

Diplomarbeit

**ÜBER 100 JAHRE SONNENSCHUTZMITTEL:
RÜCKBLICK UND AUSBLICK**

eingereicht von

Vanessa Reiter

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktorin der gesamten Heilkunde

(Drⁱⁿ. med. univ.)

an der

Medizinischen Universität Graz

ausgeführt am

Landeskrinikum Graz

ausgeführt an der

Klinischen Abteilung für Dermatologie, Venerologie und Allergologie

unter der Anleitung von

Ao.Univ.-Prof. Dr.med.univ. Hofer Angelika, MME

Ao.Univ.-Prof. Dr.med.univ. Harald Meier

Klagenfurt, am 18. Oktober 2025

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Des Weiteren erkläre ich hiermit, dass, sofern bei der Erstellung dieser Arbeit Künstliche Intelligenz (KI) Werkzeuge zur Generierung und/oder Korrektur bestimmter Textpassagen verwendet wurden, dieser Einsatz unter Einhaltung ethischer Grundsätze, akademischer Integrität und den Vorgaben meiner Universität erfolgte, sowie in Folge dies transparent gemacht und in angemessener Weise gekennzeichnet wurde.

Klagenfurt, am 18. Oktober 2025

Vanessa Reiter eh.

Danksagungen

Anfänglich möchte ich mich herzlich bei meiner Betreuerin, Ao. Univ.-Prof. Dr. med. univ. Angelika Hofer, MME, bedanken. Sie hat mich mit großer Geduld, schnellen Rückmeldungen und wertvollen Hilfestellungen bei der Zusammenstellung dieser Arbeit unterstützt. Ebenso danke ich meinem Zweitbetreuer, Ao. Univ.-Prof. Dr. med. univ. Harald Meier, für die Übernahme der Begutachtung dieser Arbeit, sowie wertvollen Inputs.

Ein besonderer Dank geht an meine Eltern, Daniela Reiter und Franz Böhmer. Ohne euch wäre ein solches Studium nicht möglich gewesen. Danke für euren ununterbrochenen Glauben an mich und dafür, dass ihr mir den Weg geebnet habt.

Gertrud Böhmer sowie Maria Böhmer möchte ich ebenfalls von Herzen danken. Zwei Frauen, die immer ein offenes Ohr für mich haben und die ich für ihre besonderen Qualitäten zutiefst bewundere.

Meiner Schwiegerfamilie, Ulli, Klaus und Alice Widnig, die mich nicht nur auf meinem Weg unterstützt haben, sondern mir auch jederzeit ein offenes und herzliches Zuhause zum Lernen, Arbeiten und Lachen geschenkt haben, danke ich vielmals.

Ein weiterer Dank gilt meiner Mentorin, Dr. Kerstin Ortlechner, die mir schon seit vielen Jahren als Vorbild neue Perspektiven auf eine zeitgemäße Medizin und den Umgang mit Patient:innen eröffnet hat.

Auch meinen Freund:innen und Kommiliton:innen möchte ich danken. Aus dem gemeinsamen Lernen und Durchhalten sind Freundschaften entstanden, die mich weit über das Studium hinausbegleiten werden.

Am Ende dieser Arbeit gilt mein tiefster Dank meinem Partner David Widnig, der jeden Erfolg und jede Herausforderung mit mir geteilt hat. Danke für deine Unterstützung, deinen Rückhalt und deine inspirierende Sicht auf das Leben.

Mein Dank gilt auch allen Personen, die in irgendeiner Form mit dieser Diplomarbeit in Berührung gekommen sind - sei es aus organisatorischen, fachlichen Gründen oder schlicht aus Interesse.

Diese Arbeit widme ich meinem Onkel Karl-Heinz Böhmer sowie meinen Urgroßeltern Karl und Hemma Kerschbaumer, die eine entscheidende Rolle in meinem Leben gespielt haben.

Zusammenfassung

Die vorliegende Diplomarbeit mit dem Titel "Über 100 Jahre Sonnenschutzmittel: Rückblick und Ausblick" bietet einen umfassenden Überblick der historischen Entwicklung, der aktuellen Forschungsergebnisse sowie zukünftiger Perspektiven im Bereich der Photoprotektion. In dieser Arbeit wird die Transformation von Sonnenschutzmitteln von den frühen Schutzmethoden antiker Kulturen bis hin zu modernen, evidenzbasierten Produkten untersucht und deren medizinischer Stellenwert erörtert.

Ein zentraler Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf den biologischen Wirkmechanismen elektromagnetischer Strahlung im ultravioletten, sichtbaren und infraroten Bereich und ihrer Bedeutung für die Haut. Dabei werden neben Aspekten der Hautkrebsprävention auch weitere Krankheitsbilder und das Photoaging berücksichtigt. Die Analyse zeigt, dass all diese Strahlungsarten signifikante gesundheitliche Auswirkungen haben können.

Die Arbeit präsentiert die Fortschritte und Herausforderungen der modernen Photoprotektion. Hierzu zählen die Entwicklung neuer organischer und anorganischer Filter, Fragen der Photostabilität, mögliche toxikologische und endokrine Effekte sowie die zunehmende Relevanz ökologischer Aspekte, insbesondere hinsichtlich mariner Ökosysteme. Neben den herkömmlichen topischen Präparaten werden neuere Technologien und Innovationen wie Antioxidantien, DNA-Reparatur-Enzyme, Eisenoxide, Nanoverkapselung und orale Präparate diskutiert.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Analyse gesellschaftlicher Dimensionen: Es erfolgt eine wissenschaftliche Einordnung von Mythen und Fehlinformationen, sowie eine Darstellung geschlechtsspezifischer Unterschiede im Schutzverhalten. Die Ergebnisse bestätigen erneut, dass Sonnenschutzmaßnahmen einen signifikanten Beitrag zur Prävention lichtinduzierter Hautschäden und Erkrankungen leisten. Gleichzeitig unterstreichen sie die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Weiterentwicklung dieser Maßnahmen, um neuen wissenschaftlichen, regulatorischen und ökologischen Anforderungen gerecht zu werden. Zukünftig werden breitbandigere Filter, personalisierte Photoprotektion sowie die Integration von Mikrobiom- und Exposom-Forschung zentrale Schwerpunkte bilden.

Die Arbeit leistet damit nicht nur einen Rückblick auf über ein Jahrhundert Sonnenschutz, sondern zeigt auch die komplexen Herausforderungen und innovativen Lösungsansätze für die dermatologische Praxis und öffentliche Gesundheit der kommenden Jahre auf.

Abstract

This thesis, entitled “Over 100 Years of Sunscreen: Review and Outlook,” provides a comprehensive overview of the historical development, current research findings, and future prospects in the field of photoprotection. This thesis examines the transformation of sunscreen products from the early protection methods used by ancient cultures to modern, evidence-based products and discusses their medical significance.

A central focus of this thesis is on the biological mechanisms of action of electromagnetic radiation in the ultraviolet, visible, and infrared ranges and their significance for the skin. In addition to aspects of skin cancer prevention, other clinical pictures and photoaging are also considered. The analysis shows that all these types of radiation can have significant health effects.

The work presents the advances and challenges of modern photoprotection. These include the development of new organic and inorganic filters, questions of photostability, possible toxicological and endocrine effects, and the increasing relevance of ecological aspects, especially with regard to marine ecosystems. In addition to conventional topical preparations, newer technologies and innovations such as antioxidants, DNA repair enzymes, iron oxides, nanoencapsulation, and oral preparations are discussed.

Another focus is on the analysis of social dimensions: myths and misinformation are scientifically classified, and gender-specific differences in protective behavior are presented. The results confirm once again that sun protection measures make a significant contribution to the prevention of light-induced skin damage and diseases. At the same time, they underscore the need for continuous development of these measures in order to meet new scientific, regulatory, and environmental requirements. In the future, broader-spectrum filters, personalized photoprotection, and the integration of microbiome and exposome research will be key areas of focus.

The work thus not only provides a review of over a century of sun protection, but also highlights the complex challenges and innovative solutions for dermatological practice and public health in the coming years.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und deren Erklärung.....	1
Tabellenverzeichnis	4
1. Einleitung.....	5
1.1. Rückblick: Historische Entwicklung des Sonnenschutzes	5
1.2. Grundlagen der elektromagnetischen Strahlung der Sonne und ihre Auswirkungen auf die menschliche Haut.....	8
1.2.1. UV-Strahlung, Infrarotstrahlung und sichtbares Licht	8
1.2.2. UV-Schutzmechanismen der Haut	10
1.2.3. UV-Index	14
1.3. Solar-induzierte Haut- & Gesundheitsrisiken.....	15
1.3.1. Hautkrebs.....	15
1.3.2. Lichtdermatosen	17
1.3.3. Photoaging	19
1.3.4. Autoimmunerkrankungen.....	20
1.3.5. Augenerkrankungen.....	22
1.4. Grundlagen des Sonnenschutzes	23
1.4.1. Definition.....	23
1.4.2. Grundlegende Funktionsweise	23
1.4.3. Bedeutung des Lichtschutzfaktors und UVA-Rating Systeme.....	24
1.4.4. Rechtliche Rahmenbedingungen	26
1.4.5. Inhaltsstoffe im Überblick	27
1.4.6. Die richtige Anwendung und Darreichungsform	30
1.4.7. Sonnenschutzkleidung	31
1.4.8. UV-Sticker.....	32
1.5. Sonnenschutz im Wandel: Entwicklungen und Kontroversen	33
2. Material und Methoden	34
2.1. Ziel der Diplomarbeit	34
2.2. Auswahl und Analyse der verwendeten Datenquellen und Fachliteratur.....	35
2.3. Methodischer Ansatz zur Untersuchung der Thematik	35
2.4. Grenzen und Limitationen der angewandten Methodik	36
3. Ergebnisse.....	36
3.1. Fortschritte und Herausforderungen im Bereich der Inhaltsstoffe	36
3.2. Innovationen und Entwicklungen bei Sonnenschutzmitteln	38
3.2.1. Entwicklung und Wirksamkeit biologischer Sonnenschutzmittel.....	39
3.2.2. Antioxidantien	41
3.2.3. Eisenoxide	42
3.2.4. Nano- & Verkapselungstechnologien.....	43
3.2.5. Orale Sonnenschutzmittel.....	44
3.2.6. DNA-Reparatur-Enzyme	46
3.3. Neue Erkenntnisse zu sichtbaren und Infrarot-Licht.....	47
3.3.1. LED-Masken: Social Media Trend oder evidenzbasierte Therapie?	51
3.4. Bedeutung von täglichem Sonnenschutz für Hautgesundheit und Krankheitsprävention.....	54
3.4.1. Zwillingsstudien: Der Langzeiteffekt von Sonnenschutz auf Hautalterung	55
3.4.2. Prävention von lichtinduzierten Hautschäden und Hautkrebs.....	57
3.5. Wechselwirkungen zwischen Sonnenschutzmitteln und dem Hautmikrobiom ..	59
3.6. Geschlechtsspezifische Unterschiede im Sonnenschutzverhalten.....	61

3.7.	Verbreitete Mythen und wissenschaftliche Fakten.....	63
3.7.1.	„Personen mit dunklem Hauttyp benötigen keinen Sonnenschutz“	64
3.7.2.	„Bewölkung und Innenräume bieten ausreichenden UV-Schutz“	66
3.7.3.	„Sonnenschutz hemmt die körpereigene Vitamin-D-Produktion“	66
3.7.4.	„Trotz zunehmender Nutzung von Sonnenschutzmitteln steigen die Hautkrebsfälle“	68
3.7.5.	„Sonnenschutzmittel begünstigen das Auftreten von frontal fibrosierender Alopezie“	70
3.7.6.	„Die Umwelt wird durch Sonnenschutzprodukte geschädigt“	71
3.7.7.	„UV-Filter werden systemisch aufgenommen und beeinflussen das endokrine, neurotoxische und reproduktive System“	74
3.7.8.	„Konsument:innen müssen Inhaltsstoffe und Nebenwirkungen in Sonnenschutzmittel fürchten“	76
3.7.9.	„Kinder benötigen keinen speziellen Sonnenschutz“	77
3.7.10.	„Bräune ist ein Symbol für Gesundheit“	79
4.	Diskussion	80
4.1.	Schlussfolgerungen von Sonnenschutzmitteln	80
4.2.	Ausblick: Das bringt die Zukunft	83
4.3.	Abschließende Empfehlung	85
4.4.	Offene Fragen und bestehende Wissenslücken	87
	Literaturverzeichnis	89

Abkürzungen und deren Erklärung

AAD: American Academy of Dermatology
AK: Aktinische Keratose
AP1: Aktivator-Protein-1
ATP: Adenosin-Tri-Phosphat
BCC: Basalzellkarzinom (Basal Cell Carcinoma)
BMJ: British Medical Journal
BP-3: Benzophenon-3
CaMKII: Calcium/Calmodulin-abhängige Proteinkinase II
CAT: Katalase
CDLE: Chronisch-discoider Lupus erythematoses
CeO₂: Ceroxid
CePO₄: Ceriumphosphat
CLE: Kutaner Lupus Erythematoses
CM: Kutanes Melanom (Cutaneous Melanoma)
CPDs: Cyclobutan-Pyrimidindimere
CREP: cAMP responsive element-binding protein
DNA: Desoxyribonukleinsäure
EGCG: Epigallocatechingallat
EGFR: epidermalen Wachstumsfaktor-Rezeptors (Epidermal Growth Factor Receptor)
EHMC: Ethylhexylmethoxycinnamat (UV-Filter)
EU: Europäische Union
FDA: Food and Drug Administration (US-amerikanische Lebensmittel- und Arzneimittelbehörde)
FFA: Frontal Fibrosierende Alopezie
GPF: Garment Protection Factor
GPx: Glutathionperoxidase
GRASE: „allgemein als sicher und wirksam anerkannt“ („Generally Recognized As Safe and Effective“)
GSH: Glutathion
HAA299 (BDBP): Bis-(Diethylaminohydroxybenzoyl Benzoyl) Piperazine (UV-Filter)
HEVL: Hochenergetisches sichtbares Licht (High energy visible light)
IARC: Internationale Agentur für Krebsforschung (International Agency for Research on Cancer)
ICNIRP: Die Internationale Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)
IFN: Interferon
IgE: Immunglobulin-E
KC: Keratinozytenkarzinom
IL: Interleuktin
INCI: Internationale Nomenklatur für kosmetische Inhaltsstoffe (International Nomenclature of Cosmetic Ingredients)
IPD: Immediate Pigment Darkening
IR: Infrarot
IRA: Infrarot-A
ISO: Internationale Organisation für Normung (International Organization for Standardization)

LED: Leuchtdiode (Light Emitting Diode)
LLLT: Low-Level-Licht-Therapie
LSF: Lichtschutzfaktor
MAA: Mycosporinähnliche Aminosäuren
MAPKS: Mitogen-Aktivierende-Protein-Kinasen
MCE: Mexoryl 400 (UV-Filter)
MC1R: Melanocortin-1-Rezeptor
MED: Minimale Erythemdosis
MEDLINE: Medical Literature Analysis and Retrieval System Online
MITF: Microphthalmie-assoziiertes Transkriptionsfaktor
MM: Malignes Melanom
MMP: Matrix-Metalloproteinasen
MSH: Melanozytenstimulierendes Hormon
NDA: Antrag auf Zulassung eines neuen Arzneimittels bei der FDA (New Drug Application)
NER: Nucleotide Excision Repair
NF- κ B: Nukleärer Faktor κ B
NHS: National Health Service
NIR: Nahinfrarot-Strahlung
NLC: Nanostrukturierte Lipidträger
NMSC: Nicht-melanozytärer Hautkrebs (Non-Melanoma Skin Cancer)
Nrf2: Nukleärer Faktor Erythroid 2-verwandter Faktor 2
OPN: Opsin
OTC: freiverkäufliche Medikamente (Over-the-Counter)
OUVI: Augen-UV-Index (ocular ultraviolet index)
PA: Protection Grade of UVA
PABA: Para-Aminobenzoesäure
PCR: Polymerase-Kettenreaktion (Polymerase Chain Reaction)
PDT: Photodynamische Therapie
PLD: Polymorphe Lichtdermatose
PL: Polypodium leucotomos-Extrakt
POMC: Proopiomelanocortin
PPD: Persistent Pigment Darkening
PRISMA: Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
ROS: Reaktive Sauerstoffspezies (Reactive Oxygen Species)
Ro/SSA: Sjörgen-Syndrom-Related Antigen A Autoantibodies
S. aureus: Staphylococcus aureus
SCC: Plattenepithelkarzinom (Squamous Cell Carcinoma)
SCCS: Wissenschaftlicher Ausschuss für Verbrauchersicherheit der EU (Scientific Committee on Consumer)
SCLE: Subakuter kutaner Lupus erythematoses
SED: Standard Erythem Dosis
SL: Sichtbares Licht
SLE: Systemischer Lupus Erythematoses
SOD: Superoxiddismutase
SPF: Sun Protection Factor
TiO₂: Titandioxid
TNF- α : Tumornekrosefaktor- α
TREX1: Drei-Prime-Repair-Exonuklease 1
UPF: Ultraviolet Protection Factor

USPSTF: United States Preventive Services Task Force
UV: Ultraviolett
UVA: Ultraviolett-A
UVA1: Ultraviolett-A-1
UVB: Ultraviolett-B
UVC: Ultraviolett-C
UVI: Ultraviolett-Index
UVR: Ultraviolette Strahlung (Ultraviolet Radiation)
VEGF: Vascular Endothelial Growth Factor
VL-PF: Visible Light Protection Factor
WHO: Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization)
WMO: Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization)
ZnO: Zinkoxid
4-MBC: 4-Methylbenzylidencampher (UV-Filter)
6-HAP: 6-N-hydroxyaminpurin
25(OH)D3: Vitamin D3, Cholecalciferol

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: UV-Strahlenfilter 27

1. Einleitung

1.1. Rückblick: Historische Entwicklung des Sonnenschutzes

Die Auswahl an Sonnenschutzmitteln ist durch eine Vielzahl an Produkten mit unterschiedlichen Wirkstoffen und Werbeaussagen zunehmend unübersichtlich geworden. Trotz Formulierungsunterschiede basieren moderne Sonnenschutzmittel auf jahrtausendealtem Wissen. Ein Rückblick auf seine Entwicklung zeigt die Transformation traditioneller Schutzmethoden hin zu evidenzbasierten Präparaten. Ein Verständnis, das heute für fundierte dermatologische Empfehlungen unerlässlich ist. (Ma and Yoo, 2021)

Beginnend mit den frühen Homo-sapiens-Populationen in Afrika wird angenommen, dass ihre dunkle Haut dank eines hohen Melaningehalts vor ultravioletter (UV-) Strahlung schützte. Mit der Migration nach Norden vor etwa 60.000 Jahren passten sich die Menschen an kühlere Klimazonen und geringere UV-Exposition an, indem sie Tierfelle als zusätzlichen, passiven Sonnenschutz nutzten. Die geringere UV-Exposition führte zu einer Verringerung der Hautpigmentierung, was sich gleichzeitig positiv auf die Vitamin-D-Synthese des Körpers auswirkte, da diese auch bei reduzierter Sonneneinstrahlung ermöglicht wurde. (Svarc, 2015)

Frühe Zivilisationen verehrten die Sonne als lebensspendende Kraft. Mit wachsendem Verständnis über gesundheitliche Risiken, insbesondere für die Haut, rückte jedoch die rationale Betrachtung in den Mittelpunkt. (Ma and Yoo, 2021) Bereits um 4000 v. Chr. nutzten die alten Ägypter als erste bekannte Kultur pflanzliche Extrakte wie Reiskleie, Jasmin und Lupine, um sich vor den Auswirkungen der Sonneneinstrahlung zu schützen. Zwischen 800 und 500 v. Chr. entwickelten die alten Griechen erste Strategien zum Sonnenschutz: Beim Training für die Olympischen Spiele trugen sie eine Mischung aus Olivenöl und Sand auf die Haut auf. Um 500 v. Chr. wurde im indischen Medizinschrifttum *Charaka Samhita* erstmals Pushpanjan, welches heute als Zinkoxid bekannt ist, erwähnt. Diese Substanz findet sich noch heute in physikalischen Sonnenschutzmitteln.

Im 17. Jahrhundert galt blasse Haut als Zeichen von Wohlstand, weshalb wohlhabende Frauen Gesichtsmasken, sogenannte Visards, trugen, um sich vor der Sonne zu schützen. Ab dem späten 18. Jahrhundert begannen medizinische und physikalische Erkenntnisse

über die Wirkung von Sonnenlicht auf die Haut an Bedeutung zu gewinnen. 1798 wurde mit *eczema solare* erstmals eine lichtinduzierte Hauterkrankung beschrieben. Die Entdeckung der ultravioletten Strahlung durch Johann Willhelm Ritter im Jahr 1801 und die Erkenntnis von Sir Everard Home im Jahr 1820, dass nicht Wärme, sondern UV-Strahlen Hautschäden verursachen, legten den Grundstein für das wissenschaftliche Verständnis von Sonnenbrand.

Im 19. Jahrhundert rückte der präventive Sonnenschutz zunehmend in den Fokus. Forscher wie der Österreicher Otto Veiel erkannten die Schutzwirkung von Gerbstoffen, während Erik Johan Widmark experimentell den Zusammenhang zwischen UV-Strahlung und Hautverbrennung nachwies. 1891 entwickelte Friedrich Hammer das erste chemische Sonnenschutzmittel, und Dr. Paul Unna stellte sowohl den Zusammenhang zwischen Sonnenlicht und Hautkrebs, als auch ein pflanzenbasiertes Schutzprodukt, her.

Im 20. Jahrhundert veränderte sich das gesellschaftliche Schönheitsideal: Gebräunte Haut wurde modern, angestoßen durch Coco Chanel in den 1920er-Jahren. (Sakkaravarthi, 2022) Parallel dazu entwickelten im Jahr 1922 der österreichische Chemiker Joseph Maria Eder und österreichische Radiologe Leopold Freund das Sonnenschutzmittel "Antilux", das auf einem 2–4%-igen Natriumsalz der 2-Naphthol-6,8-disulfonsäure in Salbengrundlage basierte. Diese Substanz wies eine signifikante Wirksamkeit im Bereich UVB sowie im langwelligen UVA-Segment auf.

Die Ergebnisse wurden in der Wiener klinischen Wochenschrift publiziert, wodurch „Antilux“ als eines der ersten modernen Sonnenschutzpräparate entstand. Eder ließ seine Lichtschutzformulierungen darüber hinaus patentieren (DRP Nr. 379699) und initiierte damit den Übergang von einfach pflanzlichen Salben zu gezielt entwickelten, UV-absorbierenden Kompositionen.

Die gemeinsamen Forschungsarbeiten von Eder und Freund sind von signifikanter Bedeutung für die Festigung ihrer Position als zentrale Pioniere in der frühen Geschichte moderner Sonnenschutzmittel. Die Synergie aus photochemischer Expertise (Eder) und dermatologischer Methodik (Freund) bildete die Grundlage für die systematische Entwicklung von Produkten, die den Schutz vor UV-Strahlung gezielt optimierten. (Urbach, 2001a)

Des Weiteren entstanden erste kommerzielle Sonnenschutzmittel mit UVB-Filtern. Mitte der 1930er-Jahre entwickelte Eugène Schueller, Gründer von L'Oréal, ein Bräunungsöl mit Benzylsalicylat und Para-Aminobenzoesäure (PABA), das unter dem Namen „Ambre Solaire“ vermarktet wurde. Wenige Jahre später, 1938, erlitt der österreichische Chemiker Franz Greiter bei einer Besteigung des Piz Buin einen starken Sonnenbrand. Dies war ein prägendes Erlebnis, das ihn dazu brachte 1942 das erste moderne Sonnenschutzprodukt mit dem Namen „Gletscher Crème“ auf den Markt zu bringen, welches sich als ein Meilenstein in der Geschichte lichtschützender Hautpflege entpuppte. (Sakkaravarthi, 2022) In der medizinischen Fachliteratur wird Franz Greiter als Begründer des Konzepts des Sonnenschutzfaktors (SPF) beschrieben. Im Jahr 1962 erfolgte die Einführung des Begriffs mit der Intention, die Schutzleistung von Sonnenschutzmitteln messbar und untereinander vergleichbar zu gestalten. Diese Einführung markierte einen entscheidenden Fortschritt in der Standardisierung und Bewertung von Sonnenschutzprodukten und bildet bis heute die Grundlage für die internationale Kennzeichnung von Sonnenschutzmitteln. (Osterwalder and Herzog, 2009; Stockdale, 1985) Während des Zweiten Weltkriegs, im Jahr 1944, entwickelte der amerikanische Apotheker Benjamin Green eine verbraucherfreundlichere Rezeptur auf Basis von rotem Veterinär-Vaseline, die als „Coppertone“ bekannt wurde. Die Nachkriegszeit war von Innovation und Standardisierung geprägt. So wurde 1970er-Jahren der Lichtschutzfaktor eingeführt, später durch die U.S. Food and Drug Administration (FDA) normiert, und UVA-Filter wie Avobenzon kamen auf den Markt. Studien in den 1990er-Jahren führten zur Entwicklung von Bewertungssystemen wie dem UVA-Sternesymbol.

Im 21. Jahrhundert verlagerte sich der Fokus zunehmend auf gesundheitliche Risiken und Umweltaspekte. Der Zusammenhang zwischen Solarien und Hautkrebs wurde bestätigt, ebenso wie die Schädigung mariner Ökosysteme durch bestimmte UV-Filter. Daraufhin wurden gesetzliche Regulierungen verschärft, etwa durch den „Sunscreen Innovation Act“ oder das Verbot umweltschädlicher Stoffe auf Hawaii. Parallel dazu wurden neue Produkte wie UV-Warnsticker und pulverförmiger Sonnenschutz entwickelt, um Schutzwirkung und Anwendbarkeit weiter zu verbessern. (Sakkaravarthi, 2022)

Der Bedarf an Schutzmechanismen gegen sonneninduzierte Hautschäden besteht bereits seit der Antike. In der heutigen Zeit trägt die verlängerte Lebenserwartung dazu bei, dass die kumulative UV-Belastung ansteigt und damit auch das Risiko für

Hautkrebserkrankungen zunimmt. Parallel dazu ist in vielen Gesellschaften ein Wandel in ästhetischen Idealen zu beobachten: Während gebräunte Haut über Jahrzehnte hinweg als Ausdruck von Gesundheit galt, zeichnet sich mittlerweile ein Trend zu geschützter, gleichmäßiger Haut ab. In diesem Kontext hat sich der Sonnenschutz zu einem wesentlichen Bestandteil der Prävention und zu einem bedeutenden Wirtschaftsfaktor entwickelt. (Urbach, 2001b)

1.2. Grundlagen der elektromagnetischen Strahlung der Sonne und ihre Auswirkungen auf die menschliche Haut

Die Sonne strahlt ein breites Spektrum elektromagnetischer Wellen aus, wobei der Intensitätsschwerpunkt im Bereich des sichtbaren Lichts (400–700 nm) liegt. Der Großteil der elektromagnetischen Strahlung, der die Erdoberfläche erreicht, besteht aus UVB (290–320 nm), UVA2 (320–340 nm), UVA1 (340–400 nm), sichtbarem Licht (SL, 400–700 nm) sowie Infrarotstrahlung (IR, 700 nm bis 1 mm).

Die Forschung im Bereich der kutanen Photobiologie hat sich lange Zeit vornehmlich auf den UV-Anteil des Sonnenspektrums konzentriert, da das Maximum der erythemawirksamen Strahlung bei etwa 295 nm liegt. Sichtbares Licht macht jedoch etwa 50 % der Sonnenstrahlung aus, die die Erdoberfläche erreicht, im Vergleich zu nur etwa 5 % durch UV-Strahlen, und wurde ebenfalls mit biologisch relevanten Hautreaktionen wie Pigmentveränderungen und Erythembildung in Verbindung gebracht. (Geisler et al., 2021)

1.2.1. UV-Strahlung, Infrarotstrahlung und sichtbares Licht

Wenn Licht auf die Haut trifft, können die Photonen entweder reflektiert, gestreut oder absorbiert werden. Welcher dieser Prozesse dominiert, hängt stark von der jeweiligen Wellenlänge ab: kurze Lichtwellen werden stärker gestreut, während längere Wellen tiefer in das Gewebe eindringen können. (Imhof, 2021) Je kürzer die Wellenlänge, desto geringer ist ihre Eindringtiefe in biologische Strukturen. (Shin, 2020) Gleichzeitig nimmt ihre biologische Wirksamkeit zu, wodurch insbesondere UV-Licht für viele Organismen ein erhebliches Schädigungspotenzial besitzt. (Fioletov et al., 2010)

UVC-Strahlung (200–290 nm) weist die kürzeste Wellenlänge auf und wird durch die Ozonschicht nahezu vollständig abgefiltert, sodass sie die Erdoberfläche nicht erreicht. (Fioletov et al., 2010)

Die UVB-Strahlung mit einer Wellenlänge zwischen 290 und 320 Nanometern zeigt vor allem Effekte in der Epidermis. Dort führt sie zu direkten DNA-Schädigungen, etwa durch die Bildung von Pyrimidindimeren, was Sonnenbrand, programmierte Zelltodprozesse, Mutationen und langfristig Hautkrebs begünstigen kann. Gleichzeitig sind sie für die endogene Vitamin-D₃-Synthese essenziell und finden zudem in der Medizin Anwendung, beispielsweise in der Phototherapie mit 311 nm, zur Behandlung von Hauterkrankungen wie Psoriasis, Vitiligo oder Neurodermitis. Darüber hinaus induziert UVB ausgeprägte lokale und systemische Immunantworten, einschließlich der Freisetzung von Mikrovesikeln. (Addison et al., 2021; Bajgar et al., 2021; Bernard et al., 2019; Frommeyer et al., 2022; Mohania et al., 2017a; Romanhole et al., 2015)

UVA-Strahlen (320–400 nm) dringen tiefer bis in die Dermis ein und weisen an der Erdoberfläche eine wesentlich höhere Intensität auf. Sie sind etwa 100-fach stärker als UVB. (Shin, 2020) Sie verursachen überwiegend indirekte DNA-Schäden durch die Bildung reaktiver Sauerstoffspezies (ROS), was oxidativen Stress, Lipidperoxidation, Protein- und DNA-Schäden, Apoptose sowie immunologische Veränderungen auslöst. Diese Prozesse tragen maßgeblich zur Photoalterung und dem Risiko der Entwicklung von Hautkrebs bei. Zusätzlich sind UVA-Strahlen verantwortlich für eine sofortige und persistente Pigmentierung und können bei hoher Dosis auch Erytheme hervorrufen. (Bernerd et al., 2022; Brem et al., 2017; Sklar et al., 2012; Valerio et al., 2021)

Sichtbares Licht (400–700 nm) hat in den letzten Jahren ebenfalls an wissenschaftlicher Signifikanz gewonnen. Obwohl die meisten Erkenntnisse zu photobiologischen Hautschäden auf UV-Strahlung beruhen, zeigen Studien zunehmend Effekte des sichtbaren Lichts, insbesondere im blauen Spektrum, auf Hautpigmentierung und oxidativen Stress. Die Sonne stellt dabei die wichtigste natürliche Quelle dar. Künstliche Strahlungsquellen, wie beispielsweise LEDs, Laserdioden oder Bildschirme, emittieren ebenfalls sichtbares Licht, jedoch ist die Energie dieser Quellen in der Regel zu gering, um signifikante Hautschäden zu verursachen. (Pourang et al., 2022)

Infrarotstrahlung (>700 nm) weist die größte Eindringtiefe auf und erreicht die Dermis sowie das subkutane Gewebe. Es konnte festgestellt werden, dass sie insbesondere thermische Effekte entfaltet. Einerseits begünstigt dies die Hautalterung und thermische Schäden, andererseits können jedoch auch regenerative Prozesse gefördert werden, indem

sie die mitochondriale ATP-Produktion und die Kollagensynthese stimuliert. Zudem beeinflusst IR die Freisetzung von Zytokinen und Wachstumsfaktoren, wenngleich die genauen Mechanismen noch nicht vollständig geklärt sind. (Arranz-Paráiso et al., 2023; Horton et al., 2023; Montero et al., 2023; Tsai and Hamblin, 2017)

Es ist evident, dass die Wirkung von Licht nicht nur auf die Haut beschränkt ist, sondern eine signifikante Auswirkung auf eine Vielzahl physiologischer Prozesse des Menschen hat. Es reguliert circadiane Rhythmen, Schlaf, Stimmung und Stoffwechsel und wirkt dabei über hormonelle wie auch immunologische Mechanismen. Die Effekte können in Abhängigkeit von Intensität, Dauer, Wellenlänge und Zeitpunkt der Exposition sowohl schädlich als auch förderlich sein. (Garimano et al., 2025; Ishihara et al., 2023; LeGates et al., 2014; Slominski et al., 2024)

1.2.2. UV-Schutzmechanismen der Haut

Die Haut stellt die primäre Schutzbarriere des Körpers dar und fungiert als Barriere gegenüber physikalischen, chemischen und mikrobiologischen Einflüssen. Zudem reguliert sie den transepidermalen Wasserverlust. Die Barrierefunktion wird dabei überwiegend durch das Stratum corneum gewährleistet, das aus flachen Korneozyten und einer geordneten Lipidmatrix aus Ceramiden, Cholesterin und freien Fettsäuren besteht. Diese Lipidstruktur fungiert als Regulator der Durchlässigkeit der Haut und gewährleistet ihre strukturelle Stabilität. (Bouwstra et al., 2023; Madison, 2003; Proksch et al., 2008) Umweltfaktoren wie UV-Strahlung, Ozon, Feinstaub, Reinigungsmittel oder Mikroorganismen können die Lipidorganisation und Zellverbindungen (Tight und Adherens Junctions) beeinträchtigen und so die Hautdurchlässigkeit erhöhen. (Alhasaniah et al., 2019; Celebi Sözüner et al., 2020; Hui-Beckman and Leung, 2023)

