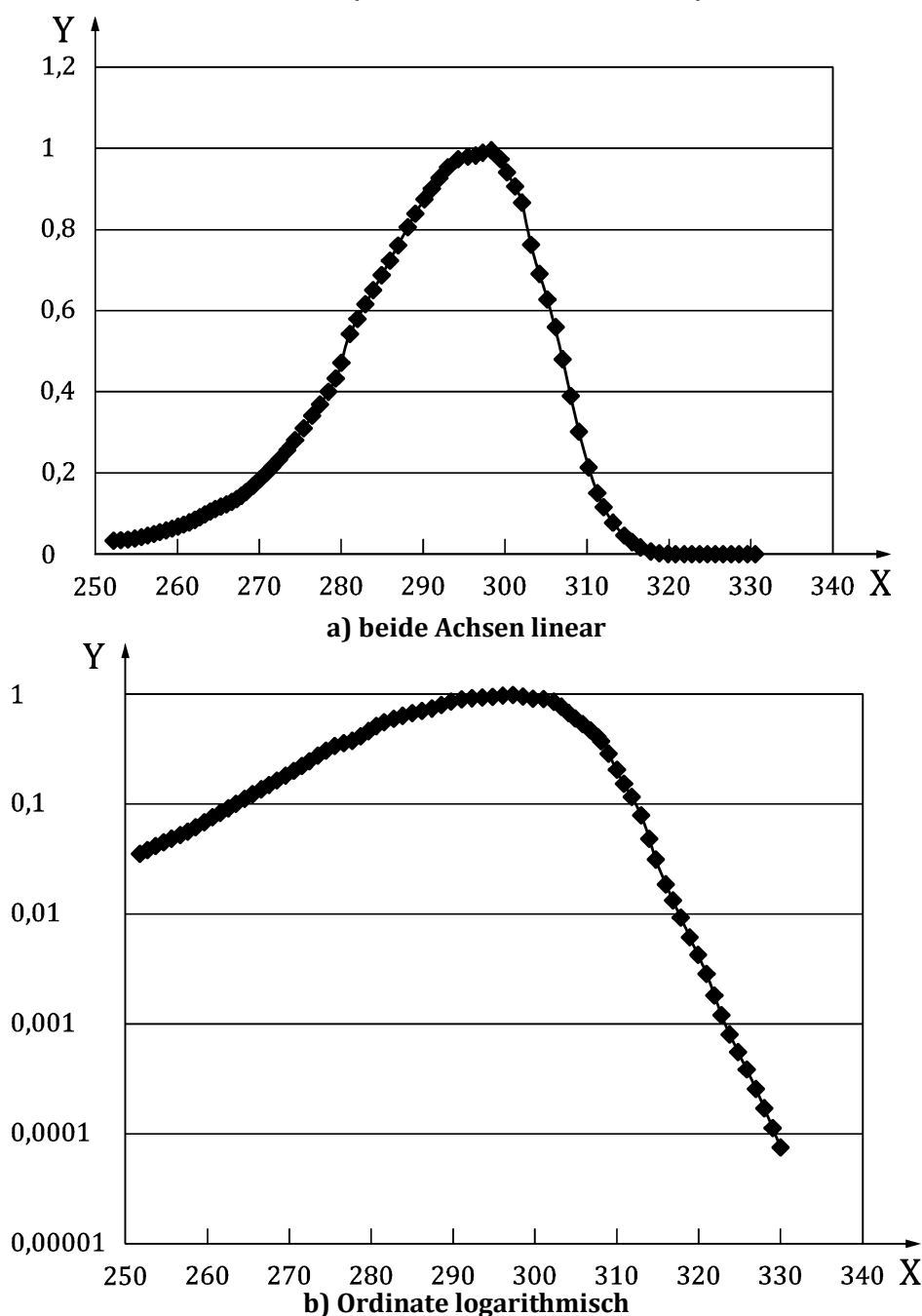
Bild 11 — Wirkungsspektrum der Inaktivierung von *propioni acnes*-Bakterien $A_{ipa}(\lambda)$

4.3.3 Sonstige Wirkungen photochemischer Genese

Die nachstehend angeführten photobiologischen Wirkungen basieren auf Wechselwirkungen mit sonstigen Chromophoren, die im Hautgewebe vorhanden sind.