Die Haut verfügt über mehrere endogene Abwehrstrategien, die dazu dienen, sich vor UV-induzierten Schäden zu schützen. Eine signifikante Rolle nimmt das Melanin ein, welches sowohl UVA- als auch UVB-Strahlen absorbiert und streut. Es fungiert als Radikalfänger und schützt die DNA der Epidermiszellen vor direkten UV-Schäden. Die Schutzwirkung ist dabei abhängig von Hauttyp und Melaninkonzentration. (Mohania et al., 2017a; Solano, 2020) Zusätzlich trägt die Trans-Urocaninsäure im Stratum corneum durch die Absorption von UVB-Strahlung zur Verringerung der Strahlungsdurchdringung bei. (Boo, 2020)

Des Weiteren wird nach UV-induzierter DNA-Schädigung, besonders durch die Bildung von Cyclo-Pyrimidin-Dimeren, Reparaturprozesse wie die Nukleotid-Exzisionsreparatur aktiviert, um Mutationen zu verhindern. (Mohania et al., 2017a; Suozzi et al., 2020) Stark geschädigte Keratinozyten werden durch Apoptose beseitigt, um eine maligne Transformation zu vermeiden. (Mohania et al., 2017b) Darüber hinaus tragen immunologische Reaktionen der Haut zum Schutz bei, indem sie UV-vermittelte Entzündungs- und Reparaturprozesse steuern. (Tang et al., 2024)

Eine weitere bedeutsame Schutzreaktion stellt die UVB-induzierte Verdickung der Epidermis (Hyperplasie) dar. Untersuchungen zeigen, dass eine Schädigung der DNA in epidermalen Zellen, insbesondere in der Basalzellschicht, zu einer verstärkten Proliferation der Keratinozyten führt. Dieser Prozess wird durch die Aktivierung des epidermalen Wachstumsfaktor-Rezeptors (Epidermal Growth Factor Receptor, EGFR) vermittelt. Nach UVB-Exposition wird der EGFR phosphoryliert, was zu einer Hochregulation von Cyclin D und einer Hemmung von CDK-Inhibitoren wie p21 führt. Dies resultiert in einer gesteigerten Zellteilung und in der Folge in einer Verdickung der Epidermis. (El-Abaseri et al., 2006)

Diese Hyperplasie manifestiert sich typischerweise innerhalb eines Zeitraums von 48 bis 72 Stunden nach UVB-Exposition und ist insbesondere in den Rete Ridges ausgeprägt. (Baba et al., 2005) Gleichzeitig werden Signalwege wie p38 und Ca²⁺-abhängige Kinasen aktiviert, die die Produktion extrazellulärer Matrixkomponenten, etwa Hyaluronan, fördern und somit zur strukturellen Stabilisierung der Haut beitragen. (Rauhala et al., 2013) Die Verdickung der Haut führt zu einer Verbesserung der Barrierefunktion und einer Reduktion des Eindringens von UV-Strahlung in tiefere Schichten. Dieser Mechanismus ist unabhängig von der Pigmentierung und ergänzt die Wirkung des Melanins. (Scott et al., 2012)

Neben der UVB-Reaktion bewirkt UVA-Strahlung eine Sofortpigmentierung der Haut durch die photochemische Oxidation und Umverteilung bereits vorhandener Melaninvorstufen in Melanozyten und Keratinozyten. Dabei wird ein Calcium-abhängiger Signalweg aktiviert, der über G-Protein-gekoppelte Rezeptoren wie Rhodopsin und Opsin-

3 (OPN3) vermittelt wird. Diese Signalaktivierung führt zur Freisetzung von Calcium, zur Aktivierung der Phospholipase C und zur Umverteilung von Melanosomen in die oberen Epidermisschichten. Das Phänomen der Immediate Pigment Darkening (IPD) manifestiert sich innerhalb weniger Minuten und persistiert über mehrere Stunden bis Tage. (Regazzetti et al., 2018; Wicks et al., 2011)

Bei Individuen mit dunkler Hautfarbe (Fitzpatrick IV–VI) kann auch blaues Licht eine vergleichbare Pigmentierungsreaktion auslösen. Dabei fungiert OPN3 als zentraler Photorezeptor, der über Calcium-vermittelte Signalwege (CaMKII, CREB, MAPK, p38) den Transkriptionsfaktor MITF aktiviert und die Expression der Enzyme Tyrosinase und Dopachrom-Tautomerase steigert. Haut mit dunkler Pigmentierung weist demnach eine intensivere und länger anhaltende Pigmentierung auf, da zusätzlich multimere Tyrosinase-Komplexe gebildet werden. (Mahmoud et al., 2010; Marionnet et al., 2023; Regazzetti et al., 2018; Yu et al., 2025)

Des Weiteren ist zu beachten, dass UVB-Licht durch DNA-Schäden eine Melanogenese induziert. UVB-induzierte DNA-Schäden, insbesondere Cyclobutan-Pyrimidin-Dimeren, führt zur Aktivierung des Transkriptionsfaktor p53 in Keratinozyten, der die Expression von Proopiomelanocortin (POMC) induziert. Aus POMC entsteht α -MSH, das an den Melanocortin-1-Rezeptor (MC1R) der Melanozyten bindet und die cAMP-Signalkaskade aktiviert. Diese bewirkt eine Hochregulation von MITF und der melanogenen Enzyme, insbesondere Tyrosinase. (Agar and Young, 2005; Gilchrest et al., 1996; Swope and Abdel-Malek, 2018)

Die Melaninsynthese wird durch die enzymatische Umwandlung von Tyrosin zu DOPA und anschließend zu Dopaquinon initiiert. In Abhängigkeit von den herrschenden Bedingungen wird Dopaquinon zu Eumelanin (braun-schwarz) oder Pheomelanin (gelb-rot) weiterverarbeitet. Diese Prozesse werden in Melanosomen durchgeführt, die ihr Pigment an Keratinozyten weitergeben. (D’Mello et al., 2016; Lambert et al., 2019) Ergänzend fördern UVB-induzierte Zytokine wie IL-1 sowie VEGF-abhängige und epigenetische Signalwege die Pigmentbildung. (Guo et al., 2023; Yang et al., 2022)

Die UVB-induzierte Melanogenese ist demnach als photoprotektiver Anpassungsmechanismus zu verstehen, der auf DNA-Reparatur, Zellkommunikation und Enzymaktivierung basiert. (Gilchrest et al., 1996)

Die Barrierefunktion der Haut ist von entscheidender Bedeutung für das Eindringen und die Resorption von Sonnenschutzmitteln. Die Epidermis, insbesondere das Stratum corneum, agiert als physikalische und biochemische Barriere, die das Eindringen von Fremdstoffen wie UV-Filtern signifikant hemmt. UV-Strahlung kann diese Barriere jedoch schwächen, indem sie die Lipidstruktur verändert und die Hautdurchlässigkeit erhöht. (Proksch et al., 2009)

Bei Patient:innen, die an Neurodermitis oder einem Filaggrin-Mangel leiden, ist diese Barrierefunktion gestört. Filaggrin nimmt eine Schlüsselrolle bei der Stabilisierung der Hornschicht sowie der Regulation der Feuchtigkeit ein. Ein Mangel kann zu einer erhöhten Permeabilität, trockener Haut und einer gesteigerten Aufnahme exogener Substanzen, einschließlich UV-Filtern, führen. (Proksch et al., 2009; Schmuth et al., 2024) Untersuchungen belegen, dass Filaggrin-Mutationen zu einer erhöhten Konzentration von UV-Filtern und Parabenen in der Haut führen. (Joensen et al., 2017)

Daher sollten Sonnenschutzmittel für Personen mit gestörter Hautbarriere speziell formuliert werden, wobei die Penetration der Filter reduziert und irritierende oder allergene Bestandteile vermieden werden sollten. Die Entwicklung solcher Präparate ist von besonderer Relevanz, da eine erhöhte Resorption systemische Effekte begünstigen kann. Es besteht dringender Forschungsbedarf bezüglich sicherer und effektiver UV-Filter-Formulierungen bei gestörter Barrierefunktion. (Joensen et al., 2017; Proksch et al., 2009)

Abschließend zeigt sich, dass der menschliche Organismus über ein komplexes antioxidatives Abwehrsystem verfügt, das sowohl endogene als auch exogene Antioxidantien umfasst. Diese neutralisieren freie Radikale oder wandeln sie in harmlose Verbindungen um. Besonders in der Epidermis ist die Konzentration an Antioxidantien hoch. Dort wirken lipophile und hydrophile Substanzen, darunter Glutathion (GSH), Vitamin C, α -Tocopherol und Squalen, zusammen mit Enzymen wie Superoxiddismutase (SOD) und Katalase (CAT). Fettlösliche Antioxidantien (z. B. α -Tocopherol, β -Carotin,

Ubichinon, Liponsäure) und wasserlösliche Vertreter (z. B. GSH, Ascorbinsäure) bilden die Basis dieser Schutzstrategie. Auch in der Dermis kommen wasserlösliche Antioxidantien und enzymatische Systeme vor. Enzyme wie SOD, CAT und Glutathionperoxidase (GPx) hemmen die Bildung von ROS, während niedermolekulare Antioxidantien wie Vitamin C, Vitamin E, Melatonin oder Flavonoide bereits entstandene Radikale gezielt abfangen. Bei starker Belastung, etwa durch intensive UV-Strahlung, kann diese natürliche Abwehr jedoch überfordert werden.

1.2.3. UV-Index

Der UV-Index (UVI) stellt eine weltweit einheitliche Skala dar, die dazu dient, die sonnenbrandwirksame UV-Strahlung an einem bestimmten Ort und zu einer festgelegten Zeit zu beurteilen. Er reicht von 0 bis über 13 und beschreibt die Gefährdung insbesondere heller Haut durch UV-Strahlung, wobei Intensität und Wellenlänge maßgeblich sind (Hatsusaka et al., 2021). Zusätzlich wird das tatsächliche Risiko durch weitere Umweltfaktoren wie Reflexionen, Bewölkung und geografische Lage beeinflusst (Kaundinya et al., 2022).

Ziel des 1995 weltweit eingeführten UVI, der auf dem erythemalen Wirkungsspektrum basiert, ist es, das Ausmaß der UV-bedingten Hautrötung (Erythem) in einer verständlichen Form darzustellen (Fioletov et al., 2010). Die erythemgewichtete Strahlungsleistung wird dabei in W/m^2 gemessen und mit einem normierten Faktor multipliziert, um eine einheitliche Skala zu erhalten. Der UVI wurde bereits 1992 in Kanada entwickelt und später durch die Weltgesundheitsorganisation (WHO), Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und weitere Institutionen global etabliert (Heckman et al., 2019).

Um den Schutzbedarf bei verschiedenen Intensitäten verständlicher zu kommunizieren, entwickelte die WHO im Jahr 2002 praxisorientierte Empfehlungen:

- $UVI \leq 2$: keine besonderen Schutzmaßnahmen
- $UVI 3-7$: Schatten aufsuchen, schützende Kleidung, Sonnencreme, Sonnenbrille und breitkrempiger Hut
- $UVI \geq 8$: Aufenthalt im Freien zur Mittagszeit vermeiden (Gefeller et al., 2022).

Trotz dieser Maßnahmen zeigte sich, dass der UVI vielfach missverstanden wird. Studien belegen, dass viele Menschen Schutzmaßnahmen eher anhand gefühlter Temperatur oder direkter Hautreaktionen statt am UVI selbst orientieren (Heckman et al., 2019). In Europa ist die Bekanntheit des UVI zudem geringer als in Nordamerika oder Australien, was teilweise auf die niedrigere UV-Belastung zurückgeführt wird.

Wissenschaftliche Untersuchungen belegen einen Zusammenhang zwischen erhöhtem UVI und der Inzidenz von Keratinozyten-basierten Hautkrebsarten. Bei malignem Melanom ist dieser Zusammenhang weniger eindeutig (Kaundinya et al., 2022). Zudem wurde festgestellt, dass die Belastung der Augen durch UV-Strahlung nicht mit jener der Haut übereinstimmt. So kann der klassische UVI das Risiko UV-bedingter Augenerkrankungen nicht zuverlässig abbilden. Neue Messmethoden, wie die Entwicklung eines spezifischen Augen-UV-Index (OUVI), zielen darauf ab, diese Lücke zu schließen. (Hatsusaka et al., 2021)

Durch die Online-Verfügbarkeit aktueller UVI-Daten kann das Bewusstsein für UV-bedingte Gesundheitsrisiken gefördert und präventive Maßnahmen unterstützt werden. (Fioletov et al., 2010) Dennoch wird betont, dass der UVI allein nicht genügt, um Verhaltensänderungen herbeizuführen. Er sollte durch weiterführende Aufklärungskampagnen ergänzt werden. (Heckman et al., 2019)

1.3. Solar-induzierte Haut- & Gesundheitsrisiken

1.3.1. Hautkrebs

Hautkrebs zählt zu den häufigsten malignen Erkrankungen weltweit und lässt sich grob in zwei Hauptkategorien unterteilen: nicht-melanozytäre Hauttumoren (NMSC), wie Basalzell- und Plattenepithelkarzinome, sowie das maligne Melanom (MM). Letzteres entsteht durch die maligne Transformation von Melanozyten, den pigmentproduzierenden Zellen der Haut, und stellt trotz seines vergleichsweise geringeren Anteils von etwa 5 % an allen Hauttumoren rund 75 % der hautkrebsbedingten Todesfälle. MM tritt vorwiegend kutan auf, kann jedoch auch Schleimhäute oder das Auge betreffen (Raimondi et al., 2020).

Das kutane Melanom (CM) stellt somit die Hautkrebsform mit der höchsten Krankheitslast und Sterblichkeit dar, gilt jedoch in hohem Maße als vermeidbar. Internationale Beispiele,

insbesondere aus Australien, belegen die Wirksamkeit breit angelegter Präventionsmaßnahmen, die durch evidenzbasierte Kampagnen sowie strukturelle und politische Interventionen zu einer Verhaltensänderung in Bezug auf Sonnenschutz führten (Lagacé et al., 2023).

Der bedeutendste umweltbedingte Risikofaktor für die Entwicklung von Hautkrebs ist die ultraviolette Strahlung (UVR), die maßgeblich durch Sonnenlicht sowie durch künstliche Quellen wie Solarien induziert wird. Die Internationale Agentur für Krebsforschung (IARC) klassifiziert UV-Strahlung in Gruppe 1 der karzinogenen Stoffe für den Menschen (Raimondi et al., 2020). UVR verursacht irreparable DNA-Schäden in Hautzellen, die zu Mutationen und unkontrolliertem Zellwachstum führen. Während NMSC überwiegend durch eine über einen längeren Zeitraum angesammelte UV-Belastung entsteht, bildet sich das maligne Melanom vor allem mit wiederholter, intensiver Sonneneinstrahlung, insbesondere während der Kindheit und Jugend. (Lindqvist et al., 2022)

Beobachtungsstudien zeigen einen signifikanten Zusammenhang zwischen UV-Belastung und Melanomrisiko. In Kanada beispielsweise sind laut einer Analyse über 62 % der Melanomfälle direkt auf UV-Exposition zurückzuführen. Etwa 30 % lassen sich auf riskantes Verhalten wie Sonnenbrände, Solariennutzung und exzessives Sonnenbaden zurückführen. Eine Reduktion dieser Verhaltensweisen könnte langfristig zehntausende Fälle vermeiden.

Sonnenschutzmaßnahmen, wie das Tragen schützender Kleidung, Kopfbedeckungen, Meidung der Mittagssonne sowie die Anwendung von Sonnenschutzmitteln, gelten als zentrale präventive Strategien. Während eine quantitative Übersichtsarbeit aus dem Jahre 2003 „keinen Zusammenhang zwischen der Verwendung von Sonnenschutzmitteln und dem Auftreten von Melanomen feststellen“ (Dennis et al., 2003, p. 966, eigene Übersetzung) konnte, ergab eine australische randomisierte kontrollierte Studie, dass „Melanome durch die regelmäßige Anwendung von Sonnenschutzmitteln bei Erwachsenen verhindert werden können“. (Green et al., 2011b, p. 257) Produkte mit einem Lichtschutzfaktor ≥ 15 zeigten in einer norwegischen Kohorte eine Reduktion des Risikos um bis zu 18 % (Raimondi et al., 2020).

Paradoxerweise lässt eine Reihe aktueller Studien den Schluss zu, dass eine signifikante Sonnenexposition in einigen Fällen mit einer reduzierten krebsspezifischen Mortalität

assoziiert ist. Dieses auf den ersten Blick widersprüchliche Phänomen wird durch mehrere epidemiologische Untersuchungen bestätigt, die eine inverse Beziehung zwischen Sonnenexposition und Sterblichkeit bei verschiedenen malignen Erkrankungen, darunter Kolon-, Brust-, Prostata- und Ovarialkarzinome, zeigen. (Kricger and Armstrong, 2006; Stevenson et al., 2024; Van Der Rhee et al., 2006) Als zentrale Erklärung wird vor allem die durch UVB-Strahlung stimulierte endogene Bildung von Vitamin D diskutiert, das vielfältige antikarzinogene Eigenschaften besitzt. Darüber hinaus werden auch vitamin-D-unabhängige Mechanismen wie die Freisetzung von Stickstoffmonoxid sowie immunmodulatorische Effekte in Betracht gezogen. (Reichrath, 2020; Van Der Rhee et al., 2006; Weller, 2024)

Groß angelegte Kohortenstudien aus Großbritannien und Skandinavien berichten, dass eine intensivere UV-Exposition mit einer geringeren Gesamt- und krebsspezifischen Sterblichkeit korreliert, wenngleich gleichzeitig das Risiko für Hautkrebserkrankungen ansteigt. (Stevenson et al., 2024; Weller, 2024) Darüber hinaus deutet eine erhöhte Sonnenexposition auf eine günstigere Prognose bei verschiedenen Tumorentitäten hin, was teilweise auf erhöhte Vitamin-D-Spiegel zurückzuführen ist. (Moan et al., 2008) Dennoch kann keine generelle Empfehlung zu verstärkter Sonnenexposition aus der vorliegenden Literatur abgeleitet werden, da damit auch ein erhöhtes Hautkrebsrisiko, insbesondere für das maligne Melanom, einhergeht und die Datenlage zwischen einzelnen Tumorarten weiterhin heterogen ist. (Berwick and Garcia, 2020; Van Der Rhee et al., 2006)

Australische Präventionskampagnen gelten als Vorbild im Bereich der Hautkrebsvermeidung. Multimediale Informationskampagnen, pädagogische Programme sowie politische Interventionen führten dort zu einer messbaren Verhaltensänderung und einem Rückgang der Melanomrate bei Jugendlichen (Green et al., 2011a). Auch der „Call to Action“ des US Surgeon General (2014) betont die Bedeutung umfassender, gesellschaftlich getragener Maßnahmen zur Reduktion der UV-Exposition. (Raimondi et al., 2020)

1.3.2. Lichtdermatosen

Die polymorphe Lichtdermatose (PLD) stellt die am häufigsten auftretende Form der idiopathischen Photodermatose dar. Klinisch manifestiert sich die Erkrankung in Form

einer immunvermittelten Hautreaktion, die sich durch juckende, nicht vernarbende Eruptionen (Papeln, Plaques, seltener Vesikel) äußert. Diese treten typischerweise Stunden bis Tage nach UV-Exposition in sonnenexponierten Arealen auf. Aus pathogenetischer Perspektive wird eine durch UV-Strahlung induzierte, verzögerte Typ-IV-Immunreaktion auf ein bislang nicht genau definiertes Hautantigen angenommen (Karthikeyan and Aishwarya, 2021). In gemäßigten Klimazonen wird insbesondere die UVA-Strahlung als primärer Auslöser photogener Reaktionen erörtert. Im Verlauf des Sommers lässt sich zudem häufig eine zunehmende Lichtgewöhnung der Haut im Sinne eines sogenannten „Hardening“ beobachten. Die PLD betrifft in erster Linie jüngere Frauen und ist weltweit verbreitet. Studien berichten je nach Region Prävalenzraten von etwa 0,5 % bis über 20 % in der Allgemeinbevölkerung (Burfield et al., 2023). Die aktuelle Forschung zeigt, dass durchschnittlich etwa 10 % der Bevölkerung von dieser Form der Hauterkrankung betroffen sind, was bedeutet, dass die PLD etwa 70 % der idiopathischen Photodermatosen ausmacht (Burfield et al., 2023; Karthikeyan and Aishwarya, 2021)

Die Sonnenurtikaria ist definiert als eine seltene, durch UV- oder sichtbares Licht induzierte Form der chronisch induzierbaren Urtikaria. Klinisch manifestiert sich die Photodermatose wenige Minuten nach Lichtexposition mit Erythem, Pruritus, brennendem Gefühl und flüchtigen Quaddeln auf den belichteten Hautarealen. In schwerwiegenden Fällen können systemische Reaktionen bis hin zur Anaphylaxie auftreten. (Harris et al., 2025) Aus pathophysiologischer Perspektive manifestiert sich die Reaktion als eine IgE-vermittelte Soforttypreaktion. UV-A-, UV-B- oder sichtbares Licht induziert die Synthese eines photoaktivierten, körpereigenen Antigens (vermutlich ein Chromophor), das bei sensibilisierten Individuen eine Mastzelldegranulation und die Freisetzung von Histamin auslöst. Die spezifischen Wellenlängen, die eine Reaktion auslösen, variieren individuell und können mithilfe photodiagnostischer Tests ermittelt werden. (McSweeney et al., 2022)

Letztlich lässt sich zusammenfassen, dass Sonnenschutzmittel eine zentrale Basismaßnahme in der Prävention von verschiedenen Photodermatosen darstellt. Erkrankungen wie die polymorphe Lichtdermatose, Urticaria solaris, chronisch aktinische Dermatitis, aktinische Prurigo, Hydroa vacciniforme, erythropoetische Protoporphyririe sowie lichtsensitiver Lupus erythematoses bedingen konsequenten Sonnenschutz. Hierbei können Krankheitsschübe reduziert werden, sowie die Haut vor zusätzlichen Schäden

geschützt werden. (Bajek et al., 2025; Mancuso et al., 2017; Millard and Hawk, 2002; Pellacani et al., 2024a)

1.3.3. Photoaging

Die Alterung der menschlichen Haut ist das Ergebnis eines komplexen Zusammenspiels genetischer Prädispositionen und externer Umweltfaktoren, die als „Exposom“ bezeichnet werden. Dazu zählen sämtliche nicht-genetischen Einflüsse, denen eine Person lebenslang ausgesetzt ist, wie beispielsweise Luftverschmutzung, Ernährung, Stress, Schlafmangel, Temperaturschwankungen und insbesondere Sonnenstrahlung. Der Einfluss dieser Faktoren zeigt sich insbesondere in der sogenannten extrinsischen Hautalterung, die sich vor allem in chronisch sonnenexponierten Arealen durch klinische Zeichen wie tiefe Falten, unregelmäßige Pigmentierung und Lentiginos solares äußert. (Krutmann and Berneburg, 2021; Serpone, 2021)

Ein zentraler Auslöser dieser Form der Hautalterung ist die UV-Strahlung, die DNA-Schäden, sowie mutagene Photoprodukte in der Epidermis induzieren. Auch in tieferen Schichten, wie etwa der Dermis, begünstigt sie dort die Entstehung freier Sauerstoffspezies, welche wiederum oxidativen Stress bedingt und die extrazelluläre Matrix schädigt. Insbesondere der Abbau von Kollagen- und Elastinfasern wird durch diese Prozesse gefördert, was langfristig zur Faltenbildung und zur Entstehung einer Elastose beiträgt. (Serpone, 2021)

Neuere wissenschaftliche Erkenntnisse erweitern diesen Fokus über das UV-Spektrum hinaus. So kann sichtbares Licht, vor allem der blaue Anteil (400–440 nm), in dunkleren Hauttypen eine ausgeprägte, langanhaltende Pigmentierung verursachen. Dieser Effekt wird über die Aktivierung von Opsin-3-Rezeptoren in Melanozyten vermittelt und ist unabhängig von den klassischen, UV-bedingten Mechanismen. Gleichzeitig führt blaues Licht ebenfalls zur Bildung von ROS, wodurch matrixabbauende Enzyme wie Matrixmetalloproteinase-1 (MMP-1) aktiviert werden, welcher einen zellulären Marker extrinsischer Hautalterung darstellt. (vgl. Krutmann et al., 2021)

Auch Infrarot-A-Strahlung (IRA, 770–1200 nm) ist als Faktor der Hautalterung anerkannt. Sie dringt bis in die tiefe Dermis vor, beeinflusst die Aktivität dermalen Fibroblasten und

induziert mitochondriale oxidative Stressantworten. Dies erhöht die Expression von MMP-1 weiter und begünstigt strukturelle Veränderungen in der Dermis (vgl. Krutmann et al., 2021).

Aufgrund dieser Erkenntnisse sollten konkrete Empfehlungen für die dermatologische Prävention gegeben werden: Ein effektiver Lichtschutz sollte nicht nur UVB- und UVA-Komponenten abdecken, sondern auch Schutz vor SL und IRA bieten. Während UV-Filter zuverlässig wirksam sind, ist der Schutz vor sichtbarem Licht und IRA derzeit nur begrenzt etabliert. Getönte Formulierungen mit Eisenoxidpartikeln bieten zwar Schutz gegen sichtbares Licht, werden jedoch aus kosmetischen Gründen nicht immer akzeptiert. IRA kann durch den Einsatz spezifischer Antioxidantien abgeschwächt werden, wenngleich eine standardisierte Wirksamkeitsskala wie der Lichtschutzfaktor bislang fehlt. (Krutmann and Berneburg, 2021)

Zudem zeigen erste Studien, dass sich die biologischen Auswirkungen auf die Haut durch die kombinierte Exposition gegenüber verschiedenen Umweltfaktoren, beispielsweise UVB-Strahlung und Luftverschmutzung, wechselseitig beeinflussen können. So scheinen erhöhte Feinstaubkonzentrationen die UVB-Intensität zu dämpfen, während UVB ihrerseits photochemische Veränderungen an Schadstoffpartikeln induzieren könnte. Auch die synergistische Wirkung unterschiedlicher Sonnenlicht-Komponenten, etwa von UVA1 und sichtbarem Licht, kann die biologischen Effekte auf die Haut verstärken und muss in zukünftigen Schutzstrategien berücksichtigt werden (Krutmann and Berneburg, 2021; Serpone, 2021).

1.3.4. Autoimmunerkrankungen

Autoimmunerkrankungen entstehen durch eine fehlgeleitete Immunantwort gegen körpereigene Strukturen und treten insbesondere in industrialisierten Regionen vermehrt auf. Zu den zentralen Umweltfaktoren, die mit ihrer Pathogenese assoziiert werden, zählen insbesondere UV-Strahlung, aber auch Luftverschmutzung.

UV-Strahlung wirkt immunmodulierend, unter anderem durch die Beeinflussung zahlreicher Zytokine. Nebensächlich kann die dadurch entstehende Förderung der Vitamin-D- und Stickstoffmonoxid-Synthese in Betracht gezogen werden. Ein Mangel an Sonnenlicht, etwa in höheren Breitengraden, korreliert mit einer erhöhten Inzidenz

autoimmuner Erkrankungen wie Multipler Sklerose, Typ-1-Diabetes und chronisch-entzündlichen Darmerkrankungen, was auf einen potenziellen protektiven Effekt der UV-Exposition hinweist.

Relevant für die Entstehung von Autoimmunerkrankungen dürften auch die Luftverschmutzung sein. Feinstaub, Ozon und Stickstoffdioxid beeinträchtigen nicht nur die UVB-Durchlässigkeit, sondern fördern auch systemische Entzündungen, oxidativen Stress und epigenetische Veränderungen mit Relevanz für Autoimmunität (Piovani et al., 2023).

Die Eine Photosensitivität, also eine übersteigerte Entzündungsreaktion der Haut auf UV-Strahlung, findet sich bei kutanen Autoimmunerkrankungen häufig, beispielsweise bei kutanem und systemischem Lupus erythematodes (CLE/SLE) und Dermatomyositis. UV-Strahlung kann hierbei nicht nur kutane Läsionen auslösen, sondern auch systemische Krankheitsschübe triggern. (Dourmishev et al., 2004; Kurz et al., 2024)

Der CLE ist eine Gruppe von autoimmunbedingten Hauterkrankungen, die entweder eigenständig auftreten oder Teil eines SLE sein können. Zu den klinisch relevanten Subtypen zählen insbesondere die chronisch-discoidale Form (CDLE) sowie der subakute kutane Lupus erythematodes (SCLE).

Ein zentraler exogener Triggerfaktor für CLE ist die UV-Strahlung. UV-Exposition führt bei prädisponierten Personen zu einer gesteigerten Apoptose von Keratinozyten, wodurch nukleäre Autoantigene wie DNA oder Ro/SSA-Proteine freigesetzt werden. Diese Antigene können von antigenpräsentierenden Zellen aufgenommen und über nukleäre Sensoren, insbesondere den cGAS-STING-Signalweg, erkannt werden. Dies löst eine ausgeprägte Typ-I-Interferon-Antwort sowie eine lokale entzündliche Immunreaktion in der Haut aus. (Klein and Kunz, 2022; Maz et al., 2022; Skopelja-Gardner et al., 2020)

In der Folge kommt es zur Rekrutierung lymphozytärer Infiltrate und zur Induktion von Autoantikörpern und letztlich zur klinischen Manifestation der Erkrankung in Form erythematöser Plaques (Maz et al., 2022). Wiederholte UV-Exposition kann dabei bestehende Hautveränderungen verschlechtern oder neue Läsionen induzieren (Klein and Kunz, 2022).

Die Effekte von UV-Strahlung auf das Immunsystem sind jedoch ambivalent: Einerseits wirkt sie immunmodulierend und sogar immunsuppressiv, etwa durch UVB-induzierte DNA-Schäden in Keratinozyten, die eine kontrollierte Apoptose und Freisetzung nukleärer Antigene auslösen. Zugleich setzen bestrahlte Hautzellen entzündungsfördernde Zytokine wie IL-1 und TNF- α frei, was die Rekrutierung von Immunzellen unterstützt (Maverakis et al., 2010).

Bei wiederholter Exposition überwiegen jedoch meist tolerogene Prozesse, darunter die Induktion regulatorischer T-Zellen und eine verminderte Aktivität von T-Effektorzellen, was therapeutisch in der Phototherapie (z. B. bei Psoriasis) genutzt wird (Hofmann et al., 2024). Bei genetischer Prädisposition, etwa Mutationen in nukleären DNA-Abbauenzymen wie TREX1, kann die gleiche UV-Exposition allerdings pathologische Immunreaktionen hervorrufen. Dies ist ein möglicher Mechanismus der ausgeprägten Photosensitivität mancher Lupus-Patienten. (Kurz et al., 2024)

Letztlich hängt die immunologische Wirkung von UV-Licht von verschiedenen Faktoren ab: Wellenlänge, Bestrahlungsdosis, genetische Veranlagung sowie immunologische Vorerkrankungen modulieren das Gleichgewicht zwischen tolerogenen und immunogenen Reaktionen. (Hofmann et al., 2024)

1.3.5. Augenerkrankungen

Es ist belegt, dass ultraviolette Strahlung akute Augenerkrankungen wie UV-Keratitis (auch als Photokeratitis oder Schneeblindheit bekannt) sowie chronische Erkrankungen des Auges verursachen kann, darunter Katarakt, Pterygium, Pinguecula und die sogenannte klimatische Tropfenkeratopathie. Der Schutz der Augen vor UV-Strahlen ist prinzipiell durch das Tragen von Sonnenbrillen, insbesondere mit UV-blockierenden Gläsern oder entsprechenden Kontaktlinsen, sowie durch das Verwenden von Kopfbedeckungen oder Schatten spendenden Objekten wie Sonnenschirmen möglich. Dennoch greifen nur wenige Menschen aktiv zu solchen Schutzmaßnahmen, was möglicherweise auf ein geringes Bewusstsein für die damit verbundenen Gesundheitsrisiken zurückzuführen ist. Im Gegensatz dazu sind die Auswirkungen von UV-Strahlung auf die Haut, darunter Sonnenbrand, eine beschleunigte Hautalterung mit Faltenbildung und

Pigmentveränderungen sowie das Risiko für Hautkrebs, allgemein bekannt, weshalb präventive Schutzmaßnahmen wesentlich häufiger Anwendung finden. (Neale et al., 2023)

1.4. Grundlagen des Sonnenschutzes

1.4.1. Definition

Sonnenschutzmittel sind topisch anzuwendende Präparate, die spezielle UV-Filter enthalten und dem Schutz der Haut vor den schädlichen Wirkungen ultravioletter Strahlung dienen. Es konnte in einer Vielzahl von Studien nachgewiesen werden, dass sie einen signifikanten Beitrag zur Prävention sonnenbedingter Hautschäden leisten können. Dazu zählen Sonnenbrand, vorzeitige Hautalterung und ein erhöhtes Risiko für Hautkrebs.

In Anbetracht dessen wird eine zielgerichtete und konsequente Anwendung entsprechender Produkte empfohlen. Neben allgemeinen Maßnahmen zur Lichtvermeidung stellt der regelmäßige Gebrauch von Sonnenschutzmitteln eine zentrale Strategie zur Prävention strahleninduzierter Hautschäden dar.

Der Markt für Sonnenschutzprodukte hat in den letzten Jahren eine signifikante Entwicklung erfahren, die eine fundierte Kenntnis über deren Zusammensetzung, Wirksamkeit und sachgerechte Anwendung sowohl für medizinisches Fachpersonal als auch für Konsument:innen erfordert. (Salih et al., 2024)

1.4.2. Grundlegende Funktionsweise

Es existieren diverse Arten von Sonnenschutzmitteln, die sich in organische (chemische) und anorganische (physikalische) Substanzen sowie unterschiedliche Darreichungsformen unterteilen lassen. (Burshtein et al., 2024) Organische Filter sind in der Lage, die UV-Strahlung aufzunehmen, sie in Wärme zu transformieren und diese anschließend in unschädlicher Form an die Umgebung weiterzuleiten. Diese Substanzen sind kohlenstoffbasiert, was nicht mit "natürlich" oder "biologisch abbaubar" gleichzusetzen ist. Anorganische Filter, wie beispielsweise Zinkoxid (ZnO) und Titandioxid (TiO₂), wirken insbesondere durch Reflektion und Streuung des Lichts und bilden dabei eine sichtbare physikalische Schutzbarriere auf der Haut. Aufgrund ihrer Teilchengröße und weißlicher Farbe auf der Haut werden sie jedoch oft als kosmetisch weniger attraktiv wahrgenommen.

Moderne Produkte nutzen die Technologie der Mikronisierung oder Nanopartikulation dieser Filter, wodurch eine ästhetische Verbesserung des Erscheinungsbildes erzielt wird. Es ist jedoch zu bedenken, dass die Schutzwirkung gegenüber sichtbarem Licht durch die Verkleinerung der Partikel abnehmen kann. In mikronisierter Form ähneln anorganische Filter in ihrer Wirkweise zunehmend organischen Substanzen, da sie UV-Strahlung nun ebenfalls in erster Linie absorbieren. (Salih et al., 2024)

1.4.3. Bedeutung des Lichtschutzfaktors und UVA-Rating Systeme

Die zunehmende Verfügbarkeit von Sonnenschutzprodukten im Laufe des 20. Jahrhunderts führte zur Notwendigkeit, deren Schutzwirkung systematisch zu bewerten. Der Chemiker Rudolf Schulze entwickelte ein erstes Verfahren zur Quantifizierung der Wirksamkeit von UV-Schutz, welches später vom österreichischen Chemiker Franz Greiter, dem Gründer der Marke Piz Buin, aufgegriffen und weiterentwickelt wurde. Im Jahr 1978 erfolgte die Einführung des heute international etablierten Lichtschutzfaktors durch Greiter. (Salih et al., 2024) Die FDA beschreibt den LSF als Verhältnis der minimalen Erythemdosis (MED) auf mit Sonnenschutzmittel behandelter Haut zu derjenigen auf unbehandelter Haut. (V Shimon et al., 2023) Gemäß dieser Annahme bedeutet ein Lichtschutzfaktor von 30, dass die Haut 30-mal länger UVB-Strahlung ausgesetzt sein kann, bevor ein Sonnenbrand entsteht, verglichen mit ungeschützter Haut. (Salih et al., 2024) Der American Academy of Dermatology (AAD) zufolge wird durch die korrekte Anwendung eines Sonnenschutzmittels mit einem Lichtschutzfaktor von 30 eine Blockade von circa 97 Prozent der UVB-Strahlung erreicht. (V Shimon et al., 2023)

Obwohl ein höherer Lichtschutzfaktor nicht automatisch einen proportional besseren Schutz garantiert, zeigen mehrere Studien, dass Sonnenschutzmittel mit sehr hohen LSF-Werten (≥ 70) insbesondere bei unzureichender Applikationsmenge einen praktischen Vorteil für Konsument:innen bieten können. (V Shimon et al., 2023) Eine prospektive Studie konnte zudem zeigen, dass SPF100 (sun protection factor 100) nicht nur eine gute Verträglichkeit im Alltag aufweist, sondern auch eine signifikante Reduktion von UV-induziertem Erythem ermöglicht. (Naseer et al., 2024) In einer randomisierten Split-Face-Feldstudie wurde nachgewiesen, dass bei einer Sonnenexposition von sechs Stunden 55 % der mit Sonnenschutzfaktor 50+ behandelten Hautbereiche eine erhöhte UV-Belastung aufwiesen, während dies bei Sonnenschutzfaktor 100+ nur bei 5 % der Fälle zutraf. Auch

die Erythemwerte waren signifikant geringer. (Williams et al., 2018) Diese Resultate wurden in einer weiteren Studie unter intensiver UV-Strahlung bestätigt, in der SPF100+ das Sonnenbrandrisiko effektiver senkte als SPF50+. (Kohli et al., 2020) Der Vorteil von SPF100+ ist somit unter realen Anwendungsbedingungen nachweisbar, wenn auch nicht exponentiell: Der zusätzliche Schutz gegenüber SPF50+ entspricht etwa 1 % mehr UVB-Filterung. (Williams et al., 2018)

Neben dem UVB-Schutz existieren etablierte Systeme zur Bewertung der UVA-Schutzwirkung. Ein Beispiel ist ein im Jahr 1992 von der Firma Boots in Zusammenarbeit mit der Universität Newcastle entwickeltes Produkt, welches ein Sterne-System nutzt, bei dem eine größere Anzahl an Sternen für einen höheren UVA-Schutz steht. Ein weiteres europäisches Kennzeichnungssystem wurde von der Verbraucherorganisation Colipa (heute Cosmetics Europe) entwickelt. Gemäß den geltenden Bestimmungen ist es Produkten gestattet, das "UVA im Kreis"-Symbol auf der Verpackung zu führen, sofern das Verhältnis von UVA- zu UVB-Schutz mindestens 1:3 beträgt. Diese Angabe ermöglicht es Verbraucher:innen, den Breitbandschutz eines Produkts zu bewerten.

Ein weiteres Verfahren zur Bewertung des UVA-Schutzes ist die sogenannte "Persistent Pigment Darkening" (PPD)-Methode. Diese Methode misst, in welchem Ausmaß UVA-Strahlen mit und ohne Sonnenschutz eine anhaltende Hautpigmentierung auslösen. Im Rahmen dessen wird die minimal erforderliche UVA-Dosis ermittelt, die eine Pigmentveränderung hervorruft, sowie das Verhältnis zwischen geschützter und ungeschützter Haut bestimmt. Es ist jedoch zu beachten, dass solche Pigmentierungen nicht ausschließlich durch UV-induzierte Melanogenese, sondern auch durch oxidativen Stress ausgelöst werden können.

In Asien, insbesondere in Japan, hat sich zusätzlich das PA-System (Protection Grade of UVA) etabliert, bei dem durch ein bis vier "+"-Zeichen die Stärke des UVA-Schutzes angegeben wird: von PA+ (niedriger Schutz) bis hin zu PA++++ (sehr hoher Schutz). (Salih et al., 2024)

1.4.4. Rechtliche Rahmenbedingungen

Gemäß der EU-Kosmetikverordnung (EG Nr. 1223/2009) ist die Verwendung des Begriffs "SPF 50+" für Sonnenschutzmittel in der Europäischen Union (EU) auf maximal "SPF 50+" beschränkt. Die vorliegende Regelung findet ihre primäre Justierung im Verbraucherschutz und fußt auf zwei fundamentalen Aspekten: Einerseits ist die zusätzliche Schutzwirkung oberhalb von SPF50 nur marginal erhöht, andererseits weisen die standardisierten Prüfverfahren (ISO24444) gerade bei sehr hohen SPF-Werten eine signifikante Messvariabilität auf. Die vorliegende Untersuchung kommt zu dem Schluss, dass Produkte, die mit einem Lichtschutzfaktor von 80 oder 100 deklariert sind, je nach Laboratoriumsanalyse einen Lichtschutzfaktor von 60 bis 100 aufweisen können. Dies erschwert die Vergleichbarkeit und Transparenz für Verbraucher:innen. Die Verwendung der einheitlichen Kennzeichnung "50+" zielt darauf ab, übermäßige Erwartungen an einen "vollständigen Schutz" zu minimieren und den Produktauswahlprozess zu vereinfachen.

Des Weiteren ist die Verwendung irreführender Begriffe wie "Sonnenblocker" oder Formulierungen, die einen vollständigen UV-Schutz suggerieren, nicht mehr zulässig. Der Hintergrund dieser Maßnahme ist, dass die Verwendung solcher Bezeichnungen bei Verbraucher:innen den fälschlichen Eindruck erwecken könnte, Sonnenschutzmittel böten eine absolute Abschirmung vor UV-Strahlung. Es ist evident, dass kein Erzeugnis einen vollständigen Schutz gewährleisten kann. Stattdessen schreibt die Verordnung standardisierte SPF-Kategorien (niedrig, mittel, hoch, sehr hoch) und eine klare Angabe des Lichtschutzfaktors (z. B. 30, 50 oder 50+) vor. Die vorliegende Maßnahme zielt darauf ab, die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Produkten zu erhöhen und das Bewusstsein dafür zu fördern, dass trotz der Anwendung von Sonnenschutzmitteln ergänzende Schutzmaßnahmen, wie beispielsweise Schatten oder Kleidung, weiterhin erforderlich bleiben. (Bacardit, 2023)

In den Vereinigten Staaten von Amerika hingegen werden Sonnenschutzmittel gemäß der FDA als Over-The-Counter (OTC)-Arzneimittel klassifiziert, was strengere Zulassungsverfahren bedingt. Im Jahr 2019 präsentierte die FDA einen überarbeiteten Regelungsentwurf, in dem unter anderem eine maximale SPF-Kennzeichnung von 60+ vorgeschlagen wird, obwohl Produkte bis SPF 100 weiterhin erhältlich sind. Dies resultiert

in der Tatsache, dass trotz der technischen Möglichkeit Formulierungen mit nur wenigen zugelassenen UV-Filtern auf den Markt kommen. Moderne Filter, wie sie in Europa verfügbar sind, sind häufig nicht vertreten. (Sabzevari et al., 2021)

1.4.5. Inhaltsstoffe im Überblick

Die zuvor erwähnten Unterschiede in der regulatorischen Einordnung in den jeweiligen Märkten spiegeln sich unmittelbar in der Anzahl zugelassener UV-Filter wider. Während in Europa 29 verschiedene Filter zum Einsatz kommen, ist in den USA die Verwendung von lediglich 17 UV-Filtern. Gemäß der Klassifikation der FDA werden Sonnenschutzfilter des Weiteren in drei Kategorien unterteilt: Kategorie I ("generell als sicher und wirksam anerkannt"/ "Generally Recognized as Safe and Effective", GRASE), II (nicht GRASE) und III (unzureichende Datenlage).

Es existieren jedoch unterschiedliche regulatorische Rahmenbedingungen auf globaler Ebene, die von der Klassifizierung von Sonnenschutzprodukten als Kosmetika oder Arzneimittel abhängen. Diese Unterschiede sind insbesondere in den Regionen Asien, Australien, Südamerika und Afrika erkennbar. (Salih et al., 2024)

Tabelle 1: UV-Strahlenfilter

Filter		INCI/anderer Name	Erstmals verfügbar	Zugelassen von	Hauptbedenken
Organisch	UVA	Meradimat	1970	FDA	-
		Oxybenzon	1978	EU, FDA, auf Hawaii verboten	Photokarzinogen, hormonelle Störungen, Bildung freier Radikale, wird von der Haut aufgenommen, Nachweis in Muttermilch
		Avobenzon	1988	EU, FDA	Photoinstabil, allergische Kontaktdermatitis
		Emcamsule	1997	EU	-
			2006	EU, NDA	-
		Neo Heliopan AP	2000	EU	Allergische Kontaktdermatitis

		Uvinul A Plus	Diethylamin-Hydroxybenzoyl-Hexylbenzoat	2005	EU	-
		Mexoryl 400	Methoxypropyl-aminocyclohexyliden-Ethoxyethylcyanoacetat	2020	EU	Wird von der Haut aufgenommen
		Piperazin	Bis-(Diethyl-aminohydroxy-benzoylbenzyl)-Piperazin	2021	EU	-
	UVB	PABA	Para-Aminobenzoensäure	1949	Kategorie II (nicht GRASE) laut FDA	Allergische Kontaktdermatitis, kann UVR-Schäden verstärken, färbt Kleidung
		Cinoxat	2-Ethoxyethyl-p-Methoxycinnamat	1961	FDA	Allergische Kontaktdermatitis
		Octisalate	Ethylhexylsalicylat, Octylsalicylat	1978	EU, FDA	Photoinstabil
		Homosalat	Homomenthyl-salicylat	1978	EU, FDA	Photoinstabil, wird von der Haut aufgenommen, hormonelle Störungen, Nachweis in Muttermilch
		Padimat O	Ethylhexyl-Dimethyl-PABA, OD-PABA	1988	EU, FDA	Kann indirekt DNA-Schäden verursachen
		Univul N539	Octocrylen	1991	EU, FDA	Wird von der Haut aufgenommen, Nachweis in Muttermilch, Bildung freier Radikale
		Octinoxat	Ethylhexyl-methoxycinnamat, Octylmethoxy-Cinnamat	1991	EU, FDA, auf Hawaii verboten	Korallenriff-schädlich, wird von der Haut aufgenommen, photoinstabil, hormonelle Störungen, Nachweis in Muttermilch
		Octyltriazon	Ethylhexyltriazon	1997	EU	-
		Univul P25	Ethoxyliertes Ethyl-4-Aminobenzoat	1997	EU	-
		Univul T150	Ethylhexyltriazon, Octyltriazon	1997	EU	-
		Amixolat	Isoamyl-p-Methoxycinnamat	1997	EU	-
		Enzacamen	4-Methylbenzyliden-Campher	1998	EU	Östrogen-Effekte
		Mexoryl SL	Benzyliden-Campher-	1998	EU	Wird von der

			Sulfonsäure			Haut aufgenommen
		Trolamin-Salicylat	Triethanolamin-Salicylat	1999	FDA, Kategorie II (nicht GRASE)	Wird von der Haut aufgenommen
		Parsol SLX	Polysilicone-15, Dimethicone Diethylbenzylmalonat	1999	EU	-
		Ensulizol	Phenylbenzimidazolsulfonsäure	1999	EU, FDA	-
		Suliso-benzon-Natrium	Benzophenon-5	1999	EU	-
		Mexoryl SO	Campher-Benzalkonium-Methosulfat	2006	EU	Wird von der Haut aufgenommen
		Univul 400	Benzophenon-1	-	-	Zusammenhang mit Brust-, Eierstock- und Prostatakrebs, passiert die Plazentaschranke, hormonelle Störungen
	Breitbandfilter	Suliso-benzon	Benzophenon-4	1964	FDA	Wird von der Haut aufgenommen
		Dioxy-benzol	Benzophenon-8	1966	FDA	-
		Isoco-trizinol	Uvasorb HEB, Diethylhexyl Butamido Triazon	1998	EU	-
		Biscotrizol	Tinosorb M, Methylene-Bis-Benzotriazolyl-Tetramethylbutyl-Phenol	2000	EU	Photoinstabil
		Bemtrizinol	Tinosorb S, Bis-Ethylhexyloxyphenol Methoxyphenyl Triazin	2000	EU	-
		Tinosorb A2B	Tris-Biphenyl-Triazin	2014	EU	-
		TriAsorb	Phenylene-Bis-Diphenyltriazine	2019	EU	-
Anorganisch	UVB und kürzere UVA-Wellenlängen (320-340 nm)	Titandioxid	TiO ₂	1990	EU, FDA	Weißer Film, kann Hautunreinheiten verursachen
	Breitband	Zinkoxid	ZnO	1990	EU, FDA	Weißer Film

Abkürzungen: EU, Europäische Union; FDA, Food and Drug Administration (Lebensmittel- und Arzneimittelbehörde); GRASE, allgemein als sicher und wirksam anerkannt (Generally Recognized as Safe and Efficient); INCI, Internationale Nomenklatur für kosmetische Inhaltsstoffe (International Nomenclature of Cosmetic Ingredients); NDA,

Antrag auf Zulassung eines neuen Arzneimittels bei der FDA (New Drug Application); UVR, ultraviolette Strahlung (Ultraviolet Radiation). Quelle: (Salih et al., 2024)

1.4.6. Die richtige Anwendung und Darreichungsform

Sonnenschutzmittel sind in unterschiedlichen Darreichungsformen erhältlich, etwa als Cremes, Lotionen, Sprays oder Stifte. Zudem sind sie zunehmend auch in Alltagskosmetik wie Tagescremes, Foundations oder Lippenpflegestiften enthalten. (Salih et al., 2024) Im Allgemeinen wird zwischen primären Sonnenschutzprodukten, deren vorrangige Funktion im Schutz vor UV-Strahlung besteht, und sekundären Sonnenschutzprodukten, die neben UV-Filtern weitere kosmetische Funktionen erfüllen, unterschieden. (Krutmann et al., 2021)

Der auf den Produkten angegebene Lichtschutzfaktor basiert auf einer standardisierten Auftragsmenge von 2 mg/cm^2 . Um diesen Wert bei Ganzkörperanwendung zu erreichen, wären etwa 33 ml erforderlich, was etwa 7 Teelöffel entspricht. (Salih et al., 2024) In der Praxis liegt die Aufnahmemenge jedoch deutlich unterhalb dieser Schwelle, bei durchschnittlich $0,5 \text{ } \mu\text{g/cm}^2$, was zu einer signifikanten Reduktion der tatsächlichen Schutzwirkung führt. So sinkt beispielsweise der effektive Schutz eines SPF50-Produkts auf etwa SPF26, bei SPF100 auf etwa SPF55. Diese Hypothese wurde in einer Feldstudie bestätigt, in der Proband:innen an einem Arm SPF100 und am anderen Arm SPF50 auftrugen. Die SPF50-Seite wies signifikant stärkere Rötungen und UV-induzierte Erytheme auf. (Bennett and Khachemoune, 2022)

Für einen bestmöglichen Schutz wird empfohlen, Sonnenschutzmittel etwa 15 bis 30 Minuten vor der Sonnenexposition aufzutragen und die Anwendung nach weiteren 15 bis 30 Minuten zu wiederholen, damit eine ausreichend dicke Schutzschicht entsteht. In der Folge wird zu einer Reapplikation im zweistündigen Rhythmus angeraten, insbesondere nach Phasen von starken Schwitzen, Schwimmen oder Abtrocknen. Darüber hinaus werden bestimmte Körperpartien, wie etwa Ohren, Hals und Schläfen, unzureichend geschützt.

Hinsichtlich der Haltbarkeit ist festzustellen, dass in Europa oder Australien keine gesetzlich vorgeschriebene Kennzeichnungspflicht für das Verfallsdatum besteht. Die

Fachliteratur empfiehlt jedoch eine Verwendung innerhalb von drei Jahren für nicht geöffnete Produkte, wenn nicht anders beschrieben. (Salih et al., 2024)

Die AAD empfiehlt die Nutzung von Sonnenschutzmitteln mit einem Lichtschutzfaktor von mindestens 30, um einen wirksamen Schutz vor UV-Strahlung sicherzustellen. (V Shimon et al., 2023). Darüber hinaus empfiehlt der britische Gesundheitsbehörde NHS eine UVA-Bewertung von mindestens vier Sternen, insbesondere in den Monaten März bis Oktober. Es ist von essentieller Bedeutung, Sonnenschutzmittel nicht als Freifahrtschein für ausgedehnte Aufenthalte in der Sonne zu interpretieren. Vielmehr sollten sie als Elemente eines umfassenden Schutzkonzepts betrachtet werden, das auch Schatten und schützende Kleidung umfasst. (Salih et al., 2024)

Um unter realen Bedingungen dennoch eine adäquate Photoprotektion zu erreichen, kann der Einsatz von Sonnenschutzmitteln mit einem Lichtschutzfaktor über 50 sinnvoll sein. (Bennett and Khachemoune, 2022)

1.4.7. Sonnenschutzkleidung

Neben Sonnenschutzmitteln stellt auch die Verwendung adäquater Kleidung eine wirksame Maßnahme zur Reduktion der UV-Exposition dar. Insbesondere breitkrempige Hüte, welche empfindliche Areale wie Gesicht, Ohren und Nacken abschirmen, sind zu empfehlen. Der Schutzmechanismus der Textilien erfolgt durch Absorption oder Reflexion der UV-Strahlung. Die Schutzleistung der Textilien wird anhand des Ultraviolet Protection Factor (UPF) quantifiziert. Ein UPF von 15 beispielsweise bedeutet, dass lediglich etwa 6,7 % der UV-Strahlung die Haut erreichen. Dabei spielen Faktoren wie Materialdichte und Farbpigmentierung eine entscheidende Rolle, wobei insbesondere dunkle, synthetische Stoffe, insbesondere Polyester, eine bemerkenswerte Schutzwirkung aufweisen. (Lu and Ilyas, 2022; Salih et al., 2024)

Spezielle UV-Schutztextilien, die auf hohen Tragekomfort und effektiven Schutz ausgelegt sind, verfügen über atmungsaktive Eigenschaften und feuchtigkeitssableitende Fasern. In den USA unterliegen derartige Produkte strengen Prüfprotokollen, welche etwa den Einfluss von Waschzyklen, Reibung und chlorhaltigem Wasser auf die Schutzwirkung evaluieren. Die potenzielle Beeinträchtigung der Gewebestruktur durch Waschen ist dabei

besonders kritisch zu betrachten, da dies den UPF-Wert negativ beeinflussen kann. (Salih et al., 2024) Der sogenannte Garment Protection Factor (GPF) stellt eine Weiterentwicklung dar, die es ermöglicht, den bedeckten Hautflächenanteil zu berücksichtigen. Dadurch wird eine realitätsnähere Risikobewertung ermöglicht. (Lu and Ilyas, 2022)

Untersuchungen zu Melanompatient:innen legen nahe, dass diese nach Diagnosestellung tendenziell häufiger schützende Kleidung, Schatten und Sonnenschutzmittel verwenden. Es konnte gezeigt werden, dass das konsequente Meiden der Sonne sowie das Tragen langärmeliger Kleidung eine signifikant schützende Wirkung haben. (Patel and Chien, 2021). In diesem Kontext wird die Kombination aus Schutzkleidung und Sonnenschutzmitteln für unbedeckte Areale als besonders effektiv erachtet. Obwohl chemische Waschzusätze wie „Rit Sun Guard“ existieren, ist ihre Schutzleistung noch nicht abschließend wissenschaftlich belegt. Aufgrund potenzieller Risiken durch bestimmte Inhaltsstoffe, analog zu Flammschutzmitteln in Funktionskleidung, wird vermehrt Transparenz und Forschung gefordert (Lu and Ilyas, 2022).

1.4.8 UV-Sticker

UV-Sticker sind ein innovatives Hilfsmittel, welches direkt auf die Haut geklebt wird und dazu dient, die persönliche Belastung durch ultraviolette Strahlung sichtbar zu machen. Die Technologie basiert auf lichtempfindlichen Farbstoffen oder Sensoren, die ihre Farbe bei UV-Exposition ändern. Diese visuelle Rückmeldung dient dazu, die bereits erfolgte Bestrahlung der Haut zu dokumentieren und den/die Anwender:innen dazu zu ermahnen, Sonnenschutzmittel nachzutragen oder den Aufenthalt in der Sonne zu limitieren.

Untersuchungen belegen, dass der Einsatz solcher UV-Indikatorpflaster die Wahrscheinlichkeit erhöht, Sonnenschutzmittel korrekt und in ausreichenden Abständen erneut aufzutragen. Insbesondere in Regionen oder Situationen mit hoher UV-Belastung hat sich dieser Effekt als signifikant erwiesen. Die Farbumschläge können entweder direkt mit dem Auge erkannt oder zusätzlich über Smartphone-Applikationen erfasst und quantifiziert werden. Dadurch ist eine präzisere Bestimmung der individuellen UV-Dosis möglich.

UV-Sticker sind demnach ein praktisches Präventionsinstrument, um ein optimiertes Sonnenschutzverhalten zu fördern und UV-induzierte Hautschäden zu reduzieren. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass diese Maßnahmen lediglich eine ergänzende Funktion erfüllen und keinesfalls den konsequenten Gebrauch von Sonnenschutzmitteln oder andere Schutzstrategien, wie etwa Kleidung oder der Aufenthalt im Schatten, ersetzen können. (Hacker et al., 2019; Shi et al., 2018)

1.5. Sonnenschutz im Wandel: Entwicklungen und Kontroversen

Sonnenschutzmittel werden seit Jahrzehnten als zentrale Maßnahme zur Prävention von Hautschädigungen angesehen. Trotz ihrer weiten Verbreitung bestehen weiterhin Unsicherheiten bezüglich der Sicherheit bestimmter Inhaltsstoffe, insbesondere im Hinblick auf deren systemische Aufnahme und langfristige Auswirkungen. (Adler, 2024)

Ein zunehmender Forschungsschwerpunkt betrifft die Rolle sichtbaren Lichts, das insbesondere in Kombination mit UVA1 bei dunkleren Hauttypen zu einer verstärkten Pigmentierung führen kann. Bei Personen mit hellerem Hauttyp treten vermehrt Erytheme auf, was auf eine individuelle Photoprotektion je nach Hauttyp hinweist.

Ein wesentlicher Mangel vieler konventioneller Sonnenschutzformulierungen besteht in der unzureichenden Abdeckung des langwelligen UVA1-Spektrums. Das Konzept der "Spektralen Homöostase" bildet die Grundlage für die Schutzwirkung durch Eisenoxide, pigmentiertes TiO₂ und Antioxidantien, die eine gleichmäßige Absorption von UVB, UVA, sichtbaren Lichtwellenlängen und IR-Strahlung gewährleisten soll. Eine angepasste Formulierung für unterschiedliche Hauttöne ist dabei von essenzieller Bedeutung.

Innovative Filter, wie beispielsweise TriAsorB™ (Phenylene Bis-Diphenyltriazine), welches von der Scientific Committee on Consumer Safety (SCCS) bis 5 % als unbedenklich eingestuft wird, bieten Schutz vor UVB/UVA-Strahlung sowie im sichtbaren Bereich bis zu einer Wellenlänge von 450 nm. Es liegen Studien vor, die einen zusätzlichen schützenden Effekt gegen UV-Strahlung belegen, der durch die Kombination mit Breitbandfiltern wie Tinosorb® S sowie mit Antioxidantien erzielt wird. Darüber hinaus konnte Mexoryl® 400 (MCE) als ein weiterer Fortschritt identifiziert werden. Es bietet einen Schutz bis 400 nm und verringert laut Studien UVA1-bedingte

Zellveränderungen. Es konnte festgestellt werden, dass insbesondere Hauttypen III–IV von dieser Eigenschaft profitieren. Der Filter HAA299 (BDBP) deckt ein Spektrum von 350–425 nm ab und ist ebenfalls bis 10 % zugelassen. Dieser ist in Nanoform jedoch nur für nicht-inhalierbare Anwendungen geeignet. (Pellacani et al., 2024b)

Die zunehmende Integration von Nanopartikeln, wie beispielsweise nano-TiO₂ oder nano-ZnO, in Sonnenschutzprodukten erfordert verstärkte toxikologische Bewertungen. Obwohl die Hornschicht eine effektive Barriere gegen deren Penetration darstellt, ist unklar, ob bei geschädigter Haut eine erhöhte Aufnahme erfolgt. Die bisher vorliegenden Daten liefern hierzu keine eindeutigen Belege. (Burnett and Wang, 2011) Gleichzeitig mehren sich Berichte über allergische Reaktionen, insbesondere bei lichtsensibilisierten Personen. Es konnte in diversen Studien nachgewiesen werden, dass UV-Filter, zu denen Avobenzon, Benzophenone und Cinnamate zählen, ein potenziell allergieauslösendes Potenzial aufweisen. Darüber hinaus besteht der Verdacht, dass einige Substanzen, wie Benzophenon-3 (Oxybenzon), endokrine Effekte auslösen können, wie in Tiermodellen nachgewiesen wurde. Die Übertragbarkeit dieser Effekte auf den Menschen ist jedoch bislang nicht abschließend geklärt und bedarf weiterer Forschung. (Pellacani et al., 2024b)

2. Material und Methoden

2.1. Ziel der Diplomarbeit

Diese Arbeit verfolgt das Ziel, eine detaillierte Analyse zur Entwicklung und Wirksamkeit moderner Sonnenschutzmittel auf Basis aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse vorzunehmen. Im Fokus der Untersuchung stehen dabei nicht nur deren photoprotektive Eigenschaften und gesundheitliche Relevanz, sondern auch toxikologische, umweltbezogene und gesellschaftliche Aspekte. Darüber hinaus sollen weitverbreitete Mythen rund um das Thema Sonnenschutz einer kritischen Beleuchtung unterzogen werden. Zudem ist vorgesehen, neue Konzepte, wie biologische Sonnenschutzmittel und die Wirkung auf das Mikrobiom, in den wissenschaftlichen Kontext einzuordnen. Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur dermatologischen Aufklärung und zukünftigen Forschungsperspektiven im Bereich der Photoprotektion.

2.2. Auswahl und Analyse der verwendeten Datenquellen und Fachliteratur

Die vorliegende Arbeit fußt auf einem umfassenden Literaturreview, das sich methodisch an einem narrativen Ansatz orientiert. Die Recherche wurde schwerpunktmäßig über die wissenschaftlichen Datenbanken PubMed, Google Scholar und die elektronische Bibliothek der Medizinischen Universität Graz durchgeführt. Im Zuge dessen wurden spezifische Schlagwörter wie "Sunscreen", "UV Radiation" und "Photoprotection" verwendet, die durch relevante thematische Begriffe wie "Skin Cancer", „Controversies“ "Myths" oder „Innovation“ ergänzt wurden. Zur gezielten Ergebnisoptimierung wurden Boolesche Operatoren (AND, OR, NOT) verwendet.

Der Fokus der Analyse wurde auf Publikationen der letzten fünf Jahre (2020–2025) gelegt, um eine adäquate Abbildung aktueller Entwicklungen zu gewährleisten. Bei der Analyse wurde selektiv auf ältere Literatur zurückgegriffen, insbesondere im historischen Kontext und ältere relevante Studien.

2.3. Methodischer Ansatz zur Untersuchung der Thematik

Als geeigneter methodischer Zugang wurde ein narratives Literaturreview gewählt. Im Gegensatz zu systematischen Reviews nach PRISMA oder Cochrane-Richtlinien zeichnet sich dieser Ansatz durch seine Flexibilität und Kontextbezogenheit hinsichtlich der Aufarbeitung interdisziplinärer Themen aus. Das Ziel besteht darin, den Forschungsstand entlang inhaltlicher Schwerpunkte zu strukturieren, einer kritischen Bewertung zu unterziehen und in Bezug zu aktuellen wissenschaftlichen, regulatorischen und gesellschaftlichen Entwicklungen zu setzen.

Die Analyse wurde mittels einer qualitativen Inhaltsauswertung durchgeführt, die durch eine thematische Zuordnung der Quellen ergänzt wurde. Im Rahmen der Auswahl der Studien wurden diese nach verschiedenen Kriterien wie Relevanz, Aktualität, wissenschaftlicher Qualität und Kontext bewertet. Berücksichtigt wurden insbesondere Originalarbeiten, Reviews, Leitlinien sowie regulatorische und toxikologische Stellungnahmen nationaler und internationaler Fachgesellschaften.

2.4. Grenzen und Limitationen der angewandten Methodik

Die gewählte narrative Methodik erlaubt eine breite thematische Darstellung, birgt jedoch inhärente Einschränkungen hinsichtlich der Systematik und Vergleichbarkeit. Es besteht das Risiko einer subjektiven Selektion und Interpretation der Literatur. Der bewusste Verzicht auf standardisierte Qualitätsbewertungsinstrumente (z. B. PRISMA) hat eine Einschränkung der Reproduzierbarkeit und Objektivierbarkeit zur Folge.

Zudem wurde keine quantitative Metaanalyse durchgeführt, sodass keine statistische Gewichtung einzelner Studienergebnisse vorgenommen werden konnte. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass relevante Studien aufgrund von Einschränkungen der Suchstrategie oder der Datenbankverfügbarkeit übersehen wurden.

Trotz dieser Limitationen bietet der gewählte Zugang die Möglichkeit, ein vielschichtiges Thema unter Berücksichtigung medizinischer, toxikologischer, ökologischer und soziokultureller Aspekte integrativ zu beleuchten. Dies ist ein Anspruch, der bei einem interdisziplinären Thema wie dem Sonnenschutz von zentraler Bedeutung ist.

3. Ergebnisse

3.1. Fortschritte und Herausforderungen im Bereich der Inhaltsstoffe

Die wesentlichen Herausforderungen, die mit in Sonnenschutzmitteln enthaltenen UV-Filtern verbunden sind, betreffen ihre Photoinstabilität, potenzielle Auswirkungen auf die Umwelt sowie mögliche gesundheitliche Risiken für den Menschen. Diese Aspekte sind von zentraler Relevanz für die Entwicklung neuer, wirksamerer und sichererer photoprotektiver Wirkstoffe.

Einige konventionelle UV-Filter wie 4-MBC gelten trotz Isomerisierungen als relativ stabil, während andere (etwa Avobenzon oder EHMC) unter UV-Strahlung zu instabilen Abbauprodukten neigen, was die Schutzwirkung beeinträchtigt. Avobenzon weist eine hohe Photolabilität durch Keto-Enol-Isomerisierung und Radikalbildung auf. Auch Octocrylen steht im Verdacht, durch photochemische Reaktionen Benzophenon-Derivate zu bilden, die potenziell toxisch sind.

Zur Optimierung der Stabilität wurden diverse Strategien konzipiert. Hierzu zählen der Einsatz von Antioxidantien, wie beispielsweise Vitamin C, E und Ubichinon, die Kombination photolabiler Filter mit stabileren sowie die Mikro- oder Nanoverkapselung sensibler Substanzen. Untersuchungen zeigen beispielsweise, dass die Verkapselung von EHMC mit Vitamin E die Bildung instabiler Isomere signifikant reduziert. Auch sogenannte "Quencher", Moleküle, die angeregte Zustände gezielt deaktivieren, bieten Potenzial zur Minimierung lichtinduzierter Abbauprozesse.

Im Bereich der anorganischen UV-Filter erfahren Materialien wie Ceroxid (CeO_2) eine zunehmende Relevanz. Obwohl CeO_2 einen effektiven UV-Schutz bietet, besteht die Möglichkeit, dass es durch seine photokatalytische Aktivität andere Inhaltsstoffe zersetzt. Die Abmilderung dieses Problems kann durch eine Siliciumdioxid-Beschichtung oder eine Dotierung mit Calcium- bzw. Zinkionen erreicht werden. Besonders vielversprechend ist Ceriumphosphat (CePO_4), das hohe Stabilität mit geringem Weißschleier und guter Verträglichkeit verbindet.

Parallel dazu rücken organische Filter mit zusätzlichen funktionellen Eigenschaften in den Fokus. Der Fokus der Forschung liegt auf Substanzen, die neben einem UV-Schutz auch antioxidative, entzündungshemmende und hautpflegende Effekte aufweisen. Der Einsatz neuartiger Filterklassen, wie beispielsweise Benzimidazole, Triazine und Hybridmoleküle auf Sinapinsäurebasis, ist mit einer Reihe vorteilhafter Eigenschaften assoziiert. Dazu zählen insbesondere eine breite Schutzwirkung, eine hohe Stabilität sowie ein günstiges toxikologisches Profil.