4.3.3.1 Prävitamin D₃-Bildung (Kurzzeichen: vd)

Durch UV-Bestrahlung wird das Provitamin 7-Dehydrocholesterin in der Oberhaut in Prävitamin D₃ umgewandelt. Durch Hydroxilierung in Leber und Niere sowie in der Epidermis entstehen die bioaktiven Verbindungen des Vitamin D₃, die den Calciumstoffwechsel regulieren und Hormoncharakter haben. Sie beeinflussen die interzelluläre Kommunikation, die Zelldifferenzierung, endokrine Regelsysteme, Immunreaktionen, Makrophagenfunktionen sowie den Muskel- und Myokardstoffwechsel. Das Wirkungsspektrum der UV-induzierten Prävitamin D₃-Bildung ist von der CIE [52] festgelegt und erstreckt sich über den Wellenlängenbereich $250 \text{ nm} \leq \lambda \leq 330 \text{ nm}$ (siehe Bild 12 und Tabelle A.9).



Legende

X Wellenlänge λ in nm

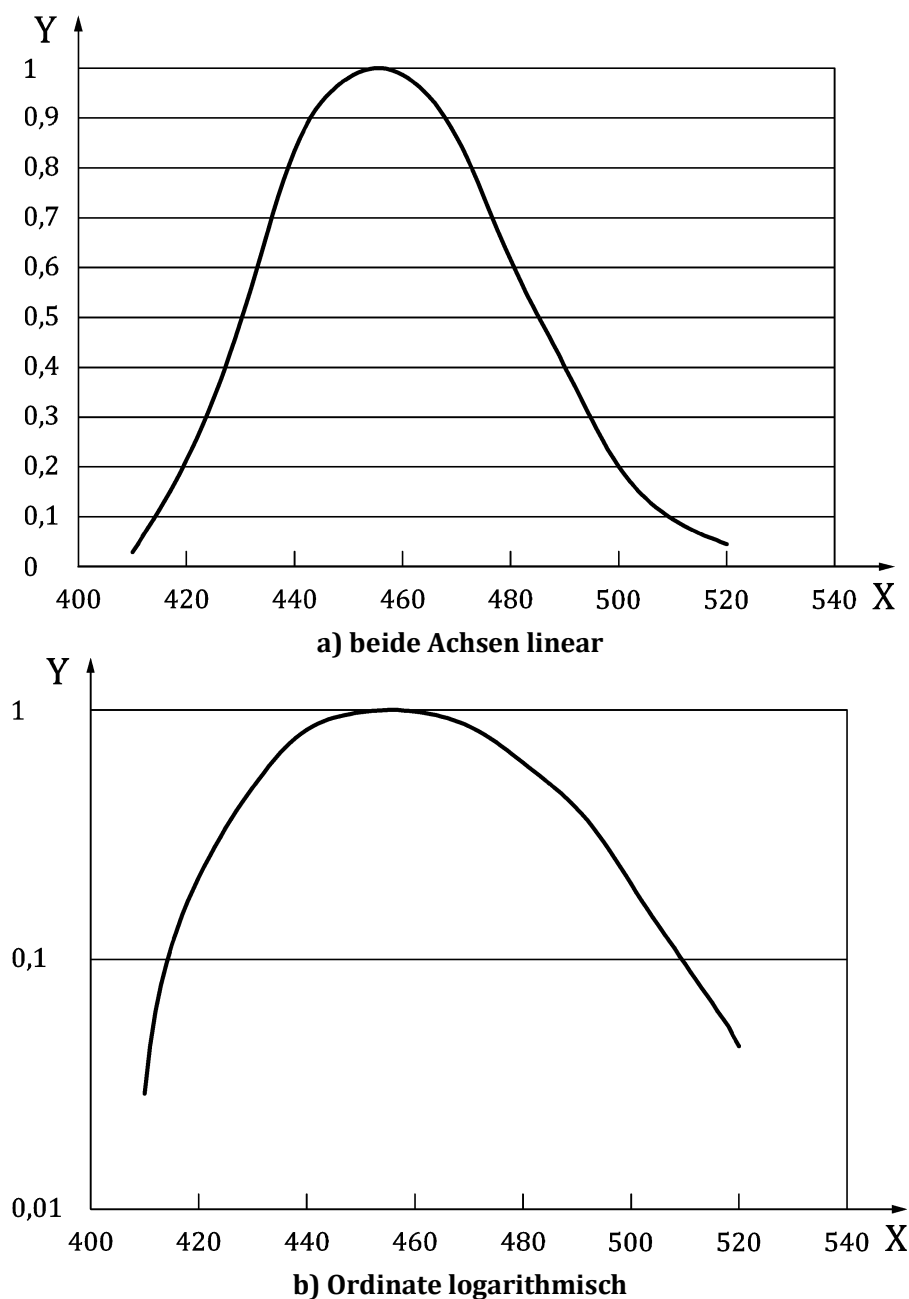
Y spektraler Wirkungsfaktor $A_{vd}(\lambda)$