Des Weiteren liefern auch natürliche Vorbilder vielversprechende Ansätze für neue Inhaltsstoffe. Stilbene, p-Hydroxyzimtsäuren, Xanthone sowie Resveratrol-Analoga weisen neben UV-Schutz antioxidative Eigenschaften und eine gute Wasserlöslichkeit auf. Insbesondere Xanthon-Derivate und ihre Cinnamoyl-Hybride bieten eine protektive Wirkung gegen Breitbandstrahlung, ohne dass phototoxische Risiken zu verzeichnen sind. Darüber hinaus weisen neu entwickelte Grundgerüste, wie beispielsweise Chinolin-, Furan- und Pyrrol-Derivate, ein positives Sicherheitsprofil auf, ohne dass Hinweise auf hormonelle Nebenwirkungen zu verzeichnen sind. Damit wird eine stabile Basis für die

Weiterentwicklung einer neuen Generation von Sonnenschutzmitteln geschaffen. (Jesus et al., 2022)

3.2. Innovationen und Entwicklungen bei Sonnenschutzmitteln

Innovationen im Sonnenschutz umfassen eine Reihe neuer Ansätze, die auf eine höhere Wirksamkeit, bessere Sicherheit und eine verbesserte Nutzerfreundlichkeit ausgerichtet sind. Zu den zentralen Fortschritten gehören neuartige UV-Filter mit erweitertem Schutzspektrum gegen UVA-Strahlung und sichtbares Licht. Zu den Substanzen, die zu dieser Gruppe gehören, zählen Bemotrizinol, Bisotrizole oder Drometrisole Trisiloxan. Es konnte festgestellt werden, dass diese eine breitere sowie photostabilere Abdeckung als viele herkömmliche Filter gewährleisten. Zudem wurde ein internationaler Einsatz dieser Filter beobachtet, der als erfolgreich zu bewerten ist. (Turner and Torgerson, 2025; Ziglar et al., 2025) In den USA verzögert sich ihre Einführung jedoch aufgrund regulatorischer Vorgaben, obwohl ihre Sicherheit und Effektivität weltweit anerkannt sind. (Turner and Torgerson, 2025)

Ein weiteres Innovationsfeld betrifft die Ergänzung von Sonnenschutzmitteln mit Antioxidantien und DNA-Reparatur-Enzymen. Diese sollen nicht nur UV-bedingte Schäden, sondern auch oxidative Belastungen durch sichtbares Licht und Infrarotstrahlung mindern. (Glaser and Tomecki, 2020; Suozzi et al., n.d.; Zastrow et al., 2017a; Ziglar et al., 2025) Darüber hinaus werden Eisenoxide und spezielle Pigmente verwendet, die insbesondere bei Personen mit dunklerem Hauttyp einen verbesserten Schutz vor sichtbarem Licht und Hyperpigmentierung bieten. (Zastrow et al., 2017a)

Zur Optimierung der Produkte werden in der modernen Formulierungstechnologie Nanopartikel- und Verkapselungstechnologien (beispielsweise Alginate, Cyclodextrine) eingesetzt. Diese reduzieren die Penetration der Filter in tiefere Hautschichten, erhöhen die Photostabilität und verbessern die kosmetische Verträglichkeit. Parallel dazu werden natürliche Substanzen wie Mycosporine, Scytonemin oder pflanzliche Flavonoide intensiv erforscht, um als zukünftige UV-Filter oder ergänzende Additive genutzt werden zu können. (Aguilera et al., 2023; Rajasekar et al., 2024)

Schließlich gewinnt die Entwicklung umweltfreundlicher, biologisch abbaubarer Sonnenschutzformulierungen an Bedeutung, da herkömmliche Produkte nachweislich negative Auswirkungen auf aquatische Ökosysteme haben können. (Rajasekar et al., 2024)

Diese Innovationen haben zum Ziel einen umfassenderen, nachhaltigen und benutzerfreundlicheren Sonnenschutz bereitzustellen. Dieser soll sowohl gesundheitlichen als auch ökologischen Anforderungen gerecht werden. (Krutmann et al., 2020; Pellacani et al., 2024b; Ziglar et al., 2025)

3.2.1. Entwicklung und Wirksamkeit biologischer Sonnenschutzmittel

Pflanzenbasierte Inhaltsstoffe werden als vielversprechende Alternative zu synthetischen UV-Filtern angesehen, da sie sowohl photoprotektive als auch antioxidative Eigenschaften aufweisen. Lignin ist in dieser Hinsicht von besonderer Relevanz, da dessen chemische Struktur mit aromatischen Ringen sowie Hydroxyl- und Methoxygruppen eine effektive Absorption von UV-Strahlung ermöglicht. Untersuchungen zufolge kann ebenso Lignin in nanopartikulärer Form den Lichtschutzfaktor von Lotionen signifikant erhöhen. Des Weiteren konnte in Kombination mit mineralischen Filtern eine Reduktion der Lichtintensität von bis zu 16 durch silymarinreiche Extrakte aus der Mariendistel erzielt werden.

Darüber hinaus wurden zahlreiche weitere pflanzliche Extrakte mit UV-schützender Wirkung identifiziert. Algenextrakte, wie jene aus *Gracilariopsis longissima*, bieten durch das Vorhandensein von mycosporinähnlichen Aminosäuren (MAAs) einen effektiven Schutz. Auch Pigmente mariner Pilze sowie Extrakte aus Orchideen, *Moringa oleifera*, Hibiskus oder Kaffeebohnen zeigten *in vitro* teils beachtliche SPF-Werte. Diese Wirkung wird in erster Linie auf ihren hohen Gehalt an Polyphenolen und Flavonoiden zurückgeführt, die die Fähigkeit besitzen, freie Radikale zu neutralisieren und UV-bedingte Hautschäden zu reduzieren.

Um die Stabilität und Wirksamkeit dieser pflanzlichen Filter weiter zu verbessern, finden zunehmend moderne Trägersysteme wie Nanoemulsionen, Lipid-Nanopartikel oder Chitosan-basierte Verkapselungen Anwendung. Diese Technologien erhöhen nicht nur die Hauthaftung und reduzieren die Penetration durch die Epidermis, sondern verlängern auch

die photoprotektive Wirkung. Die Verkapselung von Granatapfel- oder Aloe-Extrakten ist in diesem Zusammenhang besonders vielversprechend, da die entsprechenden SPF-Werte in Studien bis zu 29 erreichten. Darüber hinaus kombinieren innovative Ansätze pflanzliche Antioxidantien mit Probiotika und biokompatiblen Trägermaterialien, wie etwa goldbeschichteten Nanopartikeln.

Eine Vielzahl von Forschungsergebnissen lässt den Schluss zu, dass pflanzenbasierte Inhaltsstoffe bei adäquater Formulierung ein beträchtliches Potenzial als natürliche und gut verträgliche UV-Filter aufweisen. Derartige Entwicklungen könnten dazu beitragen, die Anzahl der synthetischen Filter zu reduzieren und neue Standards im Bereich des natürlichen Sonnenschutzes zu etablieren. Gemäß der brasilianischen Verordnung „RDC 30“ (2012) müssen Sonnenschutzprodukte einen Lichtschutzfaktor von mindestens 6 aufweisen. Untersuchungen legen jedoch nahe, dass pflanzliche Extrakte diese Anforderung nicht nur erfüllen, sondern darüber hinaus die Wirksamkeit konventioneller Filter signifikant erhöhen können.

In Untersuchungen wurde festgestellt, dass Extrakte aus dem antarktischen Moos *Sanionia uncinata* oder *Leucobryum* sp. in Kombination mit Benzophenon-3 im Verhältnis 1:1 den Lichtschutzfaktor um den Faktor 38 erhöhen können. Auch die methanol- und ethanolhaltigen Extrakte dieser Moosarten erzielten einen Lichtschutzfaktor von über 20. Weitere Beispiele sind Extrakte aus *C. sessiliflora*, *C. guazumifolia* und *C. xanthocarpa*, die bei einer Konzentration von 8 % einen Lichtschutzfaktor von bis zu 5,6 erreichten. In Kombination mit synthetischen Filtern wurden sogar deutlich höhere Werte erzielt.

Auch einzelne polyphenolhaltige Substanzen wie Propolis, Caffeinsäure oder Quercetin zeigten in Emulsionen eine synergistische Wirkung mit mineralischen UV-Filtern wie TiO_2 oder ZnO . Die Kombination von TiO_2 mit Quercetin beispielsweise resultierte in einem SPF-Wert von über 30. Ebenso vielversprechend ist die Verkapselung pflanzlicher Extrakte in Nanopartikel, beispielsweise von Rutin, Urucumöl oder silberhaltigen Extrakten aus *Ficus carica*. Die Kombination von Rutin-Gelatine-Nanopartikeln mit chemischen UV-Filtern konnte den Lichtschutzfaktor von 17 auf über 25 steigern, während Morin-Nanopartikel in Kombination mit mineralischen Filtern LSF-Werte von über 40 erreichten.

Neben pflanzlichen Quellen konnten auch Mikroorganismen als potenzielle Lieferanten photoprotektiver Stoffe identifiziert werden. So wurde in einer Studie eine SPF-steigernde Wirkung von bis zu 30 % in kommerziellen Produkten festgestellt, die auf die Produktion von Pyomelanin durch die Hefe *Yarrowia lipolytica* zurückzuführen ist. Es liegen Studien vor, die ähnliche Effekte auch für Pigmente aus *Pseudomonas aeruginosa* belegen.

Darüber hinaus wurde in mehreren Studien nachgewiesen, dass Antioxidantien wie Melatonin, Koffein oder Ferulasäure in Kombination mit klassischen UV-Filtern nicht nur den Lichtschutzfaktor erhöhen, sondern zugleich die durch UV-Strahlung verursachte Zersetzung der Formulierung deutlich verringern können. Eine besonders eindrucksvolle Beobachtung war die mit Koffein angereicherte Formulierung, die nach UV-Bestrahlung einen Lichtschutzfaktor von über 50 erreichte. Eine Studie zeigte, dass die Kombination von Melatonin und Kürbiskernöl eine besonders hohe Stabilität bei der Aufrechterhaltung der Schutzwirkung aufweist. (He et al., 2021)

3.2.2. Antioxidantien

Der topische Einsatz von Antioxidantien ist ein wesentlicher Faktor zum Schutz der Haut, da diese reaktive Sauerstoffspezies abfangen, die durch UV-Strahlung, Umweltbelastungen oder körpereigene Stoffwechselprozesse entstehen. Diese ROS fördern oxidativen Stress, der DNA-Schäden, Lipidperoxidation und Proteinabbau verursacht und dadurch Hautalterung, Entzündungsreaktionen sowie ein erhöhtes Risiko für Hautkrebs begünstigt. (Chen et al., 2012; Liu et al., 2023; Pinnell, 2003) Die gezielte Applikation von Antioxidantien, wie beispielsweise Vitamin C, Vitamin E oder Ferulasäure, kann zu einer signifikanten Steigerung der antioxidativen Abwehr der Haut führen. Untersuchungen zeigen, dass derartige Wirkstoffkombinationen die Entstehung von UV-induzierten Mutationen (beispielsweise Thymindimere), die Expression von Entzündungsmediatoren sowie strukturelle Schädigungen an Kollagen und Elastin signifikant reduzieren. (Ivarsson et al., 2025; Murray et al., 2008) Die Effektivität der Formulierung hängt dabei maßgeblich von der Stabilität und der Konzentration der Inhaltsstoffe ab. Stabilere Präparate mit höheren Konzentrationen (beispielsweise 15 % Ascorbinsäure, 1 % Tocopherol und 0,5 % Ferulasäure) zeigen nachweislich einen wirksamen Schutz vor UV-bedingten Hautschäden. (Murray et al., 2008) Zudem fördern topische Antioxidantien die Barrierefunktion,

verbessern die Hydratation und Elastizität der Haut und wirken der extrinsischen Hautalterung entgegen. (Lademann et al., 2016) Auch pflanzliche Polyphenole und andere natürliche Antioxidantien besitzen schützende Eigenschaften gegenüber oxidativem Stress und unterstützen die zellulären Reparaturmechanismen. Der vorliegende Erkenntnisstand zeigt, dass topische Antioxidantien die Wirkung von Sonnenschutzmitteln ergänzen. (Liu et al., 2023; Michalak, 2022) Dies ist dadurch bedingt, dass sie oxidative Schäden reduzieren und die strukturelle Integrität der Haut bewahren. (Chen et al., 2012; Murray et al., 2008; Pinnell, 2003)

3.2.3. Eisenoxide

Eisenoxide stellen eine moderne Ergänzung in Sonnenschutzformulierungen dar, die vor allem auf den Schutz vor sichtbarem Licht im Wellenlängenbereich von 400–700 nm abzielen. Mineralische Filter, wie sie beispielsweise Titandioxid und Zinkoxid darstellen, sind in erster Linie dazu fähig, UVB- und UVA-Strahlen zu blockieren. Eisenoxide hingegen erweitern das Spektrum, indem sie zusätzlich gegen sichtbares Licht wirken. Dies ist insbesondere für Personen mit dunkleren Hauttypen (Fitzpatrick III–VI) von klinischer Relevanz, da sichtbares Licht maßgeblich zur Entwicklung von Hyperpigmentierungen und Dyschromien beiträgt. (Dumbuya et al., 2020; Ziglar et al., 2025)

Die Schutzwirkung der Eisenoxide ist auf deren Fähigkeit zurückzuführen, sichtbares Licht zu absorbieren, zu streuen und zu reflektieren. Der Einsatz von getönten Formulierungen hat einen doppelten Nutzen. Einerseits konnte in Studien eine signifikante Reduktion der durch sichtbares Licht induzierten Pigmentierung bei Patient:innen mit Melasma oder postinflammatorischer Hyperpigmentierung beobachtet werden. Ein weiterer Vorteil der getönten Präparate liegt in ihrem kosmetischen Effekt. Sie dienen der Kaschierung bestehender Pigmentstörungen und resultieren in einer unmittelbaren Verbesserung der Hautoptik. (Dumbuya et al., 2020; Zastrow et al., 2017b)

Die Integration von Eisenoxiden in Sonnenschutzpräparate erfolgt vor dem Hintergrund eines allgemeinen Trends, den photoprotektiven Effekt über das klassische UV-Spektrum hinaus auf sichtbares und infrarotes Licht auszudehnen. Es wird eine wesentliche Schwäche traditioneller UV-Filter adressiert. Zudem wird ein Ansatz verfolgt, der den

aktuellen Erkenntnissen der dermatologischen Forschung entspricht. (Zastrow et al., 2017b; Ziglar et al., 2025) Da Eisenoxide überwiegend als Pigmentkomponenten in farbigen Produkten zum Einsatz kommen, existieren bislang keine standardisierten Dosierungsrichtlinien. Die Schutzwirkung ist dabei in erster Linie von der Deckkraft und der Pigmentkonzentration abhängig.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Eisenoxide eine wissenschaftlich fundierte Innovation darstellen, die den Sonnenschutz wirksam ergänzt, insbesondere bei Patient:innen mit dunkleren Hauttypen und bei klinischen Indikationen wie Dyschromien. (Dumbuya et al., 2020; Zastrow et al., 2017b; Ziglar et al., 2025)

3.2.4. Nano- & Verkapselungstechnologien

Nano- und Verkapselungstechnologien sind als signifikante Fortschritte im Bereich moderner Sonnenschutzformulierungen zu betrachten. Die Einbindung von UV-Filtern wie Uvinul® A, Tinosorb® S oder Uvinul® T150 in nanostrukturierte Systeme, beispielsweise nanostrukturierte Lipidträger (NLCs), Liposomen oder andere Nanopartikel, führt zu einer Optimierung der Photostabilität, der Haftung an der Haut und der Schutzwirkung. Gleichzeitig wird die systemische Aufnahme der Filterstoffe verringert, wodurch sich auch mögliche toxikologische Risiken reduzieren.

Die Verkapselung in NLCs oder Liposomen ermöglicht eine Einschussrate der Filterstoffe von >90 % und resultiert in stabilen Partikelgrößen im Bereich von 100–150 nm. In der Folge wird die Wirksamkeit der Sonnenschutzmittel gesteigert und deren Haltbarkeit verlängert. Darüber hinaus ermöglicht diese Technologie eine Reduktion der eingesetzten Chemikalienmenge, ohne dabei den UV-Schutz zu beeinträchtigen. Hinsichtlich der Hautpenetration zeigen sich vergleichbare Ergebnisse wie bei herkömmlichen Emulsionen, während die systemische Verfügbarkeit gleichzeitig deutlich eingeschränkt wird. (De Araújo et al., 2024; Miranda et al., 2024)

Des Weiteren finden mineralische Nanopartikel wie Zinkoxid und Titandioxid Anwendung, da sie zur Absorption sowie Streuung von UV-Strahlung befähigt sind. Im Vergleich zu klassischen Formulierungen hinterlassen sie kaum sichtbare Rückstände auf der Haut, sind photostabil und verursachen seltener Hautirritationen. Darüber hinaus

weisen sie ein günstigeres Umweltprofil auf, wobei ihre Penetration über die Epidermis hinweg als minimal einzustufen ist. (Keller, 2023; Mascarenhas-Melo et al., 2023; Rajasekar et al., 2024)

Ebenso besteht die Möglichkeit, natürliche Antioxidantien wie Flavonoide oder Epigallocatechingallat (EGCG) in Nanopartikel einzubringen, um sowohl die antioxidative Wirkung als auch den UV-Schutz synergistisch zu verstärken. (Chen et al., 2022; Fonseca et al., 2023) Nano-Hybrid-Formulierungen, welche die Kombination von organischen und anorganischen Filtern darstellen, sind dabei von besonderer Relevanz, da sie die Photostabilität erhöhen und gleichzeitig die Entstehung schädlicher Abbauprodukte reduzieren. (Safian et al., 2025)

3.2.5. Orale Sonnenschutzmittel

Orale Photoprotektoren sind Nahrungsergänzungsmittel, die verschiedene bioaktive Inhaltsstoffe wie Polypodium leucotomos-Extrakt (PL), Carotinoide, Polyphenole oder Nicotinamid enthalten. Der Einsatz dieser Substanzen dient der zusätzlichen Prävention von UV-bedingten Schäden der Haut und werden als Ergänzung zu topischen Schutzmaßnahmen verwendet. Ihr Nutzen wird insbesondere bei Personen mit erhöhter UV-Sensitivität diskutiert, da sie potenziell das Risiko für lichtinduzierte Hautschäden und Hautalterung reduzieren können. (Hartmann and Valenzuela, 2024; Ntarelli et al., 2025; Rigel et al., 2022)

Die Wirkungsweise oraler Photoprotektoren erfolgt über unterschiedliche, sich jedoch ergänzende Mechanismen. Der PL zeigt insbesondere antioxidative und immunomodulierende Effekte, die auf der Neutralisierung reaktiver Sauerstoffspezies beruhen. In der Folge werden UV-bedingter oxidativer Stress sowie DNA-Schäden reduziert und gleichzeitig Entzündungsreaktionen abgeschwächt. Darüber hinaus beeinflusst PL Immunprozesse positiv und trägt damit zu einem umfassenden Schutz vor UV-induzierten Zellschäden bei. (Hartmann and Valenzuela, 2024; Hussain et al., 2025; McCarty et al., 2023; Ntarelli et al., 2025). Carotinoide wie β -Carotin, Lycopin, Lutein oder Astaxanthin sind in der Lage, durch das Quenchen von Singulett-Sauerstoff und die Neutralisierung freier Radikale zu wirken. Die aktuelle Evidenz legt nahe, dass die beschriebenen Mechanismen das Risiko für UV-bedingtes Erythem reduzieren und dabei

zentrale Signalwege wie MAPK, Nrf2 (Nukleärer Faktor Erythroid 2-verwandter Faktor 2) und NF- κ B (Nukleärer Faktor κ B) modulieren. Es konnte nachgewiesen werden, dass diese Prozesse nicht nur zum Schutz vor Photoaging beitragen, sondern auch die Hautbarriere und deren Funktionalität unterstützen. (Anbualakan et al., 2022; Baswan et al., 2021; Calniquer et al., 2021; Ma et al., 2025) Polyphenole, beispielsweise Catechine aus Grüntee oder Flavonoide, hemmen ebenfalls durch UV-Strahlung induzierte Entzündungs- und Oxidationsprozesse. Auch sie regulieren die Signalwege NF- κ B und Nrf2 und reduzieren die durch Zytokine stimulierte Aktivität von MMPs. Diese Wirkung steht im Gegensatz zum Kollagenabbau und trägt folglich zum Schutz der strukturellen Integrität der Haut bei. (Anbualakan et al., 2022; Calniquer et al., 2021; McCarty et al., 2023; Natarelli et al., 2025) Nicotinamid weist im Vergleich zu anderen Substanzen einen primären Wirkmechanismus auf, der sich durch die Förderung der DNA-Reparatur und die Reduktion der durch UV induzierten Immunsuppression auszeichnet. Darüber hinaus liegen Hinweise vor, dass es einen präventiven Nutzen bei der Verringerung des Risikos für nicht-melanozytären Hautkrebs bei Risikopatient:innen bietet. (Searle et al., 2021)

Die bisherige Evidenz zeigt, dass orale Photoprotektoren zwar einen nachweisbaren, jedoch insgesamt begrenzten Zusatznutzen gegenüber etablierten topischen Maßnahmen bieten. Der wissenschaftliche Fokus liegt bislang vor allem auf PL, Carotinoiden und Polyphenolen. Eine klinische Studie zeigte, dass die tägliche Einnahme von 240 mg PL über fünf Tage hinweg, jeweils zweimal täglich, bei Proband:innen mit heller Haut sowohl die MED erhöhte als auch die Intensität des Erythems verringerte. (Hussain et al., 2025) Zudem bestätigen systematische Übersichtsarbeiten, dass diese Substanzen die UV-bedingten Hautschäden abmildern können, insbesondere bei Personen mit erhöhter UV-Sensitivität, wie sie beispielsweise bei polymorpher Lichtdermatose auftritt. (Natarelli et al., 2025)

Die Ergebnisse klinischer Untersuchungen weisen übereinstimmend darauf hin, dass die Einnahme der oralen Photoprotektoren lediglich zu einer Steigerung von 10–20 % führt, was einem LSF-Äquivalent von etwa 1,5 bis 2,5 entspricht. Die ermittelten Werte liegen folglich signifikant unter den in Fachpublikationen empfohlenen Lichtschutzfaktoren von 30 bis 50 für topische Präparate. In der Fachliteratur werden orale Photoprotektoren als mögliche Ergänzung, jedoch nicht als Ersatz für bewährte topische Schutzmaßnahmen

bewertet. (Baswan et al., 2021; Hussain et al., 2025; Ntarelli et al., 2025; Searle et al., 2021)

Für isolierte Vitamine oder Coenzym Q existiert demgegenüber eine nur unzureichende wissenschaftliche Evidenz. Nicotinamid wird hingegen zunehmend als mögliche Option zur Senkung des Risikos für nicht-melanozytären Hautkrebs diskutiert, insbesondere bei Patient:innen mit hohem Erkrankungsrisiko. (Hunt et al., 2023)

Es ist von entscheidender Bedeutung, dass orale Sonnenschutzpräparate lediglich als ergänzende Maßnahme, jedoch nicht als Ersatz für etablierte topische Ansätze wie Sonnenschutzcreme, Kleidung und Sonnenmeidung betrachtet werden dürfen. (Hartmann and Valenzuela, 2024; McDonald et al., 2023a; Rigel et al., 2022) In Bezug auf die optimale Dosierung und Anwendungsdauer besteht weiterer Forschungsbedarf und es bestehen noch offene Fragen. (Ntarelli et al., 2025)

3.2.6. DNA-Reparatur-Enzyme

Der Einsatz von DNA-Reparatur-Enzymen in modernen Sonnenschutzpräparaten stellt eine neuartige Ergänzung zu etablierten UV-Filtern dar. Während klassische Filter vorrangig darauf abzielen, UV-Strahlung zu absorbieren oder zu reflektieren, um die Bildung von DNA-Schäden zu verhindern, ermöglichen Enzyme wie Photolyase und T4 Endonuclease V eine gezielte Korrektur bereits entstandener Schäden. Es erfolgt die Identifizierung und Elimination dimerischer Photoprodukte, insbesondere Cyclobutan-Pyrimidindimere (CPDs), die unter UV-Einfluss entstehen und sowohl mit Hautkrebs als auch mit vorzeitiger Hautalterung assoziiert sind. (Glaser and Tomecki, 2020; Guan et al., 2021; Luze et al., 2020; Ramírez et al., 2021)

Zur Optimierung der Stabilität und der Hautpenetration dieser Enzyme wird häufig eine liposomale Formulierung eingesetzt. Es liegen klinische Untersuchungsbefunde vor, die darauf hindeuten, dass Sonnenschutzmittel, die Photolyase und/oder T4-Endonuclease V enthalten, die natürlichen Reparaturmechanismen der Haut nach UV-Exposition unterstützen können. Allerdings mangelt es bislang an randomisierten, kontrollierten Studien, die eindeutig belegen, dass derartige Produkte konventionellen Sonnenschutzmitteln in der Prävention von Hautkrebs oder Photoaging überlegen sind.

(Anderson et al., 2023; Guan et al., 2021; Luze et al., 2020) (Anderson et al., 2023; Guan et al., 2021; Luze et al., 2020; Wolf et al., 1995)

Darüber hinaus wird in der wissenschaftlichen Literatur auf den möglichen Nutzen weiterer Enzyme wie Superoxiddismutase und Katalase hingewiesen. Diese Substanzen weisen antioxidative Effekte auf, können die DNA-Reparatur fördern und oxidativen Stress reduzieren. Darüber hinaus gibt es Hinweise darauf, dass ihre Anwendung die Expression von Genen des NER-Systems (Nucleotide Excision Repair) verstärkt und damit die Beseitigung UV-induzierter DNA-Schäden beschleunigt. (Giacomoni, 2020; Pudlarz et al., 2022)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass DNA-Reparatur-Enzyme eine vielversprechende Erweiterung der Photoprotektion darstellen. Der klinische Zusatznutzen dieser Substanz konnte jedoch bislang noch nicht abschließend durch große randomisierte und plazebokontrollierte Studien bestätigt werden. Aus diesem Grund sollten sie derzeit eher als Ergänzung zu etablierten UV-Filtern betrachtet werden. (Glaser and Tomecki, 2020; Guan et al., 2021; Luze et al., 2020)

3.3. Neue Erkenntnisse zu sichtbaren und Infrarot-Licht

Als sichtbares Licht wird jener Abschnitt des elektromagnetischen Spektrums bezeichnet, den das menschliche Auge erkennen kann. Die Hauptquelle sichtbaren Lichts in der Natur ist das Sonnenlicht, das bei Eintritt in die Erdatmosphäre zu etwa 39 bis 44 Prozent aus sichtbarem Licht besteht. Zu den künstlichen Lichtquellen zählen gemäß der vorliegenden Literatur Leuchtmittel wie Glühbirnen, Laser, therapeutische Geräte sowie Bildschirme von Computern, Fernsehern und Mobiltelefonen. (Cohen et al., 2023)

Sichtbares Licht wurde lange Zeit als harmlos für die Haut angesehen. Neuere Studien legen jedoch nahe, dass SL oxidative Prozesse in der Epidermis stimulieren kann. Dies resultiert in der Bildung reaktiver Sauerstoffspezies, einer erhöhten Zytokinfreisetzung sowie der Aktivierung von MMPs. Diese Mechanismen sind von zentraler Bedeutung für die vorzeitige Hautalterung. Darüber hinaus wurde eine Beteiligung von SL an Photodermatosen wie Urtikaria oder Porphyrien beschrieben. Die durch SL induzierte Pigmentierung zeigt dabei eine besondere Persistenz und verstärkt sich synergistisch in

Kombination mit langwelligem UVA1. In Abhängigkeit vom Hauttyp können unterschiedliche klinische Reaktionen wie Erytheme oder Hyperpigmentierungen auftreten.

Hauptpigmentierungen, die auf die UV-Exposition zurückzuführen sind, lassen sich in unterschiedliche Phasen unterteilen: Die kurzfristigen Pigmentverschiebungen beruhen auf Oxidation und Umverteilung des vorhandenen Melanins, während die verzögerte Bräunung auf neu gebildetem Melanin basiert. Obwohl sich zunehmend Evidenz für die biologischen Auswirkungen von SL zeigt, sind bislang keine standardisierten Phototestverfahren verfügbar. Zwar existieren erste in vitro-Modelle zur Bewertung von photoprotektiven Substanzen wie Antioxidantien, doch ist deren Aussagekraft begrenzt. Die aktuelle Forschung konzentriert sich daher auf die Entwicklung klinisch relevanter Prüfmethode, darunter auch die Bestimmung eines „Visible Light Protection Factors“ (VL-PF), um die Schutzwirkung gegenüber sichtbarem Licht systematisch bewerten zu können. (Ezekwe et al., 2022)

Blaulicht, ein Abschnitt des sichtbaren Lichtspektrums mit Wellenlängen zwischen 400 und 500 Nanometern, „kann aufgrund der längeren Wellenlänge und der geringeren Energie im Vergleich zu UV-Licht tiefer in die Hautschichten eindringen, zelluläre Funktionen und DNA-Schäden hervorrufen.“ (Coats et al., 2021; Opländer et al., 2011) Dieser Prozess steht in Verbindung mit der Entstehung reaktiver Sauerstoffspezies, die oxidativen Stress verursachen und folglich zur Schädigung von Zellstrukturen sowie zur beschleunigten Hautalterung beitragen. In einer Untersuchung wurden insbesondere die tieferen Hautschichten mit hoher zellulärer Aktivität analysiert, in denen Entzündungs- und Alterungsprozesse reguliert werden. Ein zentraler Aspekt ist zudem die durch Blaulicht ausgelöste Hyperpigmentierung, insbesondere bei Menschen mit dunkleren Hauttypen (Fitzpatrick III–VI), die durch eine opsinvermittelte Signalkaskade in Melanozyten ausgelöst wird. Obwohl digitale Geräte elektromagnetische Wellen im Bereich des sichtbaren Lichts emittieren, ist die Intensität dieser Strahlung im Vergleich zur Intensität der Sonnenstrahlung vernachlässigbar. Dennoch wurde nachgewiesen, dass Blaulicht die Aktivierung von MMPs begünstigt. Diese Enzyme sind für den Abbau von Kollagen und die Hemmung seiner Neubildung verantwortlich. Dieser Prozess trägt maßgeblich zur lichtbedingten Hautalterung bei.

„Blaulicht wird im medizinischen Bereich zu therapeutischen Zwecken eingesetzt, entweder als eigenständige Behandlung oder als Teil der photodynamischen Therapie (PDT). Es gibt Hinweise auf die Wirksamkeit kleiner Dosen von Blaulichtbehandlungen bei einer Vielzahl dermatologischer Erkrankungen wie aktinischer Keratose, Psoriasis vulgaris, Ekzemen, Akne vulgaris und zur Photorejuvenation.“ (Coats et al., 2021, p. 716)

Demgegenüber zeigt Gelblicht, dessen Wellenlänge etwa 590 nm beträgt, photoprotektive Eigenschaften. In vitro konnte gezeigt werden, dass Gelblicht die Zellvitalität von Fibroblasten erhöht und UVA-induzierte oxidative Prozesse abschwächt. Die Expression von MMP-1 wurde dabei signifikant reduziert, ein Effekt, der dem antioxidativen Potenzial von N-Acetylcystein ähnelt. Auch klinische Studien stützen diese Effekte. In einer Untersuchung mit 90 Teilnehmenden führte eine nicht-thermische LED-Ganzgesichtsbestrahlung mit Gelblicht zu sichtbaren Verbesserungen lichtbedingter Hautveränderungen. (Pourang et al., 2022)

„Digitale Bildgebung zeigte bei 90 % der Patienten eine Verbesserung der Anzeichen von Photoaging wie periorbitale Falten, Erytheme und Pigmentierung. Von den 10 entnommenen Biopsieproben wurde in der papillären Dermis eine Zunahme der Kollagen-I-Ablagerung und eine verringerte MMP-1-Aktivität festgestellt.“ (Pourang et al., 2022, p. 193-194)

Rotlicht (620–750 nm), das längste Wellenlängenspektrum des sichtbaren Lichts, wird in der dermatologischen Forschung für seine regenerativen Eigenschaften geschätzt. Vorliegende Studien weisen darauf hin, dass Rotlicht mit Prozessen wie Zellwachstum, Entzündungshemmung und einer schnelleren Wundheilung in Zusammenhang steht. Im Rahmen der Low-Level-Lichttherapie (LLLT) werden diese Effekte durch den Einsatz von LEDs oder Lasern erzielt. In vitro führte die Exposition gegenüber Rotlicht zu einer dosisabhängigen Reduktion von ROS sowie zur Hochregulation entzündungshemmender Gene wie IL-4. Von besonderem Interesse ist die Beobachtung, dass moderate Dosierungen die Zellmigration und -proliferation fördern, während zu hohe Dosen zellschädigend wirken. Eine klinische Studie mit zehn Proband:innen belegt, dass LLLT

mit 655 und 785 nm zu einer signifikanten Verbesserung der Hautelastizität und Reduktion feiner Falten führen kann. (Pourang et al., 2022)

Infrarotstrahlung stellt einen signifikanten Bestandteil des Sonnenlichts dar und repräsentiert etwa 54 Prozent der solaren Strahlung auf Meereshöhe. Die elektromagnetischen Wellen, die in diesem Spektrum beobachtet werden können, weisen Wellenlängen zwischen 760 Nanometern und 1 Millimeter auf. In Abhängigkeit von der Wellenlänge erfolgt eine Klassifizierung in drei unterschiedliche Spektralbereiche: IR-A (760–1400 nm), IR-B (1400–3000 nm) und IR-C (3000 nm–1 mm). In der Dermatologie spielt insbesondere die Infrarotstrahlung mit einer Wellenlänge von 750 bis 1000 Nanometern eine signifikante Rolle. Diese wird auch als Nahinfrarotstrahlung (NIR) bezeichnet und zeichnet sich durch eine hohe Eindringtiefe in die Haut aus. Sie erreicht sowohl die Dermis als auch das subkutane Gewebe.