Bild 12 — Wirkungsspektrum der Prävitamin D₃-Bildung $A_{vd}(\lambda)$

4.3.3.2 Photoisomerisierung von Bilirubin (Kurzzeichen: bi)

Bilirubin wirkt zytotoxisch (vor allem neurotoxisch). Es kann daher bei Neugeborenen zu einer Bilirubin-enzephalopathie führen. Durch die Bestrahlung von Bilirubin in Hautpartien im Wellenlängenbereich $400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 550 \text{ nm}$ [17] (siehe Bild 13 und Tabelle A.10) werden sowohl durch Photooxidation eine autosensibilisierte Photodestruktion ausgelöst als auch durch Photoisomerisierung instabile Konfigurations-isomere und stabile Strukturisomere gebildet.

Für therapeutische Anwendung sollte die photobiologisch wirksame Bestrahlungsstärke E_{bi} auf der Haut mindestens $0,05 \text{ Wm}^{-2}$ betragen.



Legende

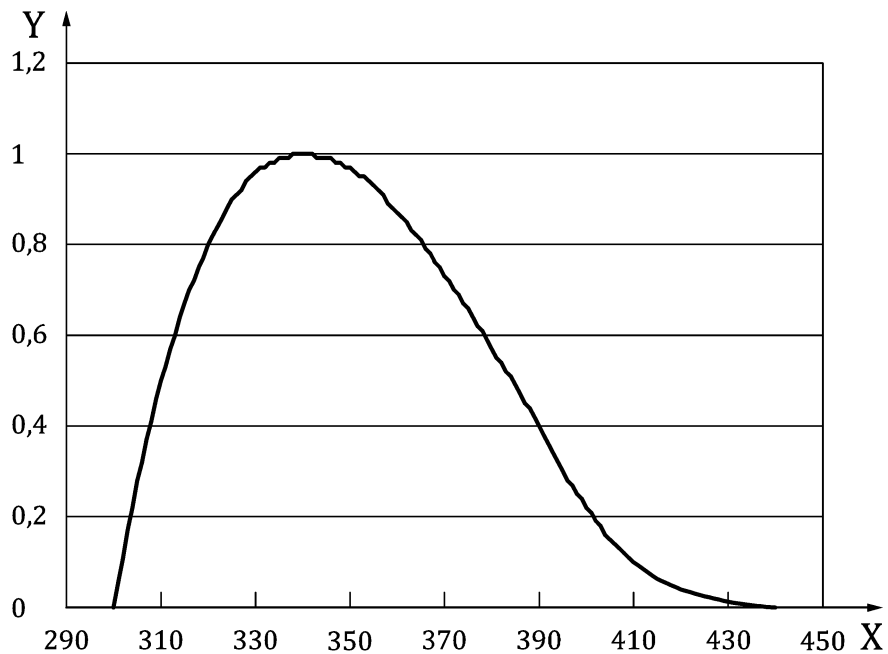
- X Wellenlänge λ in nm
Y spektraler Wirkungsfaktor $A_{bi}(\lambda)$

Bild 13 — Wirkungsspektrum für die Photoisomerisierung von Bilirubin $A_{bi}(\lambda)$

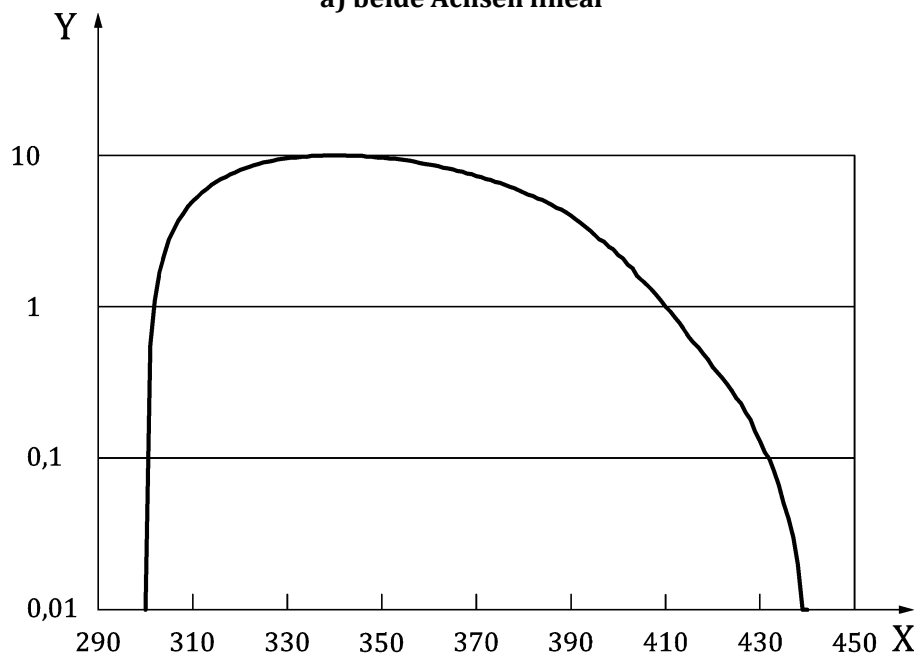
4.3.3.3 Sofortpigmentierung (Kurzzeichen: pi)

Unmittelbar nach Überschreitung der Schwellenbestrahlung (siehe Tabelle 1) im Wellenlängenbereich $300 \text{ nm} \leq \lambda \leq 440 \text{ nm}$ zeigt sich eine graubraune Hautfärbung, die sich dosisabhängig innerhalb von Minuten bis wenigen Tagen zurückbildet (siehe Bild 14 und Tabelle A.11).

Die Sofortpigmentierung beruht auf einer reversiblen oxidativen Melanindunkelung prädisponierter Menschen [18].