Im Gegensatz zur gut erforschten UV-Strahlung ist die Wirkung von Infrarotstrahlung auf die Haut noch vergleichsweise wenig untersucht. Dennoch legen aktuelle Studien den Schluss nahe, dass IR-A eine doppelte Funktion erfüllt. In niedriger Dosierung kann sie physiologische Prozesse wie die Wundheilung fördern, während hohe Dosen schädliche Effekte hervorrufen können. In diesem Kontext ist insbesondere die Aktivierung von MMPs, insbesondere MMP-1, von Relevanz. Diese Enzyme fördern den Abbau von Kollagen und führen langfristig zu strukturellen Veränderungen der extrazellulären Matrix. Dies stellt einen zentralen Prozess in der extrinsischen Hautalterung dar.

Ein charakteristisches Merkmal der Infrarot-Strahlung ist ihre thermische Wirkung, die vom menschlichen Körper als Wärme wahrgenommen wird. Diese Form der Wärmebelastung kann zelluläre Stressreaktionen auslösen, die ihrerseits die Aktivierung mitogen-aktivierter Proteinkinase (MAPKs) und des Transkriptionsfaktors AP-1 bedingen. Diese Signalkaskaden wiederum können die verstärkte Expression von MMPs bedingen. Darüber hinaus wurden Hitzeschockproteine wie Hsp70 als durch IR-A reguliert identifiziert, deren Wirkung in Abhängigkeit von der Expositionsdosis protektiv oder schädigend ausfallen kann.

Die Intensität der Strahlung ist dabei von entscheidender Bedeutung. Natürliche IR-A-Expositionen durch Sonnenlicht zeigen potenziell eher moderate Effekte, während viele experimentelle Studien auf künstlichen Lichtquellen mit deutlich höherer Strahlungsdichte basieren. Die daraus resultierenden Gewebeschäden sind daher nicht direkt auf alltägliche Sonnenexposition übertragbar, sollten bei der Bewertung jedoch differenziert berücksichtigt werden.

Es lässt sich festhalten, dass IR-A als signifikanter Umweltfaktor in der Pathophysiologie der Hautalterung zu verstehen ist. Die Dosis-Wirkungs-Beziehung nimmt dabei eine zentrale Stellung bei der Interpretation positiver oder negativer Effekte ein. Zukünftige Forschung sollte darauf abzielen, Schwellenwerte, biologische Wirkmechanismen und Langzeitfolgen systematisch zu untersuchen. Für den modernen Sonnenschutz ergibt sich daraus die Notwendigkeit, auch den Infrarotanteil in Schutzkonzepte zu integrieren, um eine umfassende Prävention lichtbedingter Hautschäden zu gewährleisten. (Barolet et al., 2016)

3.3.1. LED-Masken: Social Media Trend oder evidenzbasierte Therapie?

In den sozialen Medien haben sich LED-Masken zu einem Trend entwickelt, wobei wissenschaftliche Daten belegen, dass die LED-basierte Photobiomodulation klinisch relevante Hautwirkungen entfalten kann. Untersuchungen zeigen, dass die Anwendung von roten (etwa 630–660 nm) und nahinfraroten (circa 800–1072 nm) Lichtwellen die Bildung von Kollagen anregen, die Hautelastizität steigern und feine Fältchen mindern kann. In randomisierten, kontrollierten Studien wurden signifikante Verbesserungen hinsichtlich der Hautstruktur, der Reduktion von Falten und der Straffung der Haut beobachtet. Diese Verbesserungen traten nach einer Behandlungsdauer von 6 bis 16 Wochen auf und waren unabhängig vom Geschlecht der Teilnehmenden. (Guo and Yuan, 2025; Kim et al., 2024a; Lee et al., 2025; Mineroff et al., 2023; Ngoc et al., 2023; Park et al., 2025)

Da in der medizinischen Fachliteratur die solare IR-A-Strahlung häufig mit schädlichen Auswirkungen auf die Haut, insbesondere mit Kollagenabbau und vorzeitiger Hautalterung, in Zusammenhang gebracht wird, (Calles et al., 2010; Robert et al., 2015; Schroeder et al., 2010, 2008) ist es wichtig zu erläutern, warum LED-Masken im Gegensatz dazu überwiegend positive Effekte auf der Haut haben können. Durch die

gezielte Anwendung von bestimmten Wellenlängen (z. B. Rot, Gelb, Nahinfrarot) werden Mitochondrien photomodulatorisch stimuliert, die ATP-Produktion erhöht und die Expression von Kollagen und Elastin gefördert. Dies führt zu einer verbesserten Hautelastizität, Reduktion von Falten und gesteigerter Wundheilung. (Guo and Yuan, 2025; Kim et al., 2024b, 2016; Li et al., 2021; Ngoc et al., 2023) Insbesondere Rot- und Nahinfrarot-LEDs (630–830 nm) induzieren die Synthese von Kollagen Typ I und III sowie Elastin und modulieren Entzündungsprozesse, ohne die negativen Effekte der IR-A-Sonnenstrahlung. (Guo and Yuan, 2025; Kim et al., 2024b; Li et al., 2021) Somit lässt sich festhalten, dass natürliche IR-A-Strahlung die Haut durch oxidativen Stress und den Abbau von Kollagen beeinträchtigen kann, während LED-Masken mit gezielt eingesetzten, therapeutischen Wellenlängen hingegen die Regeneration der Haut unterstützen, die Kollagenproduktion anregen und dadurch Anti-Aging-Effekte bewirken können. (Guo and Yuan, 2025; Kim et al., 2024b, 2016; Li et al., 2021; Robert et al., 2015)

Die biologischen Effekte in LED-Masken werden durch die Aktivierung von Photorezeptoren in Hautzellen erklärt. Zu den zentralen Photorezeptoren zählen Opsine, die mitochondriale Cytochrom-C-Oxidase und Kryptochrome. Sie sind maßgeblich an der Vermittlung der unterschiedlichen biologischen Wirkungen der jeweiligen Lichtwellenlängen beteiligt.

Opsine (zum Beispiel OPN2 und OPN3) gehören zu den lichtsensitiven Proteinen, die in Keratinozyten und Fibroblasten vorkommen. Sie reagieren vor allem auf sichtbares Licht im blauen und grünen Spektrum und beeinflussen intrazelluläre Signalwege, die Proliferation, Differenzierung und Immunantwort steuern. Die Cytochrom-C-Oxidase ist ein zentrales Enzym der mitochondrialen Atmungskette und wird insbesondere durch rotes und nahinfrarotes Licht aktiviert. Seine Stimulation führt zu einer gesteigerten ATP-Produktion, verstärkter Zellteilung und erhöhter Kollagensynthese. Dies hat eine verjüngende Wirkung auf die Haut und begünstigt eine bessere Wundheilung. Kryptochrome sind ebenfalls lichtempfindliche Proteine, die durch verschiedene sichtbare Wellenlängen angesprochen werden. Sie sind sowohl an der Regulation des circadianen Rhythmus als auch an DNA-Reparaturprozessen beteiligt.

Die beobachteten klinischen Effekte sind von der eingesetzten Wellenlänge abhängig. Blaues Licht (400–470 nm) besitzt antimikrobielle Eigenschaften und reduziert Akne, indem es Opsine aktiviert und die Bildung reaktiver Sauerstoffspezies fördert. Gelbes Licht (570–590 nm) hemmt die Melaninbildung und kann dadurch Hyperpigmentierungen lindern; dies wird vermutlich durch Kryptochrome und Opsine vermittelt. Rotes Licht (630–760 nm) und nahes Infrarotlicht (760–1200 nm) regen die Cytochrom-C-Oxidase an, steigern die Kollagenproduktion und tragen zu verbesserter Hautelastizität sowie effizienterer Wundheilung bei. (Guo and Yuan, 2025; Hernández-Bule et al., 2024; Lee et al., 2023; Mima et al., 2025; Ngoc et al., 2023; Sutterby et al., 2022)

Die Masken bestehen aus LED-Arrays, die in direktem Hautkontakt getragen werden. Neuere Modelle nutzen flexible, hautnahe μ LED-Technologie, um eine gleichmäßige Lichtverteilung und tiefere Penetration zu gewährleisten. (Kim et al., 2024a; Nam et al., 2025) Die Behandlungen werden in der Regel mehrmals pro Woche durchgeführt. Dabei können die Intensität und die Dauer, beispielsweise 10 mW/cm^2 für jeweils 10–20 Minuten, je nach Gerät und Anwendungsgebiet variieren. (Mineroff et al., 2023; Park et al., 2025)

Bei sachgemäßer Anwendung ist die Nutzung von LED-Masken als unbedenklich einzustufen. Schwerwiegende Nebenwirkungen sind selten und äußern sich in der Regel in milden Reaktionen wie vorübergehender Hautrötung. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass bei einer unsachgemäßen Anwendung, insbesondere bei einer Exposition der Augen gegenüber blauem Licht ohne adäquaten Schutz, ein Risiko besteht, dass eine photochemische Retinopathie verursacht werden kann. Aus diesem Grund wird dringend empfohlen, während der Behandlung geeignete Augenschutzmaßnahmen einzuhalten. (Kim et al., 2020; Touthou and Point, 2020)

Eine signifikante Diskrepanz besteht jedoch zwischen den am Markt erhältlichen Produkten. Klinische Studien belegen signifikante Verbesserungen der Hautelastizität, der Faltenbildung und der Hautstruktur. (Kim et al., 2024a; Mineroff et al., 2023; Park et al., 2025) Günstige Online-Angebote weisen hingegen häufig Defizite auf, wie beispielsweise unzureichende Lichtintensität, nicht optimale Wellenlängen oder eine minderwertige Verarbeitung. Zudem sind sie in der Regel nicht medizinisch validiert. (Cohen et al., 2022;

Graeme Ewan Glass, 2021) Zudem existieren bislang keine einheitlichen regulatorischen Vorgaben, weshalb die Wahl eines zertifizierten und geprüften Geräts dringend angeraten ist. (Graeme E. Glass, 2021; Graeme Ewan Glass, 2021)

3.4. Bedeutung von täglichem Sonnenschutz für Hautgesundheit und Krankheitsprävention

Die gesundheitliche Relevanz kumulativer, alltäglicher Sonnenexposition wurde lange Zeit verkannt, da der Fokus primär auf Sonnenbränden lag. Es besteht heute Konsens darüber, dass chronische UV-Belastung wesentlich zur Entstehung präkanzeröser Hautveränderungen, Hautkarzinomen und vorzeitiger Hautalterung beiträgt. Aus dieser Erkenntnis heraus wurde das Konzept der täglichen Photoprotektion entwickelt. Während einige Autoren darunter den täglichen Einsatz von Breitband-Sonnenschutz mit LSF ≥ 50 verstehen, zählen andere auch Tagescremes oder Make-up mit variierendem LSF dazu. Diese Unterschiede reflektieren regionale Gegebenheiten wie Hauttyp, Hautkrebsraten und UV-Intensität.

Die derzeit gültige Definition beschreibt Photoprotektion als regelmäßige Anwendung primär sonnenprotektiver Produkte unter alltäglicher UV-Belastung bei Erwachsenen ohne Hochrisikoprofil. Empirische Studien haben gezeigt, dass topische Sonnenschutzmittel für unbedeckte Hautareale, ergänzt durch Kleidung, Kopfbedeckungen und Sonnenbrillen, am wirksamsten sind. Es konnte ebenso nachgewiesen werden, dass die Einnahme von oralen Antioxidantien einen unterstützenden, jedoch sekundären Effekt auf den menschlichen Organismus hat. Es wird empfohlen, photostabile, hautverträgliche Formulierungen mit niedriger Filterkonzentration zu verwenden. Neben dem Schutz vor UV-Strahlung reduzieren Antioxidantien oxidative Schäden, die durch Umweltfaktoren wie Feinstaub oder Ozon verursacht werden. Da UVA und SL tief in die Haut eindringen und dort die Pigmentierung sowie die Photoalterung fördern, sollten Produkte einen hohen UVA- und Basisschutz vor SL bieten. Für IR-A wird vorerst ein antioxidativer Schutz empfohlen. Im Rahmen des alltäglichen Gebrauchs ist in der Regel ein Lichtschutzfaktor von 30 ausreichend. Bei extremer Belastung hingegen ist die Verwendung von höheren Werten empfehlenswert. Ein ausgewogenes UVA/UVB-Verhältnis sowie ggf. getönte Filter sind dabei vorteilhaft. Photoprotektion sollte demnach langfristig fester Bestandteil der Hautpflege sein. (Symanzik and John, 2022)

Parallel dazu ist eine kontinuierliche Zunahme der Inzidenz von Hautkrebs weltweit zu verzeichnen, insbesondere in hellhäutigen Populationen. UV-Strahlung wird als der bedeutendste externe Risikofaktor betrachtet. Personen mit regelmäßiger beruflicher Exposition, die als Hochrisikogruppe einzustufen sind, sind in erhöhtem Maße gefährdet. UV-Strahlung stellt die bedeutendste berufliche kanzerogene Belastung dar und ist die Hauptursache für nicht-melanozytäre Hautkarzinome (NMSC, auch Keratinozytenkarzinome genannt) der in Form aktinischer Keratosen (AK) und invasiver kutaner Plattenepithelkarzinome (SCC) auftritt. Obwohl Millionen von Beschäftigten betroffen sind, existieren in zahlreichen Ländern keine verbindlichen Grenzwerte. Die Internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) schlägt eine maximale Standard-Erythem-Dosis (SED) von 1,0–1,3 pro Arbeitstag vor. 1 SED entspricht einer energiedosierten Bestrahlung von 100 Joule pro Quadratmeter, gemessen nach dem biologisch gewichteten Erythemspektrum.

Ein wirksamer beruflicher Sonnenschutz erfordert eine Kombination aus technischen, organisatorischen und persönlichen Maßnahmen, um die kumulativen UV-Dosen zu reduzieren. Die Risikowahrnehmung in dieser Gruppe ist jedoch oft unzureichend, was eine gezielte Aufklärung notwendig macht. Künftig wird eine verstärkte arbeitsdermatologische Fokussierung auf Prävention erwartet, da mit steigenden Fallzahlen die dermato-onkologische Versorgung weiter belastet wird. (Symanzik and John, 2022)

3.4.1. Zwillingsstudien: Der Langzeiteffekt von Sonnenschutz auf Hautalterung

„Während des Twins Day Festivals in Twinsburg, Ohio, füllten 186 Paare eineiiger Zwillinge einen umfassenden Fragebogen aus, und digitale Bilder wurden aufgenommen. Ein Gremium überprüfte die Bilder unabhängig voneinander und dokumentierte die Unterschiede im wahrgenommenen Alter der Zwillinge sowie in ihren Gesichtszügen.“ (Guyuron et al., 2009, p. 1321) Die Analyse ergab, dass die erhöhte Sonnenexposition von Zwillingen, insbesondere bei Outdoor-Aktivitäten ohne adäquaten Sonnenschutz, im direkten Vergleich zu einem signifikant älteren Aussehen führte. Es konnte eine deutliche Zunahme dieses Effekts mit zunehmendem Alter beobachtet werden ($p = 0,015$).

Demgegenüber wiesen Zwillinge, die regelmäßig Sonnenschutzmittel applizierten, ein signifikant jüngeres Hautbild auf. Diese Ergebnisse stützen die Hypothese, dass ein konsequenter UV-Schutz die lichtbedingte Alterung der Haut verlangsamt.

Zudem wurde ein Zusammenhang zwischen erhöhter Sonnenexposition und weiteren Hautveränderungen aufgezeigt. Zwillingspaare, bei denen Hautkrebs diagnostiziert wurde, wiesen demnach signifikant ausgeprägtere Gesichtsfalten ($p = 0,05$) und eine reduzierte Haardichte ($p = 0,005$) auf. Es wurde festgestellt, dass Personen mit starker UV-Exposition häufiger Pigmentstörungen entwickeln. (Guyuron et al., 2009)

„Zwillingstudien, insbesondere solche mit monozygoten Zwillingen, erleichtern die Analyse von Faktoren, die die Hautalterung beeinflussen, während gleichzeitig Alter, Geschlecht und genetische Anfälligkeit kontrolliert werden. Am Osaka Twin Research Center unterzogen sich weitere 67 Paare von MZ-Zwillingen medizinischen Interviews und fotografischen Bewertungen unter Verwendung des VISIA® Complexion Analysis Systems.“ (Ichibori et al., 2014, p. 158)

Ziel der Untersuchung war die objektive Evaluation des Einflusses umweltbedingter Faktoren, insbesondere der UV-Exposition und des Einsatzes von Schutzmaßnahmen, auf sichtbare Merkmale der Gesichtshaut. Das standardisierte VISIA®-System erfasste Hautveränderungen wie Falten, Textur, Pigmentflecken und Erytheme präzise.

Die Auswertung ergab, dass sich Unterschiede in der Hautbeschaffenheit mit zunehmendem Alter verstärkten. Die vorliegende Studie ergab, dass bei der Verwendung von Sonnenschutzprodukten wie Sonnencreme oder Foundation bei Zwillingen im Vergleich zu ihren ungeschützten Geschwistern eine glattere Hautoberfläche und weniger Falten zu beobachten waren. Fehlender UV-Schutz resultierte hingegen in einer signifikanten Zunahme vorzeitiger Alterungszeichen. Zudem wurde belegt, dass auch das Rauchen schädliche Auswirkungen auf die Haut besitzt. Dieser Einfluss wurde durch einen unzureichenden Sonnenschutz noch verstärkt.

Untersuchungen anderer Faktoren, wie etwa des Alkoholkonsums, hormoneller Therapien oder des Body-Mass-Index, ergaben hingegen keine signifikanten Korrelationen zu den

gemessenen Hautparametern. Die Studie betont insgesamt, dass UV-Strahlung, insbesondere ohne ausreichenden Schutz, der zentrale externe Faktor der extrinsischen Hautalterung ist. Es lässt sich daraus ableiten, dass präventive Maßnahmen, insbesondere die konsequente Anwendung von Sonnenschutzmitteln, von essenzieller Bedeutung sind, um lichtbedingte Hautschäden zu vermeiden und das Risiko dermatologischer Erkrankungen langfristig zu reduzieren. (Ichibori et al., 2014)

3.4.2. Prävention von lichtinduzierten Hautschäden und Hautkrebs

Die Anwendung von Sonnenschutzmitteln ist mit einer Vielzahl gesundheitlicher Vorteile assoziiert. „Die regelmäßige Anwendung von Sonnenschutzmitteln verhindert die Entwicklung von aktinischer Keratose (AK), Plattenepithelkarzinom (SCC), Melanom und lichtbedingter Hautalterung (Photoaging).“ (Mancebo et al., 2014a, p. 427, eigene Übersetzung) „Darüber hinaus gibt es Hinweise, dass Sonnenschutzmittel das Auftreten vorzeitiger Hautalterung verringern und das Wiederaufflammen von Photodermatosen verhindern können.“ (Mancebo et al., 2014a, p. 428)

Einen entscheidenden Beitrag zum heutigen Wissen über die protektiven Effekte von Sonnenschutzmitteln leistete die Nambour Skin Cancer Prevention Trial-Studie in Australien. In der im Jahr 1992 initiierten Studienreihe wurde ein Sonnenschutzpräparat mit Lichtschutzfaktor 16 verwendet, welches 2 % 4-tert-Butyl-4'-methoxy-4-dibenzoylmethan (Avobenzon) und 8 % 2-Ethylhexyl-p-methoxycinnamat (Octinoxat) enthielt. Obwohl diese Formulierung als photoinstabil klassifiziert wurde und nicht den heutigen FDA-Kriterien für die Kennzeichnung als "Breitband-Sonnenschutz" entsprach, konnte eine signifikante Senkung der Hautkrebsinzidenz nachgewiesen werden. Es kann abgeleitet werden, dass moderne Sonnenschutzmittel mit höherem Lichtschutzfaktor und breiterem Schutzspektrum potenziell noch größere gesundheitliche Vorteile bieten. (Mancebo et al., 2014b)

Nach der Definition der Internationalen Agentur für Krebsforschung (IARC) beinhaltet die Primärprävention alle Maßnahmen, die das Risiko einer Krebserkrankung beim Menschen senken. Sie kann sowohl auf individueller als auch auf gesellschaftlicher Ebene umgesetzt werden und sollte Bestandteil einer ganzheitlichen Strategie sein. Zu den relevanten Faktoren zählen in diesem Zusammenhang institutionelle, staatliche und gesellschaftliche

Präventionsrichtlinien, die Einführung von Normen und Standards sowie die Umsetzung konkreter Schutzmaßnahmen.

Der Ausgangspunkt der Primärprävention ist eine systematische Gefährdungsbeurteilung, die einer regelmäßigen Überprüfung und Anpassung unterliegt. Auf dieser Grundlage können adäquate Maßnahmen selektiert werden, wobei technische Lösungen, wie etwa bauliche oder ausrüstungsbezogene Schutzmaßnahmen, Priorität genießen. Ergänzend spielen kollektive Ansätze, wie gezielt entwickelte gesundheitspädagogische Schulungsprogramme, eine Schlüsselrolle. Insbesondere bei Personen, die im Freien arbeiten, ist es von essenzieller Bedeutung, die Gesundheitsaufklärung zu intensivieren, um das Bewusstsein für die arbeitsbedingte UV-Belastung zu schärfen und das Risikoverständnis zu fördern.

Gemäß der IARC fokussiert sich Sekundärprävention in erster Linie auf die Früherkennung und das Screening, mit dem Ziel, präkanzeröse Hautveränderungen oder frühe Stadien von Hautkrebs frühzeitig zu identifizieren. Im beruflichen Kontext umfasst dies insbesondere die arbeitsmedizinische Überwachung von Beschäftigten, die regelmäßig solarer UV-Strahlung ausgesetzt sind. Risikogruppen, zu denen insbesondere Menschen mit hellem Hauttyp (Phototyp I und II), Personen unter Hydrochlorothiazid-Therapie oder immunsupprimierte Beschäftigte zählen, sollten dabei besonders berücksichtigt werden. Regelmäßige arbeitsmedizinische Untersuchungen, ergänzt durch dermatologische Kontrollen bei Bedarf, sind zentrale Instrumente in diesem Bereich.

Der Terminus "Tertiärprävention" bezeichnet Maßnahmen, die nach dem Auftreten gesundheitlicher Schäden ergriffen werden. Das Ziel der Maßnahmen ist die sichere Rückkehr an den Arbeitsplatz, die Wiederherstellung der Arbeitsfähigkeit, die Sicherung einer guten Lebensqualität sowie gegebenenfalls die Gewährung von Entschädigungen. Hierzu zählen medizinische und berufliche Rehabilitationsmaßnahmen, insbesondere für Beschäftigte, die aufgrund von UV-bedingtem Hautkrebs behandelt wurden, sowie Maßnahmen zur Wiedereingliederung in den Berufsalltag. (Symanzik and John, 2022)

Untersuchungen zeigen, dass zu den aktuell empfohlenen Maßnahmen zum Schutz vor übermäßiger Sonneneinstrahlung das Tragen geeigneter Kleidung und von

Kopfbedeckungen sowie die Anwendung von Sonnenschutzpräparaten mit hohem Lichtschutzfaktor gehören. Zudem wird empfohlen, längere Aufenthalte in der prallen Mittagssonne zu vermeiden. Moderne Breitband-Sonnenschutzmittel, die derzeit im Handel verfügbar sind, schützen in der Regel sowohl vor UVB- als auch vor UVA-Strahlen. Aber auch SL und IR haben einen Einfluss auf die Haut und sollten deshalb auch in einem qualitativ hochwertigen Sonnenschutzprodukt so gut wie möglich gedeckt sein. (Gilaberte et al., 2025)

3.5. Wechselwirkungen zwischen Sonnenschutzmitteln und dem Hautmikrobiom

Die Haut fungiert als physische, chemische und immunologische Schutzbarriere zwischen dem Körper und seiner Umwelt. In der Haut lebt eine große Anzahl kommensaler Mikroorganismen, die zusammen als Mikrobiota bezeichnet werden. Der Begriff umfasst die Gesamtheit des genetischen Materials aller auf der Haut lebenden Mikroben. Zusammen mit der Haut bildet die Mikrobiota das Mikrobiom, das als erste Verteidigungslinie des menschlichen Körpers gegen äußere Einflüsse und Krankheitserreger fungiert.

Das Hautmikrobiom unterliegt einem kontinuierlichen Prozess der Ko-Evolution. Eine gesunde Mikrobiota trägt wesentlich zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichts im Organismus bei, indem sie lebenslang an der Abwehr von sogenannten Exposom-Faktoren beteiligt ist. Unter dem Exposom werden sämtliche äußeren und inneren Einflüsse verstanden, denen der Körper im Laufe seines Lebens ausgesetzt ist. Zu den relevanten Einflussfaktoren zählen insbesondere Sonnenstrahlung, Chemikalien, Schadstoffe, Tabakrauch, Lebensstilfaktoren, Ernährungsgewohnheiten sowie Krankheitserreger.

Ein Ungleichgewicht im Mikrobiom kann durch Exposom-Faktoren induziert werden, darunter Medikamente wie Antibiotika oder Antiseptika, Ernährungsweisen, Routinen der Hautpflege, körperliche Aktivität, Umweltverschmutzung, klimatische Bedingungen sowie Sonneneinstrahlung. Solche Störungen, die in der Fachliteratur als Dysbiose bezeichnet werden, können zu entzündlichen Hauterkrankungen führen und möglicherweise auch Hautkrebs, einschließlich Melanomen, begünstigen. Zudem sind Exposom-Faktoren an

lichtbedingter Hautalterung, Hyperpigmentierungen und weiteren Photodermatosen beteiligt, insbesondere an sonnenexponierten Hautarealen. (Gilaberte et al., 2025)

Sonnenschutzpräparate können in Wechselwirkung mit dem Hautmikrobiom treten, wobei das Ausmaß und die Art der Effekte maßgeblich von der spezifischen Zusammensetzung und den eingesetzten UV-Filtern bestimmt werden. Untersuchungen deuten darauf hin, dass einzelne Filterstoffe und Bestandteile der Emulsion bakterizide Eigenschaften besitzen und dadurch die mikrobielle Vielfalt der Haut beeinflussen können. In der Regel sind diese Veränderungen jedoch gering und betreffen vor allem die relative Häufigkeit einzelner Mikroorganismen. Untersuchungen zufolge zeigen Bakterienarten wie *Cutibacterium acnes* und *Staphylococcus epidermidis* bei gängigen Formulierungen keine relevanten Veränderungen. (Arantes et al., 2024)

Sonnenschutzmittel können die Haut schützen, indem sie das natürliche Gleichgewicht der Hautmikroorganismen vor den schädlichen Auswirkungen von UV-Strahlung bewahren. So bleiben die normalen Wechselwirkungen im Hautökosystem erhalten und oxidativer Stress sowie Störungen im mikrobiellen Gleichgewicht können verringert werden. (Jacques et al., 2024; Schuetz et al., 2024) Es sei darauf hingewiesen, dass die Stabilisierung nützlicher Mikroorganismen wie *Lactobacillus crispatus* durch Sonnenschutzpräparate besonders hervorgehoben wird. (Schuetz et al., 2024) Bisher existieren zudem keine überzeugenden Hinweise darauf, dass handelsübliche Produkte bei gesunden Personen relevante Dysbiosen verursachen oder Hauterkrankungen wie Akne begünstigen. (Arantes et al., 2024)

In der aktuellen Fachliteratur wird die Empfehlung ausgesprochen, Sonnenschutzmittel so zu entwickeln, dass sie nicht nur einen effektiven Schutz vor UV-Strahlung gewährleisten, sondern gleichzeitig die Diversität und Funktionalität des Hautmikrobioms möglichst bewahren. (Carvalho et al., 2023; Grant et al., 2024) Die Entwicklung von "mikrobiomfreundlichen" Formulierungen gilt dabei als vielversprechender Ansatz, um Hautgesundheit und UV-Schutz langfristig in Einklang zu bringen. Neue Ansätze verfolgen den Einsatz von Sonnenschutzpräparaten, die zusätzlich Prä- oder Probiotika enthalten und so das mikrobielle Gleichgewicht bewahren könnten. (Gilaberte et al., 2025)

„Zusätzlich zu topischen Sonnenschutzmitteln könnte die Verwendung oraler photoprotektiver Supplemente, die reich an Antioxidantien wie Polypodium-leucotomos-Extrakt und grünem Tee sind, eine entscheidende Rolle bei der Abschwächung der durch Sonneneinstrahlung verursachten Dysbiose spielen und somit ein gesünderes Hautmikrobiom aufrechterhalten.“ (Gilaberte et al., 2025, p. 46)

3.6. Geschlechtsspezifische Unterschiede im Sonnenschutzverhalten

Untersuchungen zeigen, dass Frauen im Vergleich zu Männern ein bewussteres und konsequenteres Sonnenschutzverhalten aufweisen. Die Verwendung von Sonnenschutzmitteln erfolgt häufiger und regelmäßiger, das Wissen über deren Anwendung und Eigenschaften ist besser, und es besteht eine größere Bereitschaft, das Verhalten bei Bedarf anzupassen. Frauen geben signifikant häufiger an, dass sie Sonnencreme täglich oder bei Aktivitäten im Freien nutzen, und sind besser über Aspekte wie Haltbarkeit und korrekte Auftragsmenge informiert. (Falk and Anderson, 2013; Görig et al., 2018; Haluza et al., 2016; Lee et al., 2015; Lim et al., 2024)

Männer hingegen tendieren dazu, eher physische Schutzmaßnahmen, wie das Tragen von Hüten oder langärmeliger Kleidung, zu ergreifen, verwenden jedoch deutlich seltener Sonnenschutzmittel und zeigen insgesamt eine geringere Motivation zur Verhaltensänderung. (Diehl et al., 2023; Görig et al., 2018; Holman et al., 2018; Lawler et al., 2007) Darüber hinaus neigen Männer häufiger dazu, Sonnenschutzmaßnahmen zu vernachlässigen oder sie als zu aufwendig zu erachten, was ihre Adhärenz verringert. (Lim et al., 2024) In beruflichen Situationen, insbesondere bei Tätigkeiten im Freien, wird vermehrt schützende Kleidung von Männern getragen, während Frauen tendenziell eher auf Sonnencreme zurückgreifen. (Diehl et al., 2023)

Die Beweggründe für die Anwendung von Sonnenschutzmitteln unterscheiden sich zwischen den Geschlechtern. Frauen geben in der Regel den Wunsch nach einem gepflegten Hautbild und der Vorbeugung vorzeitiger Hautalterung als Beweggrund an. Bei Männern steht hingegen der Schutz vor Hautkrebs im Vordergrund, wobei diese Motivation jedoch weniger konsequent umgesetzt wird. (C. Roberts et al., 2021)

Hautkrebs stellt in den USA die am häufigsten diagnostizierte Krebsart dar. Jährlich erhalten über fünf Millionen Menschen die Diagnose, wobei etwa jede fünfte Person bis zum 70. Lebensjahr erkrankt. NMSC, wie Basalzell- und Plattenepithelkarzinome, weisen eine höhere Inzidenz auf als Melanome. Hinsichtlich beider Hautkrebsarten ist ein überproportionales Auftreten bei Männern zu verzeichnen, wobei die jeweilige ethnische Zugehörigkeit keine signifikante Auswirkung zu haben scheint. Als mögliche Ursache „zeigt die Forschung, dass Männer anfälliger für UV-induzierte Immunsuppression sind und dass ihre Haut nicht so gut wie die von Frauen auf Umweltstressoren wie UV-Strahlung reagiert.“ (Roberts et al., 2021, Introduction, eigene Übersetzung) Gemäß der American Cancer Society entfallen rund 60 % der neuen Hautkrebsfälle (exklusive NMSC) und nahezu 70 % der Todesfälle (2019) auf männliche Personen. Die Mehrheit dieser Erkrankungen wäre durch geeignete Schutzmaßnahmen vermeidbar. Dennoch nutzen Männer Sonnenschutz seltener als Frauen. (C. A. Roberts et al., 2021)

Parallel dazu legen aktuelle Daten nahe, dass jedoch Frauen Solarien signifikant häufiger nutzen als Männer. Für Deutschland wurde im Jahr 2022 eine Ein-Jahres-Prävalenz von 5,1 % berichtet, wobei die typische Nutzergruppe vor allem aus Frauen mittleren Alters mit höherem Bildungsgrad besteht. Vergleichbare Entwicklungen lassen sich auch international feststellen: In den USA sank der Anteil der Frauen, die Indoor-Tanning nutzen, zwischen 2007 und 2018 von 14 % auf 4 %, während bei Männern im gleichen Zeitraum ein Rückgang von 5 % auf 4 % beobachtet wurde. Obwohl ein Rückgang zu verzeichnen ist, zeigt sich weiterhin ein deutlicher Unterschied zwischen den Geschlechtern hinsichtlich des Besuchs von Solarien. (Bowers et al., 2020; Centers for Disease Control and Prevention (CDC), 2012; Diehl et al., 2024)

Auch aus Italien und weiteren europäischen Ländern liegen Daten vor, die eine signifikant höhere Nutzung durch Frauen bestätigen. (Mastroeni et al., 2021; Rodriguez-Acevedo et al., 2020) Eine repräsentative Untersuchung in Deutschland ergab zudem, dass 49 % der Frauen und 29,8 % der Männer angaben, mindestens einmal ein Solarium besucht zu haben; bei der aktuellen Nutzung gaben 17,7 % der Frauen und 11,7 % der Männer an, dies regelmäßig zu tun. (Schneider et al., 2013) Die Beweggründe unterscheiden sich ebenfalls: Während Männer seltener konkrete Motive angeben, werden seitens der Frauen vor allem der Wunsch nach gesteigerter Attraktivität und nach Entspannung genannt. (Diehl et al., 2024; Schneider et al., 2013) Interessant ist auch, dass sich der Begriff „Tanorexie“

mittlerweile etabliert hat und eine Sucht nach Bräune, die mit einer Häufung von Solariumbesuchen einhergeht, beschreibt. (Schmidt-Borko, 2011)

Gemäß Prognosen werden Melanome bis zum Jahr 2040 (ohne NMSC) die häufigste Krebsart bei Männern in den USA sein. Es konnte festgestellt werden, dass männliche Patienten nicht nur eine höhere Inzidenz aufweisen, sondern auch eine tendenziell ungünstigere Behandlungsentwicklung. Verhaltensfaktoren spielen eine zentrale Rolle, wobei folgende Punkte zu nennen sind: ein geringer Sonnenschutz, das Tragen von unzureichender Schutzkleidung sowie eine kaum vorhandene Verhaltensanpassung nach Diagnose. In Querschnittsbefragungen wird ersichtlich, dass Männer viel Zeit im Freien verbringen und in der Regel eine positive Einstellung zu Bräune aufweisen, obwohl ihre Haut häufig zu Sonnenbrand neigt. Positive Haltungen bezüglich der Bräunung korrelieren mit einer erhöhten Sonnenexposition und einem geringeren Schutz.