a) beide Achsen linear



b) Ordinate logarithmisch

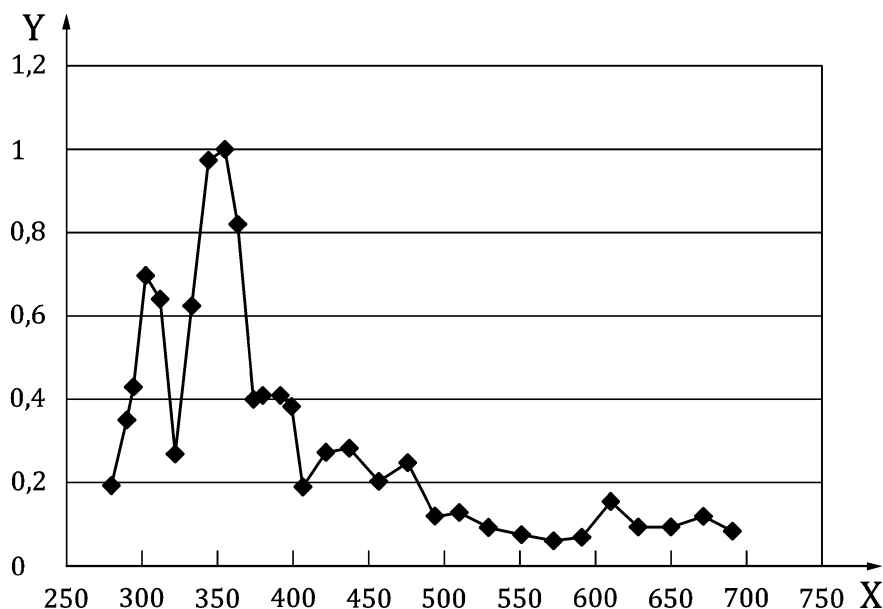
Legende

- X Wellenlänge λ in nm
- Y spektraler Wirkungsfaktor $A_{pi}(\lambda)$

Bild 14 — Wirkungsspektrum der Sofortpigmentierung $A_{pi}(\lambda)$

4.3.3.4 Bildung freier Radikale (Kurzzeichen: ra)

Das Wirkungsspektrum basiert auf der Bestimmung von freien Radikalen (Hydroxyl-, Superoxidradikale) je mg Haut mittels Elektronenspinresonanz-Spektroskopie nach Bestrahlung von menschlichen Hautbiopsien des Hauttyps II mit gefilterter und simulierter Sonnenstrahlung [19]. Untersucht wurde der Spektralbereich $290 \leq \lambda \leq 700$ nm, wobei sich das Wirkungsmaximum bei 355 nm (siehe Bild 15 und Tabelle A.12) ergibt.



Legende

X Wellenlänge λ in nm
Y spektraler Wirkungsfaktor $A_{ra}(\lambda)$

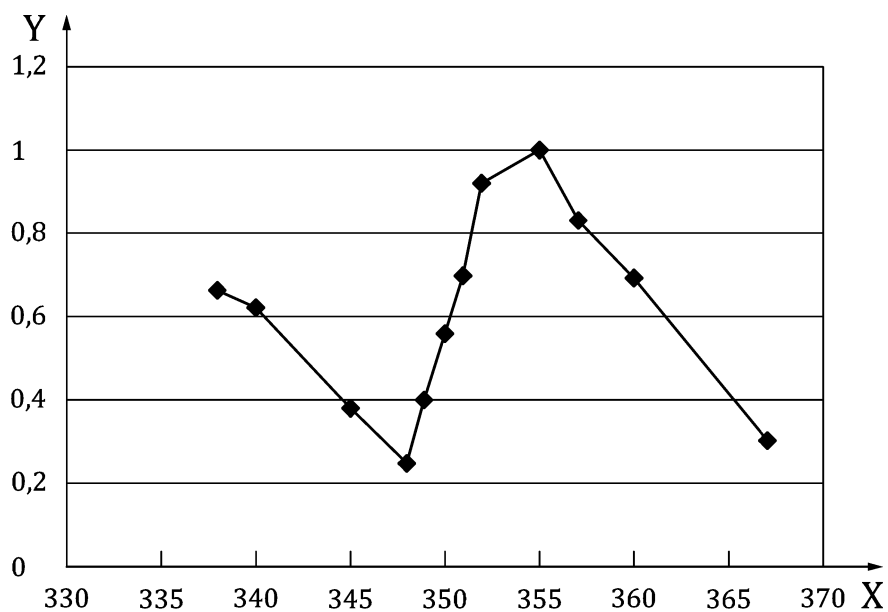
Bild 15 — Wirkungsspektrum für die Bildung freier Radikale $A_{ra}(\lambda)$

4.3.4 Wirkungen mit Photosensibilisatoren

Bei diesen photobiologischen Wirkungen erfolgt vor der Bestrahlung eine Sensibilisierung der Haut mit einer von außen zugeführten Substanz.

4.3.4.1 Photochemotherapie der Psoriasis (PUVA-Therapie) (Kurzzeichen: pu)

Bei der Photochemotherapie wird ein Photosensibilisator (z. B. 8-Methoxypsoralen 8-MOP) verwendet, der durch Photoaddition insbesondere an Nukleinsäuren gebunden wird. Das Wirkungsspektrum für den therapeutischen Effekt bei der Verwendung von 8-Methoxypsoralen liegt im Wellenlängenbereich zwischen 335 nm und 370 nm [20] (siehe Bild 16 und Tabelle A.13).



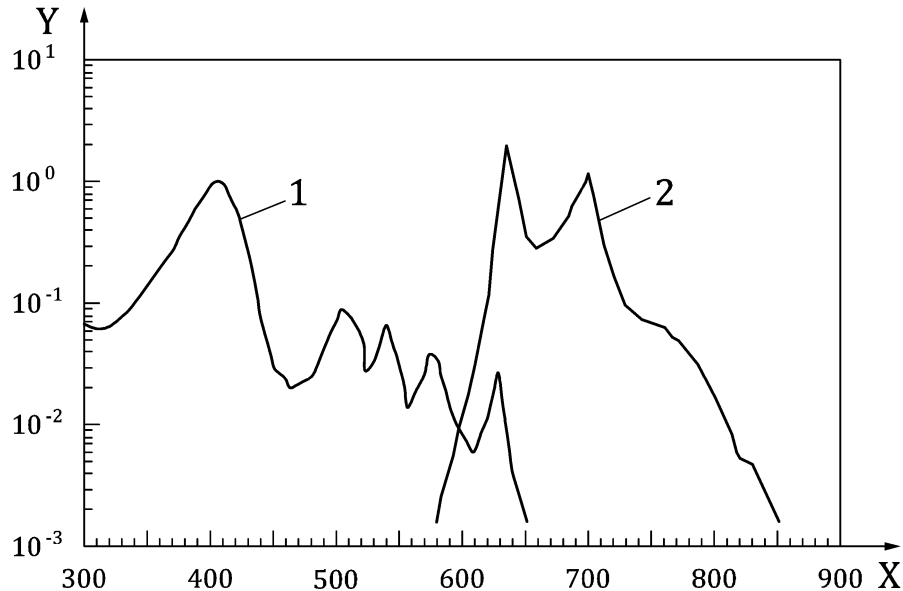
Legende

- X Wellenlänge λ in nm
 Y spektraler Wirkungsfaktor $A_{pu}(\lambda)$

Bild 16 — Wirkungsspektrum der antipsoriatischen Wirkung von UV-A-Strahlung bei Anwendung von 8-MOP $A_{pu}(\lambda)$

4.3.4.2 Photodynamische Therapie

Die photodynamische Therapie basiert auf der Bildung von reaktivem Sauerstoff und freien Radikalen mit phototoxischer Wirkung nach Strahlungsabsorption durch einen Sensibilisator, (z. B. Protoporphyrin IX) der bevorzugt in bestimmten, z. B. präkanzerogenen und kanzerogen veränderten Zellen angereichert wird (siehe Bild 17, informativ) [14], [15]. Neben der Nutzung zu therapeutischen Zwecken kann der Effekt der auftretenden Fluoreszenz zur Diagnostik der veränderten Zellen (photodynamische Diagnostik PDD) genutzt werden.



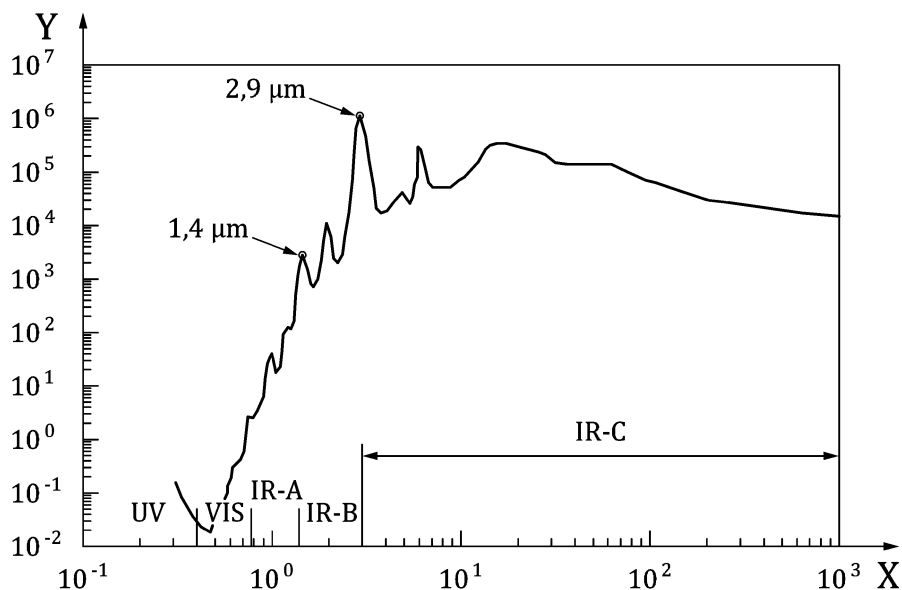
Legende

- X Wellenlänge λ in nm
 Y normierte Wirkungsquerschnitte $\sigma_{abs}(\lambda)$ (Kurve 1), $\sigma_{em}(\lambda)$ (Kurve 2)
 1 Absorption
 2 Fluoreszenz