In diesem Kontext kann ärztliche Beratung eine signifikante Intervention darstellen. Die Kombination aus Beratung und kostenloser Produktverteilung hat sich insbesondere bei älteren Männern als effektiv erwiesen. Auch verbale Aufklärung kann dazu beitragen, riskante Einstellungen zu verändern. Community-Maßnahmen, wie sie beispielsweise an Golfplätzen umgesetzt werden, oder multimediale Kampagnen zeigen in spezifischen Kontexten Wirkung, adressieren jedoch häufig Jugendliche. Für erwachsene Männer fehlen geeignete Strategien, wobei moderne Kommunikationswege wie Social Media potenziell eine Lösung darstellen könnten. (Adams et al., 2021)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Frauen insgesamt informierter und konsequenter im Umgang mit Sonnenschutz sind, während Männer eher auf physische Schutzformen setzen, diese jedoch weniger umfassend anwenden. Diese geschlechtsspezifischen Unterschiede manifestieren sich in unterschiedlichen Ländern in ähnlicher Weise und sollten in Präventions- und Aufklärungskampagnen gezielt berücksichtigt werden. (Görig et al., 2018; Haluza et al., 2016; Lim et al., 2024)

3.7. Verbreitete Mythen und wissenschaftliche Fakten

Trotz der breiten Verfügbarkeit und fundierter wissenschaftlicher Evidenz zu Wirksamkeit und Sicherheit von Sonnenschutzmitteln bestehen in der Bevölkerung zahlreiche

Fehlannahmen. Diese reichen von der Unterschätzung bestimmter Strahlungskomponenten bis hin zu unbegründeten Bedenken gegenüber Inhaltsstoffen. Zudem ist festzustellen, dass sich die öffentliche Wahrnehmung häufig auf UVB-Strahlung beschränkt, obwohl auch UVA, sichtbares Licht und Infrarotstrahlung nachweislich Einfluss auf die Hautgesundheit haben. Neuere Formulierungen berücksichtigen daher zunehmend den Schutz vor genau diesen Strahlungsarten.

In diesem Zusammenhang ist es entscheidend, gängige Mythen zu erkennen, kritisch zu hinterfragen und anhand aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse zu bewerten. Im Folgenden werden daher gängige Fehlinformationen zum Thema Sonnenschutz analysiert und mit wissenschaftlichen Fakten abgeglichen. (Bennett and Khachemoune, 2022)

3.7.1. „Personen mit dunklem Hauttyp benötigen keinen Sonnenschutz“

Menschen mit dunkler Haut verfügen über einen höheren Gehalt an Eumelanin, was ihre Empfindlichkeit gegenüber UVB-bedingten Hautschäden reduziert und die Entwicklung eines Sonnenbrands verzögert. Es konnte festgestellt werden, dass der Schutz nur eine begrenzte Wirksamkeit aufweist. UV-Strahlung kann in allen Hauttypen DNA-Schäden verursachen. Bereits bei einer minimalen UV-Exposition können genetische Veränderungen auftreten, die einem Rekombinationsausmaß von etwa 1 Morgan entsprechen. Dieser Effekt ist insbesondere bei sehr dunkler Haut zu beobachten. (Bennett and Khachemoune, 2022) Die Morgan-Einheit ist ein Maß für die Bestimmung der genetischen Distanz zwischen Genorten auf einem Chromosom in der Genetik. Sie ist benannt nach dem Genetiker Thomas Hunt Morgan, der Anfang des 20. Jahrhunderts die genetische Kopplung beschrieb. Im Unterschied zu physikalischen Maßeinheiten wie Nanometern oder Basenpaaren basiert die Morgan-Einheit nicht auf einer festen Länge, sondern auf der Wahrscheinlichkeit von Rekombinationsereignissen (Crossing-over) zwischen zwei Loci. Vereinfacht ausgedrückt beschreibt sie, wie häufig Gene während der Meiose durch Crossing-over voneinander getrennt und dadurch unabhängig vererbt werden. (Hirsch-Kauffmann and Schweiger, 2006) Eine in-situ-Studie ergab zudem, dass die Menge an DNA-Schäden nach Erreichen der MED umgekehrt proportional zum Melaningehalt ist. Es ist auffällig, dass in ethnischen Gruppen mit niedrigerer Inzidenz des

Malignen Melanoms die Diagnose häufig erst in fortgeschrittenen Stadien gestellt wird. Dies ist mit einer ungünstigeren Prognose assoziiert. (Bennett and Khachemoune, 2022)

Neben UVB-Strahlung sind auch andere Spektralbereiche des Sonnenlichts von entscheidender Bedeutung. Neuere Untersuchungen belegen, dass sichtbares Licht, insbesondere in Kombination mit UVA1-Strahlung, bei Menschen mit dunklerer Haut (Fitzpatrick IV–VI) zu einer deutlichen Verstärkung der Pigmentierung sowie zu unmittelbaren Erythemen führt. Demgegenüber wurde bei alleiniger Bestrahlung mit sichtbarem Licht keine Rötung beobachtet. Auf der anderen Seite wiesen hellere Hauttypen (Fitzpatrick I–III) unter identischer kombinierter Bestrahlung lediglich eine Erythemreaktion ohne vermehrte Pigmentbildung auf. Diese Ergebnisse betonen die Signifikanz wellenlängen- und hauttypabhängiger photobiologischer Reaktionen und unterstreichen die Notwendigkeit differenzierter Photoprotektionsstrategien. (Pellacani et al., 2024b)

Die Hypothese, dass eine dunkle Pigmentierung der Haut einen adäquaten Schutz vor allen relevanten Strahlungsarten bietet, wurde widerlegt. Eumelanin gewährleistet keinen umfassenden Schutz vor UVA, hochenergetischem sichtbarem Licht (HEVL) sowie Infrarotstrahlung. Diese Strahlungsanteile tragen maßgeblich zu lichtbedingten Hautveränderungen bei, die sich bei dunkler Haut häufig in Form von Hyperpigmentierungen, Melasma oder postinflammatorischer Hyperpigmentierung äußern. Derartige Veränderungen können nicht nur als kosmetisch störend empfunden werden, sondern können auch zu psychosozialen Belastungen führen. (Krutmann et al., 2023)

Für den praktischen Einsatz sind Sonnenschutzmittel mit mindestens LSF 30 und hohem UVA-Schutz zu empfehlen. Die Schutzwirkung wird durch Pigmente, die SL blockieren, wie Eisenoxide und antioxidative Inhaltsstoffe zusätzlich erhöht. Ein wiederkehrendes Problem in der Anwendung ist jedoch der kosmetische Effekt physikalischer Filter, wie beispielsweise Zinkoxid oder Titandioxid, der auf dunkler Haut einen sichtbaren weißen Film hinterlässt. Moderne, transparente oder getönte Formulierungen, die an verschiedene Hauttöne angepasst sind, verbessern die Akzeptanz signifikant. Eine kultursensible Aufklärung in Bevölkerungsgruppen, in denen Hautkrebs als selten wahrgenommen wird,

ist von entscheidender Bedeutung, um das Bewusstsein für die Prävention lichtbedingter Hautschäden zu stärken. (Tsai and Chien, 2022)

3.7.2. „Bewölkung und Innenräume bieten ausreichenden UV-Schutz“

Es herrscht die weitverbreitete Annahme, dass Wolken einen signifikant höheren Schutz vor ultravioletter Strahlung bieten, als es tatsächlich der Fall ist. Gemäß den Angaben der WHO können bis zu 80 Prozent der UV-Strahlung die Wolkenschichten durchdringen. (Bennett and Khachemoune, 2022) Obwohl die Intensität der Strahlung subjektiv als geringer wahrgenommen wird, ist die Möglichkeit einer Schädigung der Haut weiterhin gegeben. Der kumulative Effekt wiederholter UV-Exposition, selbst an trüben Tagen, trägt langfristig zur Hautalterung und zum Hautkrebsrisiko bei. (Coats et al., 2021)

Auch bei überwiegender Tätigkeit in Innenräumen kann eine relevante Exposition gegenüber langwelliger UVA-Strahlung und Infrarotstrahlung auftreten. Diese entsteht vor allem durch ungefilterte Strahlung, die durch Fensterflächen in Gebäuden und Fahrzeugen eindringen kann. Während handelsübliches Glas in Wohn- und Arbeitsbereichen die Absorption von UVB-Strahlung weitgehend gewährleistet, werden UVA-Strahlen in erheblichem Umfang durchgelassen. Die Intensität der in Innenräume eindringenden UV-Strahlung wird durch die Beschaffenheit und Dicke des Glases bestimmt. Sie kann Werte zwischen 0,1 % und 72 % erreichen. Untersuchungen zeigen, dass Fahrzeugführer auf der dem Fenster zugewandten Körperhälfte signifikant häufiger Zeichen chronischer Lichtschädigung wie aktinische Keratosen, nichtmelanozytäre Hautkarzinome und Melanoma in situ aufweisen. In Anbetracht dessen wird die Integration von Sonnenschutzmitteln in die tägliche Routine der Hautpflege empfohlen, auch bei bewölktem Wetter und überwiegend geschlossenen Räumen. (Bennett and Khachemoune, 2022)

3.7.3. „Sonnenschutz hemmt die körpereigene Vitamin-D-Produktion“

Vitamin D, auch als Cholecalciferol (25(OH)D3) bezeichnet, spielt eine signifikante Rolle für die Aufrechterhaltung der Knochengesundheit, den Kalzium- und Phosphatstoffwechsel, die Stärkung des Immunsystems sowie möglicherweise die Prävention spezifischer Erkrankungen, zu denen Depressionen, Herz-Kreislauf-

Erkrankungen und bestimmte Krebsarten zählen. Die Hauptquelle ist die endogene Synthese in der Haut durch UVB-Strahlung im Wellenlängenbereich von 290–315 nm, bei der 7-Dehydrocholesterol in Prävitamin D₃ umgewandelt wird. Es konnte festgestellt werden, dass bis zu 90 % des täglichen Vitamin-D-Bedarfs eines Individuums durch diese Art der Aufnahme gedeckt werden. In der öffentlichen Wahrnehmung besteht jedoch die Sorge, dass ein konsequenter Sonnenschutz die Vitamin-D-Produktion hemmt und so zu einem Mangel führt. Theoretisch kann eine lückenlose und ausreichend dicke Sonnenschutzschicht die UVB-Strahlung blockieren und somit die Synthese reduzieren. (Bennett and Khachemoune, 2022) Empirische Studien zeigen jedoch, dass Sonnenschutz im Alltag selten in der empfohlenen Menge von 2 mg/cm² und flächendeckend aufgetragen wird. Dadurch wird weiterhin eine ausreichende Menge an UVB-Strahlung absorbiert, was die Synthese von Vitamin D ermöglicht. (Tatara et al., 2025)

Die wissenschaftliche Evidenz zu diesem Thema fällt differenziert aus. Experimentelle Laboruntersuchungen unter kontrollierter UV-Exposition legen nahe, dass Sonnenschutz den Anstieg von Vitamin-D-Serumwerten reduzieren kann. Beobachtungs- und Feldstudien zeigen hingegen meist keine signifikante Korrelation zwischen Sonnenschutzverwendung und Vitamin-D-Mangel. Teilweise wurden sogar höhere Spiegel bei Nutzer:innen festgestellt, was auf längere Aufenthalte im Freien trotz Schutz zurückgeführt wird. (Tatara et al., 2025) Auch randomisierte kontrollierte Untersuchungen berichten, dass es keine relevanten Unterschiede in den Vitamin-D-Spiegeln zwischen täglicher Sonnenschutzanwendung und situativer Nutzung gibt. Selbst bei konsequenter Anwendung eines Sonnenschutzes mit LSF 15 konnte in einer Untersuchung nach einwöchiger intensiver Sonnenexposition ein signifikanter Anstieg der 25(OH)D₃-Spiegel ohne Sonnenbrand verzeichnet werden. (Bennett and Khachemoune, 2022)

Ein signifikanter Einfluss von Photoprotektion auf den Vitamin-D-Status ist insbesondere bei Personen mit einer geringen UV-Exposition zu erwarten. Zu diesen zählen ältere Menschen, Personen mit dunklerer Hautfarbe, chronisch Kranke, Bewohner höherer Breitengrade sowie Menschen, die aus medizinischen Gründen, wie bei Photodermatosen, konsequent Sonnenschutz oder bedeckende Kleidung nutzen. (Tatara et al., 2025; Tran et al., 2023). Für diese Gruppen wird eine gezielte Supplementation oder der Konsum von

Vitamin-D-reichen Lebensmitteln wie fettreicher Fisch oder angereicherte Milchprodukte empfohlen. (Bennett and Khachemoune, 2022)

In der Bevölkerung besteht oftmals ein Zielkonflikt zwischen dem Schutz der Haut und der Versorgung mit Vitamin D. Obwohl der Nutzen von Sonnenschutzmaßnahmen hinlänglich bekannt ist, besteht gleichzeitig eine gewisse Unsicherheit bezüglich der Frage, ob diese mit einer ausreichenden Vitamin-D-Bildung vereinbar sind. In der Praxis wird von vielen Menschen gezielt Sonnenexposition zur Steigerung des Vitamin-D-Spiegels angestrebt, wobei jedoch auf ausreichende Photoprotektion verzichtet wird. Dies kann das Hautkrebsrisiko erhöhen. (Tran et al., 2023)

Empirische Studien zeigen, dass der Einfluss von Sonnenschutzmaßnahmen auf die Vitamin-D-Synthese des menschlichen Körpers unter realen Alltagsbedingungen in der Regel als gering einzustufen ist. Die Vorteile der Photoprotektion, insbesondere die Prävention von Hautkrebs und lichtbedingter Hautalterung, überwiegen deutlich das potenzielle Risiko einer verminderten Vitamin-D-Bildung. Eventuelle Defizite lassen sich einfach und sicher durch eine entsprechende Ernährung oder die Einnahme von Nahrungsergänzungsmitteln ausgleichen, ohne die Haut unnötiger UV-Strahlung auszusetzen. Eine zielgerichtete Aufklärungsmaßnahme bezüglich dieses Zusammenhangs kann dazu beitragen, den Zielkonflikt zwischen Hautschutz und Vitamin-D-Versorgung zu lösen. (Bennett and Khachemoune, 2022; Haddad et al., 2025; Tataru et al., 2025)

3.7.4. „Trotz zunehmender Nutzung von Sonnenschutzmitteln steigen die Hautkrebsfälle“

Es existieren verschiedene Erklärungsansätze dafür, weshalb die Melanomraten trotz der in den letzten Jahrzehnten gestiegenen Verwendung von Sonnenschutzmitteln weiterhin zunehmen. (Lapides et al., 2023) Ein möglicher Erklärungsansatz wird in der gestiegenen diagnostischen Aufmerksamkeit und den verbesserten Methoden der Früherkennung gesehen. Dadurch werden insbesondere mehr frühe Stadien wie dünne oder in situ Melanome erfasst, was die Inzidenz erhöht, ohne dass dies in gleichem Maße zu einem Anstieg der Mortalität führt. (Adamson et al., 2022; Lashway et al., 2021; Leiter et al., 2020)

Ein weiterer Aspekt, der in diesem Zusammenhang zu berücksichtigen ist, ist die Beobachtung, dass die Verwendung von Sonnenschutzmitteln oft zu längeren Aufenthalten in der Sonne führt. Dies kann zu unerwünschten Konsequenzen führen, wenn die Schutzprodukte nicht in ausreichender Menge oder nicht in regelmäßigen Abständen nachgetragen werden. Unter diesen Bedingungen ist eine Steigerung der kumulativen UV-Exposition zu verzeichnen, was das Risiko von Hautschäden und Hautkrebs trotz Schutzmaßnahmen potenziell erhöhen kann. (Lapides et al., 2023)

Epidemiologische Studien deuten außerdem darauf hin, dass sich das Freizeitverhalten in den vergangenen Jahrzehnten erheblich gewandelt hat. Die Zunahme von Outdoor-Aktivitäten und die verstärkte, intensive Sonneneinstrahlung, insbesondere in jüngeren Altersgruppen, haben zu einer erhöhten Gesamtbelastung durch UV-Strahlung geführt. Gerade diese unregelmäßige, aber intensive Bestrahlung gilt als besonders relevant für das Melanomrisiko. (Lashway et al., 2021; Leiter et al., 2020; Olsen et al., 2024)

Ein weiterer Aspekt, der in diesem Zusammenhang zu berücksichtigen ist, betrifft die Tatsache, dass Sonnenschutzprodukte vor 1990 häufig keinen ausreichenden Schutz gegen UVA-Strahlen boten. Erst im Jahr 2011 wurden in den USA durch die FDA verbindliche Standards für die Kennzeichnung von "Breitband"-Sonnenschutz festgelegt. Studien, die vor diesem Zeitpunkt durchgeführt wurden, basieren demnach auf Produkten mit einer geringeren Schutzwirkung. In der Folge ist die Aussagekraft dieser Studien hinsichtlich des tatsächlichen Nutzens heutiger Sonnenschutzmittel begrenzt.

Darüber hinaus gibt es Hinweise darauf, dass bestimmte chemische UV-Filter reaktive Sauerstoffspezies bilden können, die in der Folge DNA-Schäden verursachen. In Regionen wie Europa, in denen Sonnenschutzmittel als Kosmetika klassifiziert werden, unterliegen die regulatorischen Vorgaben für die Inhaltsstoffe weniger strengen medizinischen Standards. Die vorliegenden potenziellen Effekte verdeutlichen die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Überwachung und Optimierung von Formulierungen und UV-Filtern, um potenzielle Risiken zu minimieren.

Des Weiteren ist der Klimawandel als Einflussfaktor zu nennen. Es konnte festgestellt werden, dass steigende Durchschnittstemperaturen und ein höherer UV-Index die

Zeiträume, in denen Menschen potenziell intensiver Sonnenstrahlung ausgesetzt sind, verlängern. Zudem fördern mildere Winter- und Übergangstemperaturen die Bereitschaft, sich in den Außenbereichen aufzuhalten, in denen die Sonnenexposition früher deutlich geringer war. (Lapides et al., 2023)

Abschließend lässt sich festhalten, dass Sonnenschutzmittel zwar einen wichtigen Beitrag zum Schutz vor UV-Strahlung leisten, jedoch konnte festgestellt werden, dass kein Präparat 100 % der UV-Strahlen blockiert. (Bennett and Khachemoune, 2022) Zahlreiche Studien betonen daher, dass Sonnenschutz ein zentraler Baustein der Prävention bleibt, jedoch nur in Kombination mit weiteren Maßnahmen. Eine signifikante Reduktion der UV-Exposition in Kombination mit angepassten Verhaltensmustern ist daher von entscheidender Bedeutung, um den Anstieg der Hautkrebsraten nachhaltig einzudämmen. (McKenzie et al., 2023; Young, 2023)

3.7.5. „Sonnenschutzmittel begünstigen das Auftreten von frontal fibrosierender Alopezie“

Aktuelle wissenschaftliche Publikationen deuten auf einen möglichen Zusammenhang zwischen der Verwendung von Sonnenschutzmitteln und dem Auftreten einer frontal fibrosierenden Alopezie (FFA) hin, auch wenn ein ursächlicher Beleg bislang fehlt. Eine systematische Übersichtsarbeit mit Metaanalyse zeigte jedoch, dass die Anwendung von Gesichtssonnenschutzprodukten mit einem deutlich erhöhten Risiko für FFA verbunden ist (OR 3,02; 95 % CI 1,67–5,47). (Kam et al., 2023) Auch Fall-Kontroll-Studien und weitere umfassende Literaturarbeiten diskutieren diesen möglichen Zusammenhang, insbesondere im Kontext von langjährig verwendeten Leave-on-Produkten. (Melián-Olivera et al., 2025; Messenger et al., 2025) Eine jüngere Analyse von neun Studien mit 1248 FFA-Patient:innen und 1459 Kontrollen ergab ein mehr als doppelt so hohes Risiko (OR 2,21) bei regelmäßiger Verwendung von Sonnenschutzmitteln. Ein spezifischer Inhaltsstoff konnte hierbei jedoch nicht als Auslöser identifiziert werden. Als mögliche Mechanismen werden lichenoide Immunreaktionen, ROS-Bildung durch Nanopartikel und hormonelle Einflüsse diskutiert. Zusätzlich wurde ein erhöhtes Risiko (OR 2,9) auch bei regelmäßiger Anwendung von Feuchtigkeitscremes festgestellt. (Pellacani et al., 2024b)

Ob die verstärkte Verwendung von Sonnenschutzmitteln eine Ursache oder vielmehr eine Folge der Erkrankung darstellt, bleibt jedoch zu klären. Eine Querschnittsstudie ergab, dass Personen mit FFA tendenziell häufiger Sonnenschutzmittel nutzen, jedoch zeigten sich keine signifikanten Unterschiede in den histopathologischen und trichoskopischen Befunden zwischen Anwendern und Nicht-Anwendern, was gegen eine direkte ursächliche Rolle spricht. (Porriño-Bustamante et al., 2022) Darüber hinaus existieren populationsbasierte Studien, in denen keine signifikante Verbindung zwischen dem Gebrauch von Sonnenschutzmitteln und FFA festgestellt werden konnte. (Leecharoen et al., 2021; Ramos et al., 2021)

Aktuelle Forschungsergebnisse legen nahe, dass Sensibilisierungen gegenüber bestimmten Inhaltsstoffen, wie etwa Ethylhexylsalicylat, bei den Betroffenen mit erhöhter Frequenz auftreten. Dies könnte ein Hinweis auf eine potenzielle Rolle von Kontaktallergenen als Auslösern sein. (Pastor-Nieto et al., 2024) In der wissenschaftlichen Literatur wird jedoch betont, dass der generelle Verzicht auf Sonnenschutzmittel nicht empfohlen werden kann, da das Risiko, an Hautkrebs zu erkranken, als signifikant höher eingestuft wird. (Owczarek et al., 2025)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass zwar eine Assoziation zwischen Sonnenschutzmitteln und FFA beschrieben ist, ein gesicherter ursächlicher Zusammenhang bislang jedoch fehlt. Zur Klärung der Pathogenese sind weitere prospektive Studien notwendig.

3.7.6. „Die Umwelt wird durch Sonnenschutzprodukte geschädigt“

Der Nachweis von UV-Filtern in verschiedenen Umweltkompartimenten ist mittlerweile umfassend dokumentiert. (Jesus et al., 2022) Schätzungen zufolge gelangen jährlich bis zu 14.000 Tonnen Sonnenschutzmittel in die Meere. (Adler, 2024) Messungen ergaben Konzentrationen im Nanogramm- bis Mikrogrammbereich pro Liter in Seen, Flüssen, Meerwasser, Sedimenten sowie aquatischen Organismen. Dies ist insbesondere auf den zunehmenden Einsatz photoprotektiver Produkte, insbesondere während der Ferienzeiten, zurückzuführen. (Jesus et al., 2022)

Gemäß aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen sind signifikante negative Auswirkungen von Sonnenschutzmitteln auf die Umwelt zu erwarten. Diese Auswirkungen werden insbesondere für Produkte mit organischen (chemischen) UV-Filtern wie Oxybenzon und Octinoxat beobachtet. Es konnte festgestellt werden, dass diese Verbindungen beim Baden oder über das Abwasser in aquatische Ökosysteme gelangen und sich dort anreichern. Untersuchungen legen nahe, dass sie Korallenbleiche verursachen, das Wachstum und die Entwicklung von Meeresorganismen wie Seeigeln, Algen und Fischen hemmen und potenziell endokrine, neurologische sowie entwicklungsbezogene Toxizität hervorrufen können. (Boyd et al., 2024; Chatzigianni et al., 2022; Hodge et al., 2025; Just-Sarobé, 2025; Lebaron, 2022; Sun et al., 2024; Varrella et al., 2022)

Bei Korallen ist eine besondere Empfindlichkeit gegenüber chronischer UV-Exposition sowie dem Kontakt mit Benzophenon-3 (BP-3) und EHMC zu beobachten. Diese können in der Folge zu Wachstumsstörungen, die oben genannte Korallenbleiche, Missbildungen oder gar zum Absterben führen. Auch die endosymbiontischen Zooxanthellen werden in Mitleidenschaft gezogen. Darüber hinaus sind weitere marine Organismen von den Auswirkungen betroffen. Algen zeigen Wachstumshemmungen und Pigmentverluste, Krebstiere wie *Artemia salina* eine erhöhte Mortalität bei hohen Konzentrationen, und Zebrafisch-Embryonen reagieren auf 4-MBC mit neurotoxischen Effekten, Fehlbildungen, reduzierter Herzfrequenz und veränderter Genexpression sowie Geschlechtsdifferenzierung. Regenbogenforellen zeigen bei Umweltkonzentrationen von EHMC oxidativen Stress und Stoffwechseleränderungen, ohne dass eine signifikante Mortalität zu verzeichnen ist. Die Analyse der Muscheln der Gattungen *Mytilus galloprovincialis* und *M. edulis* ergab eine Anreicherung von Octocrylen in hohen Konzentrationen (bis 7112 ng/g). Auch bei Delfinen (*Pontoporia blainvillei*) wurden Belastungen von 782 ng/g festgestellt. Diese Beobachtungen lassen auf eine Bioakkumulation und eine mögliche Biomagnifikation in der Nahrungskette schließen. (Jesus et al., 2022)

Auch als "umweltfreundlich" vermarktete Sonnenschutzmittel mit anorganischen UV-Filtern, etwa Zinkoxid oder Titandioxid, sind nicht frei von Risiken. Untersuchungen deuten darauf hin, dass deren Nanopartikel in Organismen akkumulieren, Metallionen

freisetzen und ROS bilden können. Dies kann wiederum zu Gewebeschäden und Entwicklungsstörungen bei Meereslebewesen führen. (Marcellini et al., 2024; Yuan et al., 2022)

In Reaktion auf diese Erkenntnisse haben verschiedene Länder und Regionen, darunter Hawaii, Palau, Bonaire sowie Teile der EU, bestimmte organische UV-Filter verboten, um die Belastung der Meeresumwelt zu verringern. (Lebaron, 2022) Fachpublikationen betonen jedoch, dass kontrollierte Langzeituntersuchungen notwendig sind, um die ökologischen Auswirkungen vollständig zu verstehen und die Entwicklung tatsächlich umweltverträglicher Alternativen voranzutreiben. (Hodge et al., 2025; Lebaron, 2022; Varrella et al., 2022)

Nicht außer Acht zu lassen ist jedoch, dass bislang keine standardisierten Testverfahren zur Bewertung der Korallentoxizität existiert. Gemäß der Meinung von einigen Expert:innen werden der Klimawandel und steigende Meerestemperaturen trotzdem weiterhin als Hauptursachen des globalen Korallensterbens angesehen, während Sonnenschutzfilter mutmaßlich lediglich einen additiven Effekt aufweisen. (Adler, 2024) Die Risiken variieren in Abhängigkeit des eingesetzten Filters und der Formulierung, wobei sowohl organische als auch anorganische UV-Filter potenziell schädigende Wirkungen entfalten können. (Chatzigianni et al., 2022; Hodge et al., 2025; Just-Sarobé, 2025; Marcellini et al., 2024; Sun et al., 2024; Varrella et al., 2022; Yuan et al., 2022) Neuere Entwicklungen, wie etwa die Modifikation anorganischer UV-Filterpartikel, wie sie in Eusolex® T2000 oder Optisol™ zu finden sind, zielen darauf ab, die Toxizität signifikant zu reduzieren. Diese oberflächenbeschichteten Varianten auf Basis von Zinkoxid bzw. Titandioxid könnten das Risiko für aquatische Organismen mindern, wobei der tatsächliche Nutzen weiterer unabhängiger Langzeituntersuchungen bedarf. (Jesus et al., 2022)

Diese Erkenntnisse unterstreichen nicht nur die Relevanz von Sonnenschutz für den Menschen, sondern verdeutlichen auch das erhebliche ökologische Risiko. Der „EcoSun Pass“ stellt in diesem Zusammenhang einen bedeutenden Fortschritt dar, da er die ökologische Bewertung von UV-Filtern in kosmetischen Formulierungen ermöglicht, potenziell umweltschädliche Substanzen frühzeitig identifiziert und die Entwicklung umweltverträglicher Alternativen fördert. (Jesus et al., 2022)

Abrundend ist festzustellen, dass aktuelle Studien nahelegen, dass auch Mikroplastik in Sonnenschutzmitteln ein relevantes Umwelt- und Gesundheitsproblem darstellt. In kosmetischen Formulierungen findet es Anwendung als Trägerstoff, Stabilisator oder Konsistenzgeber, wobei insbesondere "leave-on"-Produkte wie Sonnenschutzmittel bislang unzureichend untersucht sind und häufig mehrere Mikroplastikkomponenten enthalten. (Giustra et al., 2024; Kukkola et al., 2024) Untersuchungen zeigen, dass solche Produkte potenziell primäre sowie sekundäre Mikroplastikpartikel enthalten können, die durch UV-Strahlung und mechanische Belastung entstehen. Diese Prozesse können die Freisetzung toxischer Additive fördern und zelluläre Schäden wie oxidativen Stress und mitochondriale Fragmentierung verstärken. (Sun and Wang, 2025, 2023) In-vitro-Untersuchungen zeigen zudem eine Aufnahme und intrazelluläre Verteilung von Mikroplastikpartikeln. (Sun and Wang, 2024, 2023) Obwohl die Verwendung von Mikroplastik in Kosmetika zunehmend reguliert wird und Alternativen entwickelt werden, besteht weiterhin Forschungsbedarf zu den ökotoxikologischen und gesundheitlichen Auswirkungen, insbesondere von "leave-on"-Produkten. (Kukkola et al., 2024; Zhou et al., 2023)

3.7.7. „UV-Filter werden systemisch aufgenommen und beeinflussen das endokrine, neurotoxische und reproduktive System“

Die Frage, ob Sonnenschutzmittel über die Haut in den Körper gelangen und dort systemische Effekte entfalten können, ist seit einigen Jahren Gegenstand intensiver wissenschaftlicher Diskussionen. Aktuelle Untersuchungen fokussieren sich zunehmend auf die potenziellen Nebenwirkungen der darin enthaltenen UV-Filter. (Jesus et al., 2022)

Die aktuelle Fachliteratur legt nahe, dass UV-Filter aus Sonnenschutzmitteln wie BP-3, Octinoxat, Octocrylen, Homosalat und 4-MBC nach topischer Applikation systemisch resorbiert werden können. In einer Reihe von Humanstudien wurden messbare Plasmakonzentrationen nachgewiesen, insbesondere bei wiederholter Anwendung auf großen Hautflächen. (Just-Sarobé, 2025; Mustieles et al., 2023; Pantelic et al., 2023) Die Konzentrationen im Blut liegen jedoch in der Regel deutlich unter den Schwellen, bei denen in vitro oder in Tiermodellen relevante endokrine, neurotoxische oder reproduktive Effekte beobachtet wurden. (Onyango et al., 2023; Pantelic et al., 2023)

Toxikologische und epidemiologische Studien weisen detailliert nach, dass BP-3 und sein Metabolit BP-1 als schwache endokrine Disruptoren *in vitro* und *in vivo* fungieren können. In Tiermodellen wurden Effekte wie verlängerte Östruszyklen, veränderte Expression von Östrogenrezeptoren und endometriale Hyperplasien beschrieben. Humanstudien weisen auf mögliche hormonelle Veränderungen und ein erhöhtes Risiko für Uterusmyome und Endometriose hin, wobei die Datenlage noch limitiert ist und keine kausalen Zusammenhänge belegt werden können. (Lax et al., 2023; Ma et al., 2023; Mustieles et al., 2023; Rafeletou et al., 2024)

Die Bewertung der endokrinen Aktivität von UV-Filtern in Hochdurchsatz-Bioassays (ToxCast/Tox21) ergab, dass die Mehrzahl der Filter nur bei sehr hohen Konzentrationen, die in der Praxis nicht erreicht werden, eine relevante Aktivität zeigt. Oxybenzon (BP-3) stellt in diesem Zusammenhang eine Ausnahme dar, da es bereits bei niedrigeren Konzentrationen eine schwache endokrine Aktivität entfalten kann, die jedoch im Vergleich zu den gemessenen Plasmaspiegeln beim Menschen immer noch um den Faktor 100 niedriger liegt. (Onyango et al., 2023)

Weitere *in-vitro*-Analysen ergaben, dass einige UV-Filter Calciumkanäle aktivieren und somit hormonelle Signalwege beeinflussen können. Eine Studie demonstrierte beispielsweise, dass zehn von 29 getesteten Substanzen eine Ca^{2+} -Freisetzung induzierten, während weitere die Progesteronwirkung hemmten. Dies postuliert potenziell negative Effekte auf die männliche Fertilität. (Jesus et al., 2022)

Es liegen auch Hinweise aus Tierstudien und vereinzelt Humanstudien bezüglich neurotoxischer und reproduktiver Effekte vor. Die Gesamtheit der Daten bewertet das Risiko für den Menschen als gering, sofern die UV-Filter gemäß den regulatorischen Vorgaben verwendet werden. (Breakell et al., 2024; Just-Sarobé, 2025; Lax et al., 2023; Ma et al., 2023; Pantelic et al., 2023) Die Literatur empfiehlt für besonders empfindliche Populationen (z. B. Schwangere, Kinder) die Verwendung von mineralischen/inorganischen UV-Filtern wie Zinkoxid oder Titandioxid, da diese praktisch nicht systemisch aufgenommen werden. (Breakell et al., 2024; Just-Sarobé, 2025; Mustieles et al., 2023)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die systemische Aufnahme von UV-Filtern ein belegter Fakt ist. Aktuelle Daten deuten jedoch darauf hin, dass unter den derzeitigen Anwendungsbedingungen keine klinisch relevanten endokrinen, neurotoxischen oder reproduktiven Effekte beim Menschen zu erwarten sind. (Breakell et al., 2024; Just-Sarobé, 2025; Mustieles et al., 2023; Onyango et al., 2023; Pantelic et al., 2023)

3.7.8. „Konsument:innen müssen Inhaltsstoffe und Nebenwirkungen in Sonnenschutzmittel fürchten“

Die europäischen Aufsichtsbehörden, allen voran die Europäische Kommission sowie das SCCS, stellen durch strenge Zulassungs- und Kontrollmechanismen sicher, dass gesundheitsgefährdende Sonnenschutzmittel nicht in den Handel gelangen. Vor ihrer Marktzulassung werden UV-Filter und weitere Inhaltsstoffe umfassenden Prüfungen unterzogen, die akute, subchronische und chronische Toxizität, Reproduktionstoxizität, Genotoxizität, Karzinogenität, Irritations- und Sensibilisierungspotenzial, Phototoxizität sowie mögliche Auswirkungen auf die Umwelt einschließen. Substanzen, die als mutagen, karzinogen oder reproduktionstoxisch eingestuft sind, unterliegen dem Verbot gemäß der EU-Kosmetikverordnung (Verordnung (EG) Nr. 1223/2009). (Henkler et al., 2012; Lodén et al., 2011; Pauwels and Rogiers, 2010)

Trotz dieses hohen regulatorischen Standards empfiehlt es sich, die Inhaltsstoffe von Sonnenschutzmitteln im Blick zu behalten, da einzelne UV-Filter (z. B. Benzophenon-3/Oxybenzon, Octocrylen) bei sensiblen Personen allergische Reaktionen oder in seltenen Fällen Sensibilisierungen hervorrufen können. Zwar lässt sich die systemische Aufnahme bestimmter chemischer UV-Filter nachweisen, doch wird die klinische Bedeutung dieser Befunde in der aktuellen Literatur als gering eingestuft, da bislang keine eindeutigen gesundheitlichen Risiken für den Menschen belegt sind. (Breakell et al., 2024; Matta et al., 2020, 2019; Paiva et al., 2020; Pantelic et al., 2023)

Wie bereits im Kapitel 3.6.6. erwähnt, fokussiert sich die Diskussion um Umweltrisiken insbesondere auf marine Ökosysteme, wobei Korallenriffe eine zentrale Rolle spielen. Für die menschliche Gesundheit ist diese Thematik jedoch von untergeordneter Relevanz. (Breakell et al., 2024; Shetty et al., 2023) Die Behauptung, Sonnenschutzmittel seien

generell unsicher oder gesundheitsschädlich, wird in der Literatur als Fehlinformation und Mythos klassifiziert. (O'Connor et al., 2022)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Sonnenschutzmittel nach aktuellem Stand der Wissenschaft als sicher einzustufen sind und ein essenzieller Bestandteil der Prävention von UV-bedingten Hautschäden darstellen. (Breakell et al., 2024; "PS-Access to Sunscreen_Sun Protective Clothing," n.d.; V. Chałupczak and A. Lio, 2025)

Für Anwender:innen, die sich aufgrund der systemischen Aufnahme unsicher fühlen, bieten physikalische Sonnenschutzmittel auf Basis von Titandioxid oder Zinkoxid eine bewährte Alternative. Ihre Sicherheit und lokale Wirksamkeit sind gut dokumentiert. Die aktuelle wissenschaftliche Evidenz lässt die Anwendung von Sonnenschutzmitteln als sicher erscheinen. Seltene unerwünschte Wirkungen manifestieren sich in der Regel in Form von Kontaktdermatitiden oder Verfärbungen der Kleidung. (Adler, 2024; Bennett and Khachemoune, 2022)

3.7.9. „Kinder benötigen keinen speziellen Sonnenschutz“

Die weit verbreitete Annahme, dass Kinder keinen besonderen Sonnenschutz benötigen, erweist sich als gefährlicher Mythos. Kinder und Jugendliche zählen zu den besonders gefährdeten Gruppen, da sie durch ihre zahlreichen Freizeit- und Sportaktivitäten im Freien einer intensiven UV-Strahlung ausgesetzt sind. Gemäß wissenschaftlichen Erkenntnissen begünstigt auch bei Kindern die kumulative UV-Exposition die Entstehung von NMSC, während wiederholte, intensive Sonnenbrände eng mit der Entwicklung von Melanomen assoziiert sind. UV-Strahlung und Sonnenbrände sind demnach als zentrale umweltbedingte Risikofaktoren einzustufen.

Da bis zu 50 % der lebenslangen UV-Belastung bereits vor dem 21. Lebensjahr erreicht werden, betont die WHO die Relevanz eines frühzeitigen Sonnenschutzverhaltens. Es konnte in Studien nachgewiesen werden, dass ein konsequenter Schutz in Kindheit und Jugend das Risiko für NMSC im späteren Leben um bis zu 80 % senken kann. Programme wie das deutsche "SunPass"-Programm, das Kinder, Eltern und pädagogisches Personal einbezieht, haben ihre Wirksamkeit im Kindergartenkontext unter Beweis gestellt.

Zudem ist die Haut von Säuglingen und Kleinkindern als besonders empfindlich zu betrachten. Das Stratum corneum, welche einen wesentlichen Teil der Hautschutzbarriere darstellt, ist erst ab dem vierten Lebensjahr vollständig ausgereift, wodurch die Haut in den ersten Lebensjahren eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber UV-Strahlung aufweist. Das Konzept des individuellen "Sonnenkapitals" betont die Notwendigkeit einer frühzeitigen Hautschonung, um langfristige Schäden zu vermeiden. Es ist evident, dass jeder Mensch über eine individuelle Lebensdosis an UV-Belastung verfügt, die möglichst früh geschont werden sollte. Aus den gewonnenen Erkenntnissen leitet sich die dringende Notwendigkeit ab, die Haut bereits im Kindesalter konsequent vor UV-Strahlung zu schützen. UV-Strahlung ist ein vermeidbarer Karzinogen, sodass ein wirksamer Schutz durch angepasstes Verhalten gewährleistet werden kann. Als Beispiel kann die in mediterranen Ländern übliche Mittagspause dienen, die die UV-Belastung um bis zu 75 % reduziert.

Dennoch ist der Schutz von Kindern oftmals unzureichend. Eltern und Betreuungspersonal weisen laut Befragungen Defizite auf. So lag das durchschnittliche Wissen über Hautkrebs in einer Studie mit 254 Eltern bei lediglich 61 %, und Fragen zum UV-Index konnten sogar nur von 49 % korrekt beantwortet werden. (Stockfleth and Revol, 2022)

Eine in bayerischen Landkreisen durchgeführte bevölkerungsbasierte Studie hat ergeben, dass ein insgesamt hohes Schutzniveau besteht, jedoch auch Defizite bestehen. Eltern fokussieren sich in der Regel auf die Verwendung von Sonnencreme und Kopfbedeckungen, während schützende Kleidung, Sonnenbrillen und Schattenaufenthalte häufig vernachlässigt werden. Zudem wurde beobachtet, dass sich zahlreiche Kinder trotz Empfehlungen während der Mittagsstunden im Freien aufhielten. Subgruppenanalysen ergaben, dass das Alter von Kindern und Müttern einen Einfluss auf das Schutzverhalten hat. Mit zunehmendem Alter der Kinder wurde die elterliche Fürsorge geringer. Eine Analyse der Daten ergab, dass jüngere Mütter tendenziell häufiger Sonnencreme, Hüte und Sonnenbrillen verwendeten, während ältere Mütter vermehrt auf UV-Kleidung setzten. (Gefeller et al., 2016)

Internationale Leitlinien betonen daher ausdrücklich einen ganzheitlichen Ansatz zum Sonnenschutz bei Kindern. Für Säuglinge unter sechs Monaten wird eine direkte Sonneneinstrahlung strikt vermieden. Primärer Schutz erfolgt durch Schatten, Kleidung,

Hüte und Sonnenbrillen. Der Einsatz von Sonnenschutzmitteln ist in dieser Altersgruppe nur sehr bedingt sinnvoll und sollte sich auf kleinste, unbedeckte Hautareale wie Gesicht und Hände beschränken, da andernfalls Hautreizungen und eine systemische Aufnahme der Filterstoffe möglich sind. (Weinberg et al., 2025) Für Kinder ab sechs Monaten wird die regelmäßige Anwendung von breitbandigem Sonnenschutz mit mindestens LSF 30 empfohlen. Das Produkt ist vor dem Aufenthalt in der Sonne aufzutragen und alle zwei bis vier Stunden zu erneuern, insbesondere nach dem Schwimmen. (Wanat et al., 2025)

In diesem Zusammenhang sind physikalische Filter, wie beispielsweise Zinkoxid oder Titandioxid, zu bevorzugen, da sie die UV-Strahlung reflektieren und in der Folge seltener Hautirritationen verursachen. Chemische Filter, wie sie in den UV-Filtern Avobenzon, Octinoxat und Oxybenzon enthalten sind, dringen in die Haut ein und sind zwar leichter aufzutragen, bergen jedoch ein höheres Risiko von Reizungen und systemischer Aufnahme, was insbesondere bei Kindern kritisch zu betrachten ist. (McDonald et al., 2023b)

Darüber hinaus wird empfohlen, Kleidung mit UV-Schutz (UPF), Hüte mit breiter Krempe sowie Sonnenbrillen zu tragen und die direkte Sonneneinstrahlung, insbesondere in der Zeit von 10 bis 16 Uhr, möglichst zu meiden. (Gefeller et al., 2016) Da Kinder aufgrund ihrer empfindlicheren Haut einem erhöhten Risiko für UV-bedingte Hautschäden und Hautkrebs ausgesetzt sind, ist eine umfassende Photoprotektion essenziell. (Berneburg and Surber, 2009; Pellacani et al., 2024b)

3.7.10. „Bräune ist ein Symbol für Gesundheit“

Die aktuelle wissenschaftliche Evidenz lässt den Schluss zu, dass es keine gesunde Form der Bräunung gibt. Jede durch UV-Strahlung ausgelöste Hautbräunung ist ein sichtbares Anzeichen für DNA-Schäden in den Hautzellen und geht mit einem gesteigerten Risiko für Hautkrebs einher. Insbesondere die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Basalzellkarzinomen, Plattenepithelkarzinomen und malignen Melanomen ist signifikant erhöht. Sowohl die natürliche Sonnenexposition als auch künstliche UV-Strahlung aus Solarien verursachen mutagene DNA-Veränderungen, fördern die Hautalterung und wirken karzinogen. (Calzavara-Pinton et al., 2019; Laughter et al., 2021; O’Leary et al., 2014)

Die von der Solarienindustrie häufig beworbenen positiven Effekte, wie etwa die Förderung der Vitamin-D-Produktion oder die Stimmungsverbesserung, sind nach aktuellem Forschungsstand entweder von untergeordneter Bedeutung oder stehen in keinem Verhältnis zum deutlich erhöhten Hautkrebsrisiko. (Laughter et al., 2021; O'Leary et al., 2014) In der Literatur wird ebenso häufig die Behauptung aufgestellt, dass das sogenannte "Basistanning" im Solarium einen gewissen Schutz vor Sonnenbrand bietet. Man spricht hier von der sogenannte „Schutzbräune“. Es wurde nachgewiesen, dass die durch Solariumbesuche erreichte Bräunung lediglich einem Lichtschutzfaktor von ungefähr 3 bis 4 entspricht. Dieser Wert liegt signifikant unter den empfohlenen Werten von LSF 30. (Bennett and Khachemoune, 2022) Die in Solarien vorherrschende UVA-Strahlung trägt schlussendlich nur in geringem Maße zur Vitamin-D-Synthese bei, fördert jedoch in hohem Maße Hautalterung und Krebsentstehung. (Laughter et al., 2021)

Der Bräunungsprozess selbst stellt eine Stressreaktion der Haut auf UV-induzierte DNA-Schäden dar. Wird ein Schaden erkannt, aktiviert das Tumorsuppressorprotein p53 die Produktion von Proopiomelanocortin, welches wiederum die Freisetzung des melanocytenstimulierenden Hormons (MSH) fördert. In der Folge kommt es zu einer gesteigerten Melaninproduktion, die als Bräunung sichtbar wird. Der Mechanismus, der die Pigmentierung initialisiert, trägt zudem langfristig zur Entwicklung von Hautkrebs bei. Es sei darauf hingewiesen, dass eine als "sicher" zu bezeichnende Bräune medizinisch nicht existiert. (Bennett and Khachemoune, 2022) Die medizinische Fachwelt betont die Notwendigkeit von konsequentem Sonnenschutz und warnt in diesem Sinne vor allen Formen der UV-induzierten Bräunung. (Geller et al., 2018; Wilkerson et al., 2025)

4. Diskussion

4.1. Schlussfolgerungen von Sonnenschutzmitteln

Die vorliegende Diplomarbeit verdeutlicht, dass moderne Strategien des Sonnenschutzes eine Schlüsselrolle bei der Prävention von UV-induzierten Hautschäden spielen. Zahlreiche Studien belegen, dass die konsequente Anwendung von Sonnenschutzmitteln das Risiko für Hautkrebs, sowohl Melanome als auch nicht-melanozytäre Hauttumoren, signifikant reduziert. (Guo et al., 2024; Ida et al., 2023) Eine norwegische Kohortenstudie

(Committee on Environmental Impact of Currently Marketed Sunscreens and Potential Human Impacts of Changes in Sunscreen Usage et al., 2022) beispielsweise belegt, dass Frauen mittleren Alters, die regelmäßig Produkte mit mindestens SPF 15 nutzen, ein um rund 30 % geringeres Risiko für die Entstehung von Melanomen haben. Diese Erkenntnisse stehen im Einklang mit den dermatologischen Leitlinien, die für alle Hauttypen eine tägliche Anwendung von Sonnenschutzmitteln empfehlen. (Guo et al., 2024)

Neben der Prävention onkologischer Erkrankungen wird durch den Einsatz von Sonnenschutzmitteln auch der lichtbedingten Hautalterung vorgebeugt. Langzeit- und Zwillingsstudien belegen eindeutig, dass Personen mit hoher UV-Exposition signifikant früher sichtbare Alterungserscheinungen entwickeln als konsequent geschützte Vergleichspersonen. (Avila et al., 2023) Es konnte in diversen Studien nachgewiesen werden, dass eine langfristige Photoprotektion die Faltenbildung sowie elastotische Hautveränderungen signifikant reduziert.

Sonnenschutzmittel spielen aber nicht nur eine zentrale Rolle in der Prävention lichtbedingter Hautalterung und UV-induzierter Hautschäden, sondern sind darüber hinaus auch bei verschiedenen Photodermatosen von entscheidender Bedeutung. Erkrankungen wie die polymorphe Lichtdermatose, Urticaria solaris, chronisch aktinische Dermatitis, aktinische Prurigo, Hydroa vacciniforme, erythropoetische Protoporphyrinurie sowie lichtsensitiver Lupus erythematoses bedingen strikten Sonnenschutz. In diesem Kontext haben sich Sonnenschutzmittel als begleitende Basismaßnahme etabliert. Ihr Einsatz zielt darauf ab, Krankheitsschübe zu reduzieren und die Haut vor zusätzlichen Schäden zu schützen. (Bajek et al., 2025; Mancuso et al., 2017; Millard and Hawk, 2002; Pellacani et al., 2024a)

Im historischen Verlauf wurde insbesondere seit den 1990er-Jahren eine stetige Verbesserung des UVA-Schutzes beobachtet, die auf die Erkenntnis der zentralen Rolle von UVA-Strahlung bei Photoaging und Hautkrebs zurückzuführen ist. (Aguilera et al., 2023) Moderne Breitbandformulierungen kombinieren UVA- und UVB-Filter mit Antioxidantien, teilweise auch DNA-Reparaturenzyklen oder Eisenoxiden, und erfüllen internationale Standards wie das UVA-Siegel oder das 1:3-Verhältnis von UVA-Schutz zu

SPF. (Surber and Braun, 2017a) Dennoch bestehen weiterhin Herausforderungen: Einige hochwirksame Substanzen wie Tinosorb® S oder Bemotrizinol sind global noch nicht zugelassen, was regulatorische Lücken widerspiegelt. (Guo et al., 2024)

Allerdings wird Sonnenschutz nicht von allen Bevölkerungsgruppen adäquat genutzt. Auch Menschen mit dunkler Haut profitieren von Photoprotektion, da bei ihnen zwar seltener Hautkrebs auftritt, dieser jedoch häufig erst in späten Stadien erkannt wird, was die Prognose verschlechtert. (Committee on Environmental Impact of Currently Marketed Sunscreens and Potential Human Impacts of Changes in Sunscreen Usage et al., 2022; Ida et al., 2023) Des Weiteren zeigen Studien, dass Patienten mit sehr dunklem Hauttyp (Fitzpatrick IV-VI) häufig unter polymorpher Lichtdermatose leiden. (Hamel et al., 2020) Die Hypothese, dass eine dunkle Haut nicht der Notwendigkeit eines Sonnenschutzes unterliegt, erweist sich somit als widerlegt.

Es bestehen insbesondere kontroverse Diskussionen über potenzielle unerwünschte Nebenwirkungen. In diesem Zusammenhang wird ein potenzieller Zusammenhang zwischen konsequentem UV-Schutz und Vitamin-D-Mangel diskutiert. Zwar lässt sich in Laborbedingungen eine reduzierte kutane Vitamin-D-Synthese nachweisen, doch in der Praxis zeigen Studien keinen relevanten Einfluss, da Sonnenschutz nicht vollständig oder regelmäßig genug aufgetragen wird. Eine australische Studie konnte keine Unterschiede in den Vitamin-D-Spiegeln zwischen täglicher Anwendung von Sonnenschutzfaktor 15 und dem Verzicht darauf nachweisen. (Ida et al., 2023)

Ein weiteres Phänomen ist das sogenannte "Sonnenschutz-Paradoxon": Trotz einer erhöhten Nutzung von Sonnenschutzmitteln ist ein Anstieg der Hautkrebserkrankungen zu verzeichnen. Dieses vermeintliche Paradoxon lässt sich durch fehlerhaftes Anwenderverhalten, beispielsweise eine unzureichende Menge oder die fehlende Reapplikation, erklären. Ein weiterer Aspekt ist die Risikokompensation: Einige Nutzer verbringen aufgrund der subjektiv wahrgenommenen Sicherheit eine längere Zeit in intensiver Sonne. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, die Bevölkerung über die Limitierungen von Sonnenschutzmaßnahmen aufzuklären, da kein Produkt vollständigen Schutz gewährleistet. (Hohmann-Jeddi, 2024)

Des Weiteren wird die Sicherheit chemischer Filter erörtert. Substanzen wie Oxybenzon oder Octocrylen sind im Blut nachweisbar und überschreiten teilweise die Schwelle von 0,5 ng/mL. (Aguilera et al., 2023) Aktuelle Studien konnten jedoch weder hormonelle Veränderungen noch klinisch relevante Effekte belegen. Die FDA klassifiziert zugelassene Filter als "Generally Recognized As Safe and Effective (GRASE)". (Ida et al., 2023) Nichtsdestotrotz sind weitere Langzeituntersuchungen empfehlenswert, um potenzielle kumulative Effekte zu eliminieren.

Neben der Untersuchung gesundheitlicher Aspekte wird auch die Umweltverträglichkeit analysiert. Laborstudien weisen auf eine potenzielle Rolle spezifischer Filter bei der Auslösung von Korallenbleichen hin, was in Regionen wie Hawaii oder Palau zu Verboten geführt hat. (Guo et al., 2024) Feldstudien konnten diesen Zusammenhang bislang jedoch nicht eindeutig bestätigen, sodass hier ein Spannungsfeld zwischen vorsorglichem Umweltschutz und evidenzbasierter Bewertung besteht.

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass Sonnenschutzmittel eine der effektivsten Maßnahmen zur Prävention von Hautkrebs, lichtbedingter Hautalterung und weiterer UV-induzierter Schäden darstellen. Ihre Effektivität ist dabei jedoch abhängig von einer konsequenten und korrekten Anwendung. Zukünftige Bemühungen sollten daher gleichermaßen auf die Weiterentwicklung der Produkte wie auch auf die Verbesserung des Anwenderverhaltens abzielen, um die präventive Wirkung voll auszuschöpfen.

4.2. Ausblick: Das bringt die Zukunft

Die Analyse der aktuellen Literatur, mit Fokus auf die Jahre 2020-2025, zeigt, dass sich Forschung und Industrie verstärkt darauf konzentrieren, innovative Lösungen für die identifizierten Schwachstellen des heutigen Sonnenschutzes zu entwickeln. (Guo et al., 2024)

Die Weiterentwicklung von Sonnenschutzmitteln zielt demnach auf eine höhere Wirksamkeit und Anwenderfreundlichkeit der Produkte ab. Der Fokus liegt insbesondere auf UV-Filtern der nächsten Generation, die ein erweitertes Spektrum abdecken und eine höhere Photostabilität aufweisen als klassische Substanzen. Exemplarisch seien Bemotrizinol (Tinosorb S) und Bisotrizol genannt, die seit Jahren in Europa und Asien

genutzt werden, sowie Bis-Diethylaminohydroxybenzoyl-Benzoyl-Piperazin (Uvinul A Plus), das 2021 in der EU zugelassen wurde und einen erweiterten UVA-Schutz bis 400 nm bietet. Untersuchungen zeigen eine signifikante Reduktion pigmentbedingter Hautveränderungen. (Guo et al., 2024) Derartige Innovationen tragen nicht nur zur Optimierung des UVA-Schutzes bei, sondern führen auch zu einer Anhebung internationaler Standards.

Parallel dazu rückt die Forschung zu naturbasierten Photoprotektoren in den Fokus. Substanzen wie Scytonemin oder MAAs aus Cyanobakterien zeigen eine starke UVA-Absorption und antioxidative Eigenschaften. Es konnte in Studien nachgewiesen werden, dass auch Usninsäure, die in Flechten vorkommt, sowie pflanzliche Polyphenole, zu denen beispielsweise EGCG aus Grüntee gehört, ein gewisses Potenzial besitzen. Allerdings erreichen Naturstoffe bislang nur Lichtschutzfaktoren von 5–10, was ihre praktische Bedeutung limitiert. (Guo et al., 2024)

Ein zweiter Innovationsschwerpunkt liegt auf dem Gebiet der Nanotechnologie. Die Wirksamkeit von mikronisiertem Zinkoxid und Titandioxid ist wissenschaftlich belegt. Sie bieten einen breiten Schutz, ohne der Haut einen fahlen Hautton zu verleihen. Untersuchungen zeigen, dass diese Nanopartikel nur in geringem Maße die Hornschicht durchdringen und daher als unbedenklich einzustufen sind. (Guo et al., 2024) Darüber hinaus tragen Verkapselungstechniken, wie sie etwa in Liposomen oder Hydrogelen zum Einsatz kommen, zur Verbesserung der Photostabilität und Verträglichkeit bei, indem sie die Hautpenetration und das Irritationspotenzial reduzieren. (Aguilera et al., 2023) Erste Studien weisen zudem auf neue Einsatzfelder wie den Schutz vor Infrarotstrahlung hin. Darüber hinaus bieten getönte Formulierungen mit Eisenoxiden zusätzlichen Schutz vor sichtbarem Licht, insbesondere bei Hyperpigmentierungen. (Guan et al., 2021)

Da das Nutzerverhalten einen entscheidenden Einfluss auf den Erfolg eines solchen Vorhabens hat, fokussieren neuartige Konzepte auf die Implementierung digitaler Hilfsmittel. Der Einsatz von Anwendungen, welche den UV-Index anzeigen, sowie von UV-sensitiven Sticker kann zu einer signifikanten Steigerung der Regelmäßigkeit des Nachcremens führen. Eine australische Studie zeigte, dass Proband:innen mit UV-Stickern signifikant häufiger nachcremten als die Kontrollpersonen. (Ida et al., 2023)

Darüber hinaus gewinnt die systemische Photoprotektion an Signifikanz. Der Einsatz von Präparaten, wie beispielsweise Polypodium leucotomos-Extrakt, hat sich als effektiv erwiesen, um DNA-Schäden und Sonnenbrandreaktionen zu reduzieren. (Ida et al., 2023) In diversen Studien konnte eine signifikante Reduktion des Auftretens aktinischer Keratosen und Plattenepithelkarzinome bei Risikopatient:innen durch die Einnahme von Nicotinamid beobachtet werden. Carotinoide weisen eine antioxidative Wirkung auf, jedoch ist ihr Effekt begrenzt. Ein moderner Ansatz ist die Behandlung mit Afamelanotid (SCENESSE®), welches die Melaninproduktion steigert und Patienten mit erythropoetischer Protoporphyrrie eine erhöhte Sonnenexposition ermöglicht. (Surber and Braun, 2017b)

Schließlich rückt die Umweltverträglichkeit in den Vordergrund. Filter, die als "Reef-safe" (ökologisch unbedenklich) klassifiziert werden, wie beispielsweise Zinkoxid oder Bemotrizinol, erzeugen demnach geringere Belastungen für marine Ökosysteme als kritisierte Substanzen wie Oxybenzon. Zudem werden biologisch abbaubare UV-Filter auf Algenbasis entwickelt, die sich im Meerwasser schneller zersetzen. (Guo et al., 2024)

Die Zukunft des Sonnenschutzes wird maßgeblich durch neue UV-Filter, naturbasierte Substanzen, nanotechnologische Innovationen, digitale Hilfen und systemische Ergänzungen geprägt sein wird. Parallel dazu wird die Nachhaltigkeit als zentrales Ziel definiert. Diese Ansätze zielen darauf ab, die Effektivität und Umweltverträglichkeit zu erhöhen und somit langfristig zur besseren Prävention UV-induzierter Hautschäden beizutragen.

4.3. Abschließende Empfehlung

Die abschließende Empfehlung zum Sonnenschutzverhalten umfasst mehrere evidenzbasierte Maßnahmen, die nur in ihrer Gesamtheit eine wirksame Prävention von Hautkrebs und weiteren UV-induzierten Hautschäden ermöglichen. Die United States Preventive Services Task Force (USPSTF) hebt insbesondere bei Menschen mit heller Haut hervor, dass konsequente Verhaltensänderungen bereits durch Beratung im klinischen Setting wirksam unterstützt werden können. (US Preventive Services Task Force et al., 2018) Zu den zentralen Empfehlungen zählt die Vermeidung direkter Sonneneinstrahlung

in den Spitzenzeiten zwischen 10 und 16 Uhr, da in diesem Zeitraum die Intensität der UV-Strahlung am höchsten ist. (Akamine et al., 2014; Wanat et al., 2025) Ergänzend sollte, wann immer möglich, Schatten aufgesucht werden, sei es durch natürliche Gegebenheiten oder durch den Einsatz mobiler Schattenspender wie Sonnenschirme oder Zelte. (Wanat et al., 2025)

Ein weiterer Eckpfeiler der Prävention stellt der konsequente Einsatz physikalischer Schutzmaßnahmen dar. Zu den Maßnahmen, die ergriffen werden müssen, um der voranschreitenden Sonneneinstrahlung wirksam zu begegnen, gehört das Tragen von UV-dichter Kleidung. Dazu zählen langärmelige Hemden, lange Hosen sowie breitkrempige Hüte, deren Krempebreite mindestens 7,5 cm betragen sollte. Des Weiteren ist das Tragen von Sonnenbrillen mit ausgewiesenem UV-Schutz essenziell, um die Augen und die empfindliche Periorbitalregion vor Strahlung zu bewahren. (Akamine et al., 2014; Wanat et al., 2025)

Neben diesen Maßnahmen kommt der regelmäßigen Anwendung von Sonnenschutzmitteln eine entscheidende Bedeutung zu. Empirische Studien haben gezeigt, dass die Verwendung von Breitbandpräparaten mit einem Lichtschutzfaktor von mindestens 30 in Kombination mit einer großflächigen Applikation auf alle exponierten Hautareale einen optimalen Schutz bietet. Die Applikation erfolgt idealerweise etwa 15 Minuten vor der Sonnenexposition und muss in zweistündigen Intervallen sowie nach Wasserkontakt oder starkem Schwitzen erneuert werden. In den USA gilt bereits ein Lichtschutzfaktor von mindestens 15 als von der FDA als schützend gegen Hautkrebs und lichtbedingte Hautalterung anerkannt. (van Bodegraven et al., 2024; Wanat et al., 2025)

Darüber hinaus sollte künstliche UV-Strahlung durch Solarien strikt vermieden werden, da sie ein erhebliches zusätzliches Risiko für die Entstehung maligner Hautveränderungen darstellt. (US Preventive Services Task Force et al., 2018; van Bodegraven et al., 2024) Für Säuglinge unter sechs Monaten besteht eine besondere Schutznotwendigkeit. Da Sonnenschutzmittel für diese Altersgruppe nicht empfohlen werden, ist der Aufenthalt im Schatten sowie die konsequente Nutzung geeigneter Kleidung die einzig empfohlene Präventionsstrategie. (Wanat et al., 2025)

Es ist von wesentlicher Bedeutung, Sonnenschutzmittel nicht als alleinige Lösung, sondern als ergänzende Komponente innerhalb eines Gesamtkonzepts zu betrachten, das auf dem Zusammenspiel von Meidung direkter UV-Strahlung, dem Tragen geeigneter Kleidung und der Verwendung von Sonnencreme basiert. (Morris and Perna, 2018; Robinson and Rademaker, 1998) Sowohl die USPSTF als auch die AAD betonen, dass diese Empfehlungen für sämtliche Altersgruppen von Relevanz sind. Die Implementierung entsprechender Schutzstrategien ist insbesondere im Kindes- und Jugendalter von hoher Relevanz, da in dieser Phase die Weichen für das kumulative Hautkrebsrisiko im späteren Leben gestellt werden. (Akamine et al., 2014; US Preventive Services Task Force et al., 2018; Wanat et al., 2025)

4.4. Offene Fragen und bestehende Wissenslücken

Zu den nach wie vor bestehenden Unsicherheiten im Bereich des Sonnenschutzes zählen verschiedene Aspekte, die in der aktuellen Forschung intensiv diskutiert werden. Obwohl der Schutz vor UVB- und UVA-Strahlung bereits eine etablierte Praxis ist, bleibt die Rolle von SL und IR-Strahlung für Hautschäden und Pigmentstörungen, insbesondere bei Personen mit dunkler Hautfarbe, bislang nur unzureichend verstanden. Es besteht jedoch noch Forschungsbedarf bezüglich der Frage, in welchem Ausmaß Inhaltsstoffe wie Eisenoxide oder Antioxidantien dazu in der Lage sind, schädliche Effekte dieser Strahlenarten zu verhindern. Die Wirksamkeit dieser Inhaltsstoffe ist derzeit noch Gegenstand laufender Untersuchungen. (Pellacani et al., 2024b; Rigel et al., 2022)

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Langzeitsicherheit von UV-Filtern. Obwohl chemische Filter in vielfältiger Weise zum Einsatz kommen, liegen bislang kaum robuste Daten zu möglichen systemischen Effekten bei chronischer Anwendung vor. Für neu entwickelte Substanzen liegen noch keine abschließenden Erkenntnisse zur gesundheitlichen Unbedenklichkeit vor. (Glaser and Tomecki, 2020; Pellacani et al., 2024b; Yeager and Lim, 2019)

Das Verhalten der Anwender:innen stellt eine wesentliche Herausforderung dar. Trotz intensiverer Aufklärungskampagnen ist die Implementierung von Sonnenschutzmaßnahmen in der Praxis unzulänglich. Die Gründe hierfür sind vielfältig und reichen von Vergesslichkeit über Zeitdruck bis hin zu Kostenaspekten. Es mangelt

bislang an effektiven Strategien zur Verbesserung der Adhärenz und zur nachhaltigen Steigerung der Compliance. (Julian et al., 2023; Lim et al., 2024; Ziehfrend et al., 2019)

Darüber hinaus ist die Balance zwischen UV-Schutz und ausreichender Vitamin-D-Bildung noch nicht eindeutig geklärt. Es herrschen Unsicherheiten hinsichtlich der optimalen Empfehlungen, um sowohl Mangelerscheinungen zu vermeiden als auch Hautschäden effektiv vorzubeugen, da diese für unterschiedliche Hauttypen, Altersgruppen und Lebensstile bestehen. (Geller et al., 2018; Lucas et al., 2019; Skotarczak et al., 2015)

Des Weiteren wird zunehmend die Notwendigkeit individualisierter Empfehlungen betont. Die bisherigen Leitlinien zeigen eine vorwiegende Orientierung an allgemeinen Durchschnittswerten. Faktoren wie Hauttyp, genetische Prädisposition, Aufenthaltsort oder Lebensgewohnheiten werden in der Regel unzureichend berücksichtigt. (Geller et al., 2018)

Schließlich mangelt es an Evidenz bezüglich der Effektivität neuer Technologien und Präventionsansätze. Digitale Hilfsmittel wie UV-Apps, smarte Sticker oder interaktive Programme zur Verhaltensänderung versprechen einen positiven Einfluss auf das Schutzverhalten, jedoch ist ihre tatsächliche Wirksamkeit bislang nicht ausreichend untersucht. (Julian et al., 2023; Ziehfrend et al., 2019)

Diese offenen Fragen verdeutlichen den Bedarf an weiterer interdisziplinärer Forschung sowie an differenzierten, evidenzbasierten Empfehlungen. Nur so lässt sich der Sonnenschutz an die Vielfalt der Bevölkerung anpassen und die Prävention UV-induzierter Hautschäden und Hautkrebs langfristig verbessern.