Bild 17 — Absorptionsspektrum und Spektrum der Fluoreszenz von Protoporphyrin IX

4.3.5 Erwärmungseffekte in der Haut durch optische Strahlung

Die Absorption optischer Strahlung führt zu einer Erwärmung der Haut. Die Wellenlängenabhängigkeit wird im Wesentlichen durch die Absorption des Wassers bestimmt, da die Haut zu 59 % bis 72 % aus Wasser besteht (siehe Bild 18, informativ). In der Haut absorbierte optische Strahlung kann zur Ausbildung eines sofortigen Wärmeerythems bis hin zu Verbrennungen führen. UV-Wirkungen können dadurch ebenfalls verstärkt werden. Die Schmerzschwelle liegt bei einer Hauttemperatur von etwa 42 °C bis 45 °C. Häufige Übererwärmungen der Haut unterhalb der Hitzeschmerzschwelle können chronische Schäden wie z. B. die Hitzemelanose (Erythema ab igne) verursachen, die sich in Form netzartiger, permanenter Hautrötungen und Hyperpigmentierungen äußert.

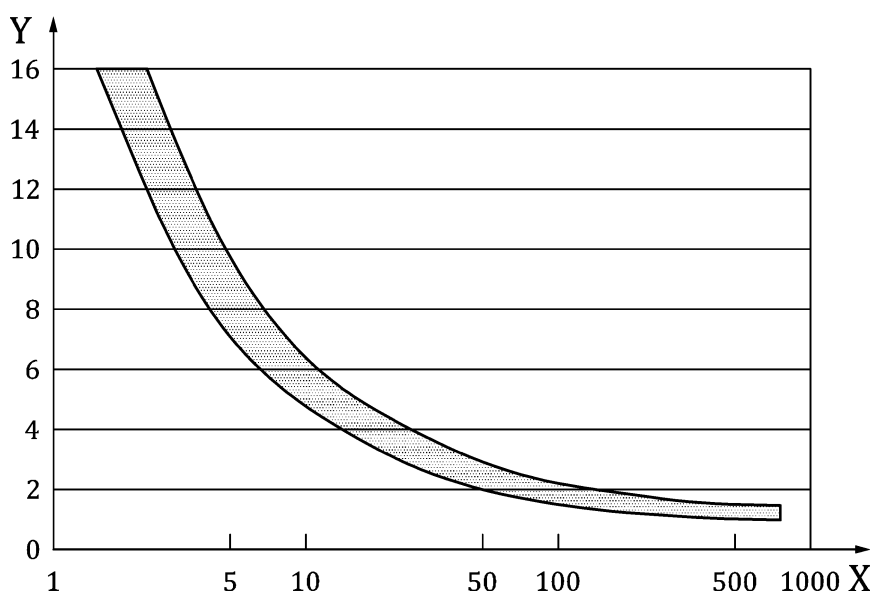


Legende

- X Wellenlänge λ in μm
 Y Absorptionskoeffizient in m^{-1}

Bild 18 — Absorptionskoeffizient des Wassers in Abhängigkeit der Wellenlänge

In DIN 33403-3:2011-07, Bild 7, [48] ist die Abhängigkeit der Schmerzempfindungen der unbedeckten Haut von der Bestrahlungsstärke angegeben (siehe Bild 19).



Legende

- X Expositionszeit t bis zum Eintritt der Schmerzempfindungen in s
 Y Bestrahlungsstärke E in kWm^{-2}

Bild 19 — Eintritt der Schmerzempfindungen der unbedeckten Haut in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke nach DIN 33403-3:2011-07, Bild 7

ANMERKUNG Die Wärmewirkung durch Strahlung kann vorzugsweise im Bereich von $600 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1\,400 \text{ nm}$ therapeutisch genutzt werden.