Literaturverzeichnis

- Adams, G.J., Goldstein, E.K., Goldstein, B.G., Jarman, K.L., Goldstein, A.O., 2021. Attitudes and Behaviors That Impact Skin Cancer Risk among Men. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 18, 9989. <https://doi.org/10.3390/ijerph18199989>
- Adamson, A.S., Welch, H., Welch, H.G., 2022. Association of UV Radiation Exposure, Diagnostic Scrutiny, and Melanoma Incidence in US Counties. *JAMA Intern. Med.* 182, 1181. <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2022.4342>
- Addison, R., Weatherhead, S.C., Pawitri, A., Smith, G.R., Rider, A., Grantham, H.J., Cockell, S.J., Reynolds, N.J., 2021. Therapeutic wavelengths of ultraviolet B radiation activate apoptotic, circadian rhythm, redox signalling and key canonical pathways in psoriatic epidermis. *Redox Biol.* 41, 101924. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2021.101924>
- Adler, B., 2024. Sunscreen Safety: 2024 Updates. *Cutis* 113. <https://doi.org/10.12788/cutis.1003>
- Agar, N., Young, A.R., 2005. Melanogenesis: a photoprotective response to DNA damage? *Mutat. Res. Mol. Mech. Mutagen.* 571, 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2004.11.016>
- Aguilera, J., Gracia-Cazaña, T., Gilaberte, Y., 2023. New developments in sunscreens. *Photochem. Photobiol. Sci.* 22, 2473–2482. <https://doi.org/10.1007/s43630-023-00453-x>
- Akamine, K.L., Gustafson, C.J., Davis, S.A., Levender, M.M., Feldman, S.R., 2014. Trends in Sunscreen Recommendation Among US Physicians. *JAMA Dermatol.* 150, 51. <https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2013.4741>
- Alhasaniah, A., Sherratt, M.J., O'Neill, C.A., 2019. The Impact of Ultraviolet Radiation on Barrier Function in Human Skin: Molecular Mechanisms and Topical Therapeutics. *Curr. Med. Chem.* 25, 5503–5511. <https://doi.org/10.2174/0929867324666171106164916>
- Anbualakan, K., Tajul Urus, N.Q., Makpol, S., Jamil, A., Mohd Ramli, E.S., Md Pauzi, S.H., Muhammad, N., 2022. A Scoping Review on the Effects of Carotenoids and Flavonoids on Skin Damage Due to Ultraviolet Radiation. *Nutrients* 15, 92. <https://doi.org/10.3390/nu15010092>
- Anderson, J., Majidian, M., Kolli, H., Rosenthal, A., Wilson, A., Rock, J., Yao, Z., Moy, R., 2023. Ultraviolet B-Rays Induced Gene Alterations and DNA Repair Enzymes in Skin Tissue. *J. Drugs Dermatol.* 22, 465–470. <https://doi.org/10.36849/JDD.7070>
- Arantes, A.B., Rosa, R.T., De Oliveira, N.S., Bianchini, L.F., Rached, R.N., Johann, A.C.B.R., Weber, S.H., Murakami, F.S., Maluf, D.F., Rosa, E.A.R., 2024. Facial disbiosis and UV filters. *Arch. Dermatol. Res.* 316, 739. <https://doi.org/10.1007/s00403-024-03501-3>
- Arranz-Paraíso, D., Sola, Y., Baeza-Moyano, D., Benítez-Martínez, M., Melero-Tur, S., González-Lezcano, R.A., 2023. Mitochondria and light: An overview of the pathways triggered in skin and retina with incident infrared radiation. *J. Photochem. Photobiol. B* 238, 112614. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2022.112614>
- Avila, F.R., Carter, R.E., McLeod, C.J., Bruce, C.J., Giardi, D., Guliyeva, G., Torres-Guzman, R.A., Maita, K.C., Forte, A.J., 2023. Perceived Age in Patients Exposed to Distinct UV Indexes: A Systematic Review. *Indian J. Plast. Surg. Off. Publ. Assoc. Plast. Surg. India* 56, 103–111. <https://doi.org/10.1055/s-0042-1759696>

- Baba, H., Yoshida, M., Yokota, T., Uchiwa, H., Watanabe, S., 2005. Human epidermal basal cell responses to ultraviolet-B differ according to their location in the undulating epidermis. *J. Dermatol. Sci.* 38, 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.jdermsci.2004.12.020>
- Bacardit, A., 2023. Are in-market control systems for sunscreens adequate for consumer protection? A review of the legal framework regulating sun protection factor labels in Europe. *BMJ Public Health* 1, e000164. <https://doi.org/10.1136/bmjph-2023-000164>
- Bajek, D., Dawe, R., Eadie, E., McGuire, V.A., Ibbotson, S., 2025. Sunscreen and Photoprotection Habits for Patients With Porphyria and Non-Porphyrinic Photosensitivity Conditions. *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.* 41, e70034. <https://doi.org/10.1111/phpp.70034>
- Bajgar, R., Moukova, A., Chalupnikova, N., Kolarova, H., 2021. Differences in the Effects of Broad-Band UVA and Narrow-Band UVB on Epidermal Keratinocytes. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 18, 12480. <https://doi.org/10.3390/ijerph182312480>
- Barolet, D., Christiaens, F., Hamblin, M.R., 2016. Infrared and skin: Friend or foe. *J. Photochem. Photobiol. B* 155, 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2015.12.014>
- Baswan, S.M., Klosner, A.E., Weir, C., Salter-Venzon, D., Gellenbeck, K.W., Leverett, J., Krutmann, J., 2021. Role of ingestible carotenoids in skin protection: A review of clinical evidence. *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.* 37, 490–504. <https://doi.org/10.1111/phpp.12690>
- Bennett, S.L., Khachemoune, A., 2022. Dispelling myths about sunscreen. *J. Dermatol. Treat.* 33, 666–670. <https://doi.org/10.1080/09546634.2020.1789047>
- Bernard, J.J., Gallo, R.L., Krutmann, J., 2019. Photoimmunology: how ultraviolet radiation affects the immune system. *Nat. Rev. Immunol.* 19, 688–701. <https://doi.org/10.1038/s41577-019-0185-9>
- Berneburg, M., Surber, C., 2009. Children and sun protection. *Br. J. Dermatol.* 161 Suppl 3, 33–39. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2009.09447.x>
- Berner, F., Passeron, T., Castiel, I., Marionnet, C., 2022. The Damaging Effects of Long UVA (UVA1) Rays: A Major Challenge to Preserve Skin Health and Integrity. *Int. J. Mol. Sci.* 23, 8243. <https://doi.org/10.3390/ijms23158243>
- Berwick, M., Garcia, A., 2020. Solar UV Exposure and Mortality from Skin Tumors: An Update, in: Reichrath, J. (Ed.), *Sunlight, Vitamin D and Skin Cancer, Advances in Experimental Medicine and Biology*. Springer International Publishing, Cham, pp. 143–154. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46227-7_7
- Boo, Y.C., 2020. Emerging Strategies to Protect the Skin from Ultraviolet Rays Using Plant-Derived Materials. *Antioxidants* 9, 637. <https://doi.org/10.3390/antiox9070637>
- Bouwstra, J.A., Nădăban, A., Bras, W., McCabe, C., Bunge, A., Gooris, G.S., 2023. The skin barrier: An extraordinary interface with an exceptional lipid organization. *Prog. Lipid Res.* 92, 101252. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2023.101252>
- Bowers, J.M., Geller, A.C., Schofield, E., Li, Y., Hay, J.L., 2020. Indoor Tanning Trends Among US Adults, 2007–2018. *Am. J. Public Health* 110, 823–828. <https://doi.org/10.2105/AJPH.2020.305605>
- Boyd, A., Martin, S., Legge, A., Blewett, T.A., 2024. Are UV filters better together? A comparison of the toxicity of individual ultraviolet filters and off-the-shelf sunscreens to *Daphnia magna*. *Environ. Pollut.* 362, 124953. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124953>

- Breakell, T., Kowalski, I., Foerster, Y., Kramer, R., Erdmann, M., Berking, C., Heppt, M.V., 2024. Ultraviolet Filters: Dissecting Current Facts and Myths. *J. Clin. Med.* 13, 2986. <https://doi.org/10.3390/jcm13102986>
- Brem, R., Guven, M., Karran, P., 2017. Oxidatively-generated damage to DNA and proteins mediated by photosensitized UVA. *Free Radic. Biol. Med.* 107, 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2016.10.488>
- Burfield, L., Rutter, K.J., Thompson, B., Marjanovic, E.J., Neale, R.E., Rhodes, L.E., 2023. Systematic review of the prevalence and incidence of the photodermatoses with meta-analysis of the prevalence of polymorphic light eruption. *J. Eur. Acad. Dermatol. Venereol.* 37, 511–520. <https://doi.org/10.1111/jdv.18772>
- Burnett, M.E., Wang, S.Q., 2011. Current sunscreen controversies: a critical review. *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.* 27, 58–67. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0781.2011.00557.x>
- Burshtein, J., Zakria, D., Shah, M., Rigel, D., 2024. Factors Influencing Patient Selection of Sunscreen. *J. Drugs Dermatol.* 23, e154–e155. <https://doi.org/10.36849/JDD.8324>
- Calles, C., Schneider, M., Macaluso, F., Benesova, T., Krutmann, J., Schroeder, P., 2010. Infrared A Radiation Influences the Skin Fibroblast Transcriptome: Mechanisms and Consequences. *J. Invest. Dermatol.* 130, 1524–1536. <https://doi.org/10.1038/jid.2010.9>
- Calniquer, G., Khanin, M., Ovadia, H., Linnewiel-Hermoni, K., Stepensky, D., Trachtenberg, A., Sedlov, T., Braverman, O., Levy, J., Sharoni, Y., 2021. Combined Effects of Carotenoids and Polyphenols in Balancing the Response of Skin Cells to UV Irradiation. *Mol. Basel Switz.* 26, 1931. <https://doi.org/10.3390/molecules26071931>
- Calzavara-Pinton, P.G., Arisi, M., Wolf, P., 2019. Sunbeds and carcinogenesis: the need for new regulations and restrictions in Europe from the Euromelanoma perspective. *J. Eur. Acad. Dermatol. Venereol.* 33, 104–109. <https://doi.org/10.1111/jdv.15314>
- Carvalho, M.J., S. Oliveira, A.L., Santos Pedrosa, S., Pintado, M., Pinto-Ribeiro, I., Madureira, A.R., 2023. Skin Microbiota and the Cosmetic Industry. *Microb. Ecol.* 86, 86–96. <https://doi.org/10.1007/s00248-022-02070-0>
- Celebi Sözüner, Z., Cevhertas, L., Nadeau, K., Akdis, M., Akdis, C.A., 2020. Environmental factors in epithelial barrier dysfunction. *J. Allergy Clin. Immunol.* 145, 1517–1528. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2020.04.024>
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC), 2012. Use of indoor tanning devices by adults--United States, 2010. *MMWR Morb. Mortal. Wkly. Rep.* 61, 323–326.
- Chatzigianni, M., Pavlou, P., Siamidi, A., Vlachou, M., Varvaresou, A., Papageorgiou, S., 2022. Environmental impacts due to the use of sunscreen products: a mini-review. *Ecotoxicology* 31, 1331–1345. <https://doi.org/10.1007/s10646-022-02592-w>
- Chen, L., Hu, J.Y., Wang, S.Q., 2012. The role of antioxidants in photoprotection: A critical review. *J. Am. Acad. Dermatol.* 67, 1013–1024. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2012.02.009>
- Chen, X., Yi, Z., Chen, G., Ma, X., Tong, Q., Tang, L., Li, X., 2022. Engineered fabrication of EGCG-UV absorber conjugated nano-assemblies for antioxidative sunscreens with broad-band absorption. *Colloids Surf. B Biointerfaces* 220, 112912. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112912>
- Coats, J.G., Maktabi, B., Abou-Dahech, M.S., Baki, G., 2021. Blue Light Protection, Part I—Effects of blue light on the skin. *J. Cosmet. Dermatol.* 20, 714–717. <https://doi.org/10.1111/jocd.13837>

- Cohen, L., Brodsky, M.A., Zubair, R., Kohli, I., Hamzavi, I.H., Sadeghpour, M., 2023. Cutaneous interaction with visible light: What do we know? *J. Am. Acad. Dermatol.* 89, 560–568. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2020.03.115>
- Cohen, M., Austin, E., Masub, N., Kurtti, A., George, C., Jagdeo, J., 2022. Home-based devices in dermatology: a systematic review of safety and efficacy. *Arch. Dermatol. Res.* 314, 239–246. <https://doi.org/10.1007/s00403-021-02231-0>
- Committee on Environmental Impact of Currently Marketed Sunscreens and Potential Human Impacts of Changes in Sunscreen Usage, Ocean Studies Board, Board on Environmental Studies and Toxicology, Board on Health Sciences Policy, Division on Earth and Life Studies, Health and Medicine Division, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022. Review of Fate, Exposure, and Effects of Sunscreens in Aquatic Environments and Implications for Sunscreen Usage and Human Health. National Academies Press, Washington, D.C. <https://doi.org/10.17226/26381>
- De Araújo, M.M., Schneid, A.C., Oliveira, M.S., Mussi, S.V., De Freitas, M.N., Carvalho, F.C., Bernes Junior, E.A., Faro, R., Azevedo, H., 2024. NLC-Based Sunscreen Formulations with Optimized Proportion of Encapsulated and Free Filters Exhibit Enhanced UVA and UVB Photoprotection. *Pharmaceutics* 16, 427. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16030427>
- Dennis, L.K., Beane Freeman, L.E., VanBeek, M.J., 2003. Sunscreen Use and the Risk for Melanoma: A Quantitative Review. *Ann. Intern. Med.* 139, 966–978. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-139-12-200312160-00006>
- Diehl, K., Breitbart, E.W., De Buhr, Y., Görig, T., 2024. Tanning bed use in Germany between 2015 and 2022: Representative data of 28,000 individuals on indoor tanning, risk awareness and reasons for use. *J. Eur. Acad. Dermatol. Venereol.* 38, 732–740. <https://doi.org/10.1111/jdv.19744>
- Diehl, K., Brokmeier, L., Konkel, T., Breitbart, E.W., Drexler, H., Görig, T., 2023. Sun Protection in German Outdoor Workers: Differences by Sex and Job-Related Characteristics. *Ann. Work Expo. Health* 67, 622–636. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxad014>
- D’Mello, S., Finlay, G., Baguley, B., Askarian-Amiri, M., 2016. Signaling Pathways in Melanogenesis. *Int. J. Mol. Sci.* 17, 1144. <https://doi.org/10.3390/ijms17071144>
- Dourmishev, L., Meffert, H., Piazena, H., 2004. Dermatomyositis: comparative studies of cutaneous photosensitivity in lupus erythematosus and normal subjects. *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.* 20, 230–234. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0781.2004.00115.x>
- Dumbuya, H., Grimes, P., Lynch, S., Ji, K., Brahmachary, M., Zheng, Q., Bouez, C., Wangari-Talbot, J., 2020. Impact of Iron-Oxide Containing Formulations Against Visible Light-Induced Skin Pigmentation in Skin of Color Individuals. *J. Drugs Dermatol.* 19, 712–717. <https://doi.org/10.36849/JDD.2020.5032>
- El-Abaseri, T.B., Putta, S., Hansen, L.A., 2006. Ultraviolet irradiation induces keratinocyte proliferation and epidermal hyperplasia through the activation of the epidermal growth factor receptor. *Carcinogenesis* 27, 225–231. <https://doi.org/10.1093/carcin/bgi220>
- Ezekwe, N., Maghfour, J., Kohli, I., 2022. Visible Light and the Skin. *Photochem. Photobiol.* 98, 1264–1269. <https://doi.org/10.1111/php.13634>
- Falk, M., Anderson, C.D., 2013. Influence of age, gender, educational level and self-estimation of skin type on sun exposure habits and readiness to increase sun protection. *Cancer Epidemiol.* 37, 127–132. <https://doi.org/10.1016/j.canep.2012.12.006>

- Fioletov, V., Kerr, J.B., Fergusson, A., 2010. The UV Index: Definition, Distribution and Factors Affecting It. *Can. J. Public Health.* 101, I5–I9.
<https://doi.org/10.1007/BF03405303>
- Fonseca, M., Rehman, M., Soares, R., Fonte, P., 2023. The Impact of Flavonoid-Loaded Nanoparticles in the UV Protection and Safety Profile of Topical Sunscreens. *Biomolecules* 13, 493. <https://doi.org/10.3390/biom13030493>
- Frommeyer, T.C., Gilbert, M.M., Brittain, G.V., Wu, T., Nguyen, T.Q., Rohan, C.A., Travers, J.B., 2022. UVB-Induced Microvesicle Particle Release and Its Effects on the Cutaneous Microenvironment. *Front. Immunol.* 13, 880850.
<https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.880850>
- Garimano, N., Aguayo Frías, T., González Maglio, D.H., 2025. Beyond ultraviolet radiation: Immune system modulation through skin exposure to visible light and infrared radiation. *Photochem. Photobiol.* 101, 846–857.
<https://doi.org/10.1111/php.14117>
- Gefeller, O., Mathes, S., Uter, W., Pfahlberg, A., 2022. The Role of the Global Solar UV Index for Sun Protection of Children in German Kindergartens. *Children* 9, 198.
<https://doi.org/10.3390/children9020198>
- Gefeller, O., Uter, W., Pfahlberg, A., 2016. Protection from Ultraviolet Radiation during Childhood: The Parental Perspective in Bavaria. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 13, 1011. <https://doi.org/10.3390/ijerph13101011>
- Geisler, A.N., Austin, E., Nguyen, J., Hamzavi, I., Jagdeo, J., Lim, H.W., 2021. Visible light. Part II: Photoprotection against visible and ultraviolet light. *J. Am. Acad. Dermatol.* 84, 1233–1244. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2020.11.074>
- Geller, A.C., Jablonski, N.G., Pagoto, S.L., Hay, J.L., Hillhouse, J., Buller, D.B., Kenney, W.L., Robinson, J.K., Weller, R.B., Moreno, M.A., Gilchrest, B.A., Sinclair, C., Arndt, J., Taber, J.M., Morris, K.L., Dwyer, L.A., Perna, F.M., Klein, W.M.P., Suls, J., 2018. Interdisciplinary Perspectives on Sun Safety. *JAMA Dermatol.* 154, 88. <https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2017.4201>
- Giacomoni, P.U., 2020. Appropriate Technologies to Accompany Sunscreens in the Battle Against Ultraviolet, Superoxide, and Singlet Oxygen. *Antioxidants* 9, 1091.
<https://doi.org/10.3390/antiox9111091>
- Gilaberte, Y., Piquero-Casals, J., Schalka, S., Leone, G., Brown, A., Trullàs, C., Jourdan, E., Lim, H.W., Krutmann, J., Passeron, T., 2025. Exploring the impact of solar radiation on skin microbiome to develop improved photoprotection strategies. *Photochem. Photobiol.* 101, 38–52. <https://doi.org/10.1111/php.13962>
- Gilchrest, B.A., Park, H., Eller, M.S., Yaar, M., 1996. Mechanisms of Ultraviolet Light-Induced Pigmentation. *Photochem. Photobiol.* 63, 1–10.
<https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1996.tb02988.x>
- Giustra, M., Sinesi, G., Spina, F., De Santes, B., Morelli, L., Barbieri, L., Garbujo, S., Galli, P., Prospero, D., Colombo, M., 2024. Microplastics in Cosmetics: Open Questions and Sustainable Opportunities. *ChemSusChem* 17, e202401065.
<https://doi.org/10.1002/cssc.202401065>
- Glaser, K.S., Tomecki, K.J., 2020. Sunscreens in the United States: Current Status and Future Outlook. *Adv. Exp. Med. Biol.* 1268, 355–379. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46227-7_18
- Glass, Graeme Ewan, 2021. Photobiomodulation: The Clinical Applications of Low-Level Light Therapy. *Aesthet. Surg. J.* 41, 723–738. <https://doi.org/10.1093/asj/sjab025>
- Glass, Graeme E., 2021. Photobiomodulation: A review of the molecular evidence for low level light therapy. *J. Plast. Reconstr. Aesthet. Surg.* 74, 1050–1060.
<https://doi.org/10.1016/j.bjps.2020.12.059>

- Görig, T., Diehl, K., Greinert, R., Breitbart, E.W., Schneider, S., 2018. Prevalence of sun-protective behaviour and intentional sun tanning in German adolescents and adults: results of a nationwide telephone survey. *J. Eur. Acad. Dermatol. Venereol.* 32, 225–235. <https://doi.org/10.1111/jdv.14376>
- Grant, G.J., Kohli, I., Mohammad, T.F., 2024. A narrative review of the impact of ultraviolet radiation and sunscreen on the skin microbiome. *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.* 40, e12943. <https://doi.org/10.1111/phpp.12943>
- Green, A.C., Wallingford, S.C., McBride, P., 2011a. Childhood exposure to ultraviolet radiation and harmful skin effects: Epidemiological evidence. *Prog. Biophys. Mol. Biol.* 107, 349–355. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2011.08.010>
- Green, A.C., Williams, G.M., Logan, V., Strutton, G.M., 2011b. Reduced Melanoma After Regular Sunscreen Use: Randomized Trial Follow-Up. *J. Clin. Oncol.* 29, 257–263. <https://doi.org/10.1200/JCO.2010.28.7078>
- Guan, L.L., Lim, H.W., Mohammad, T.F., 2021. Sunscreens and Photoaging: A Review of Current Literature. *Am. J. Clin. Dermatol.* 22, 819–828. <https://doi.org/10.1007/s40257-021-00632-5>
- Guo, H., Zeng, H., Hu, Y., Jiang, L., Lei, L., Hung, J., Fu, C., Li, H., Long, Y., Chen, J., Zeng, Q., 2023. UVB promotes melanogenesis by regulating METTL3. *J. Cell. Physiol.* 238, 2161–2171. <https://doi.org/10.1002/jcp.31077>
- Guo, L., Hsu, C., Lio, P., 2024. Sunscreens: What Might the Future Hold?
- Guo, Z., Yuan, K., 2025. The Application of Light Emitting Diode (LED) in Cosmetic Dermatology. *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.* 41, e70041. <https://doi.org/10.1111/phpp.70041>
- Guyuron, B., Rowe, D.J., Weinfeld, A.B., Eshraghi, Y., Fathi, A., Iamphongsai, S., 2009. Factors contributing to the facial aging of identical twins. *Plast. Reconstr. Surg.* 123, 1321–1331. <https://doi.org/10.1097/PRS.0b013e31819c4d42>
- Hacker, E., Horsham, C., Ford, H., Hartel, G., Olsen, C.M., Pandeya, N., Janda, M., 2019. UV detection stickers can assist people to reapply sunscreen. *Prev. Med.* 124, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2019.05.005>
- Haddad, S., Weise, J.J., Wagenpfeil, S., Vogt, T., Reichrath, J., 2025. Malignant Melanoma: Vitamin D Status as a Risk and Prognostic Factor – Meta-analyses and Systematic Review. *Anticancer Res.* 45, 27–37. <https://doi.org/10.21873/anticancer.17390>
- Haluza, D., Simic, S., Hölzge, J., Cervinka, R., Moshhammer, H., 2016. Gender aspects of recreational sun-protective behavior: results of a representative, population-based survey among Austrian residents. *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.* 32, 11–21. <https://doi.org/10.1111/phpp.12213>
- Hamel, R., Mohammad, T.F., Chahine, A., Joselow, A., Vick, G., Radosta, S., Boh, E., Alora-Palli, M., Mistur, R.L., Baron, E.D., Cooper, K.D., Lim, H.W., 2020. Comparison of racial distribution of photodermatoses in USA academic dermatology clinics: A multicenter retrospective analysis of 1080 patients over a 10-year period. *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.* 36, 233–240. <https://doi.org/10.1111/phpp.12543>
- Harris, B.W., Crane, J.S., Schlessinger, J., 2025. Solar Urticaria, in: *StatPearls*. StatPearls Publishing, Treasure Island (FL).
- Hartmann, D., Valenzuela, F., 2024. Sunproofing from within: A deep dive into oral photoprotection strategies in dermatology. *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.* 40, e12985. <https://doi.org/10.1111/phpp.12985>

- Hatsusaka, N., Seki, Y., Mita, N., Ukai, Y., Miyashita, H., Kubo, E., Sliney, D., Sasaki, H., 2021. UV Index Does Not Predict Ocular Ultraviolet Exposure. *Transl. Vis. Sci. Technol.* 10, 1. <https://doi.org/10.1167/tvst.10.7.1>
- He, H., Li, A., Li, S., Tang, J., Li, L., Xiong, L., 2021. Natural components in sunscreens: Topical formulations with sun protection factor (SPF). *Biomed. Pharmacother.* 134, 111161. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2020.111161>
- Heckman, C.J., Liang, K., Riley, M., 2019. Awareness, understanding, use, and impact of the UV index: A systematic review of over two decades of international research. *Prev. Med.* 123, 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2019.03.004>
- Henkler, F., Tralau, T., Tentschert, J., Kneuer, C., Haase, A., Platzek, T., Luch, A., Götz, M.E., 2012. Risk assessment of nanomaterials in cosmetics: a European union perspective. *Arch. Toxicol.* 86, 1641–1646. <https://doi.org/10.1007/s00204-012-0944-x>
- Hernández-Bule, M.L., Naharro-Rodríguez, J., Bacci, S., Fernández-Guarino, M., 2024. Unlocking the Power of Light on the Skin: A Comprehensive Review on Photobiomodulation. *Int. J. Mol. Sci.* 25, 4483. <https://doi.org/10.3390/ijms25084483>
- Hirsch-Kauffmann, M., Schweiger, M., 2006. *Biologie für Mediziner und Naturwissenschaftler*, 6., unveränderte Auflage. ed. Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York.
- Hodge, A.A., Hopkins, F.E., Saha, M., Jha, A.N., 2025. Ecotoxicological effects of sunscreen derived organic and inorganic UV filters on marine organisms: A critical review. *Mar. Pollut. Bull.* 213, 117627. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117627>
- Hofmann, S.C., Sárdy, M., Berneburg, M., 2024. Lichtdermatosen. *Dermatol.* 75, 515–517. <https://doi.org/10.1007/s00105-024-05371-2>
- Hohmann-Jeddi, C., 2024. Sonnenschutz ist keine Erlaubnis zum Sonnenbaden. *Pharm. Ztg.*
- Holman, D.M., Ding, H., Guy, G.P., Watson, M., Hartman, A.M., Perna, F.M., 2018. Prevalence of Sun Protection Use and Sunburn and Association of Demographic and Behavioral Characteristics With Sunburn Among US Adults. *JAMA Dermatol.* 154, 561. <https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2018.0028>
- Horton, L., Brady, J., Kincaid, C.M., Torres, A.E., Lim, H.W., 2023. The effects of infrared radiation on the human skin. *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.* 39, 549–555. <https://doi.org/10.1111/phpp.12899>
- Hui-Beckman, J.W., Leung, D.Y.M., 2023. Physical influences on the skin barrier and pathogenesis of allergy. *Curr. Opin. Pediatr.* 35, 656–662. <https://doi.org/10.1097/MOP.0000000000001289>
- Hunt, S.V., Jamison, A., Malhotra, R., 2023. Oral nicotinamide for non-melanoma skin cancers: A review. *Eye* 37, 823–829. <https://doi.org/10.1038/s41433-022-02036-z>
- Hussain, A., Thakker, S., Galaria, N., 2025. Effectiveness of an oral supplement containing *Polypodium leucotomos* in enhancing sun protection: a clinical evaluation of minimal erythema dose pre- and post-consumption. *Arch. Dermatol. Res.* 317, 580. <https://doi.org/10.1007/s00403-025-04055-8>
- Ichibori, R., Fujiwara, T., Tanigawa, T., Kanazawa, S., Shingaki, K., Torii, K., Tomita, K., Yano, K., Osaka Twin Research Group, Sakai, Y., Hosokawa, K., 2014. Objective assessment of facial skin aging and the associated environmental factors in Japanese monozygotic twins. *J. Cosmet. Dermatol.* 13, 158–163. <https://doi.org/10.1111/jocd.12081>

- Ida, O., Usman, A., Leila, E., 2023. Sun Protection: A Comprehensive 2022 Dermatologic Review. *J. Fam. Med. Dis. Prev.* 9. <https://doi.org/10.23937/2469-5793/1510154>
- Imhof, L., 2021. Elektromagnetische Strahlung in der Dermatologie. <https://doi.org/10.5167/UZH-207049>
- Ishihara, A., Courville, A.B., Chen, K.Y., 2023. The Complex Effects of Light on Metabolism in Humans. *Nutrients* 15, 1391. <https://doi.org/10.3390/nu15061391>
- Ivarsson, J., Pecorelli, A., Guiotto, A., Souza, M.M., Choudhary, H., Brieva, P., Ferrara, F., Valacchi, G., 2025. Comparing UV and Diesel Cutaneous Damage and Evaluating the Protective Role of a Topical Antioxidant Mixture Containing Vitamin C, E and Ferulic Acid. *Exp. Dermatol.* 34, e70069. <https://doi.org/10.1111/exd.70069>
- Jacques, C., Bacqueville, D., Jamin, E.L., Maitre, M., Delsol, C., Simcic-Mori, A., Bianchi, P., Noustens, A., Jouanin, I., Debrauwer, L., Bessou-Touya, S., Stockfleth, E., Duplan, H., 2024. Multi-omics approach to understand the impact of sun exposure on an in vitro skin ecosystem and evaluate a new broad-spectrum sunscreen. *Photochem. Photobiol.* 100, 477–490. <https://doi.org/10.1111/php.13841>
- Jesus, A., Sousa, E., Cruz, M., Cidade, H., Lobo, J., Almeida, I., 2022. UV Filters: Challenges and Prospects. *Pharmaceuticals* 15, 263. <https://doi.org/10.3390/ph15030263>
- Joensen, U.N., Jørgensen, N., Thyssen, J.P., Petersen, J.H., Szecsi, P.B., Stender, S., Andersson, A.-M., Skakkebæk, N.E., Frederiksen, H., 2017. Exposure to phenols, parabens and UV filters: Associations with loss-of-function mutations in the filaggrin gene in men from the general population. *Environ. Int.* 105, 105–111. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.05.013>
- Julian, A.K., Ferrer, R.A., Perna, F.M., 2023. Sun protection behavior: health impact, prevalence, correlates and interventions. *Psychol. Health* 38, 701–725. <https://doi.org/10.1080/08870446.2022.2146112>
- Just-Sarobé, M., 2025. Sunscreens and Their Impact on Human Health and the Environment: A Review. *Int. J. Dermatol.* <https://doi.org/10.1111/ijd.17800>
- Kam, O., Na, S., Guo, W., Tejada, C.I., Kaufmann, T., 2023. Frontal fibrosing alopecia and personal care product use: a systematic review and meta-analysis. *Arch. Dermatol. Res.* 315, 2313–2331. <https://doi.org/10.1007/s00403-023-02604-7>
- Karthikeyan, K., Aishwarya, M., 2021. Polymorphous Light Eruption– An Indian Scenario. *Indian Dermatol. Online J.* 12, 211–219. https://doi.org/10.4103/idoj.IDOJ_434_20
- Kaundinya, T., Kundu, R.V., Feinglass, J., 2022. The epidemiology of skin cancer by UV index: cross-sectional analysis from the 2019 behavioral risk factor surveillance survey. *Arch. Dermatol. Res.* 315, 613–615. <https://doi.org/10.1007/s00403-021-02313-z>
- Keller, A.A., 2023. Nanomaterials in sunscreens: Potential human and ecological health implications. *Int. J. Cosmet. Sci.* 45, 127–140. <https://doi.org/10.1111/ics.12905>
- Kim, M.S., An, J., Lee, J.H., Lee, S.H., Min, S., Kim, Y.B., Song, M., Park, S.H., Nam, K.Y., Park, H.J., Kim, K.S., Oh, S.H., Hahn, D., Moon, J., Park, J.W., Park, J.S., Kim, T., Kim, B.J., Lee, K.J., 2024a. Clinical Validation of Face-Fit Surface-Lighting Micro Light-Emitting Diode Mask for Skin Anti-Aging Treatment. *Adv. Mater.* 36, 2411651. <https://doi.org/10.1002/adma.202411651>
- Kim, M.S., An, J., Lee, J.H., Lee, S.H., Min, S., Kim, Y.B., Song, M., Park, S.H., Nam, K.Y., Park, H.J., Kim, K.S., Oh, S.H., Hahn, D., Moon, J., Park, J.W., Park, J.S., Kim, T., Kim, B.J., Lee, K.J., 2024b. Clinical Validation of Face-Fit

- Surface-Lighting Micro Light-Emitting Diode Mask for Skin Anti-Aging Treatment. *Adv. Mater.* 36, 2411651. <https://doi.org/10.1002/adma.202411651>
- Kim, S.K., You, H.R., Kim, S.H., Yun, S.J., Lee, S.C., Lee, J.B., 2016. Skin photorejuvenation effects of light-emitting diodes (LEDs): a comparative study of yellow and red LEDs *in vitro* and *in vivo*. *Clin. Exp. Dermatol.* 41, 798–805. <https://doi.org/10.1111/ced.12902>
- Kim, T.G., Chung, J., Han, J., Jin, K.H., Shin, J.-H., Moon, S.W., 2020. Photochemical Retinopathy induced by blue light emitted from a light-emitting diode Face Mask: A case report and literature review. *Medicine (Baltimore)* 99, e20568. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000020568>
- Klein, B., Kunz, M., 2022. Current concepts of photosensitivity in cutaneous lupus erythematosus. *Front. Med.* 9, 939594. <https://doi.org/10.3389/fmed.2022.939594>
- Kohli, I., Nicholson, C.L., Williams, J.D., Lyons, A.B., Seo, I., Maitra, P., Tian, X., Atillasoy, E., Lim, H.W., Hamzavi, I.H., 2020. Greater efficacy of SPF 100+ sunscreen compared with SPF 50+ in sunburn prevention during 5 consecutive days of sunlight exposure: A randomized, double-blind clinical trial. *J. Am. Acad. Dermatol.* 82, 869–877. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2019.09.018>
- Kricker, A., Armstrong, B., 2006. Does sunlight have a beneficial influence on certain cancers? *Prog. Biophys. Mol. Biol.* 92, 132–139. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2006.02.015>
- Krutmann, J., Berneburg, M., 2021. Lichtalterung (Photoaging) der Haut: Was gibt es Neues? *Hautarzt* 72, 2–5. <https://doi.org/10.1007/s00105-020-04747-4>
- Krutmann, J., Granger, C., Trullàs, C., Passeron, T., 2021. Daily photoprotection: What does it really mean? *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.* 37, 569–570. <https://doi.org/10.1111/phpp.12707>
- Krutmann, J., Passeron, T., Gilaberte, Y., Granger, C., Leone, G., Narda, M., Schalka, S., Trullàs, C., Masson, P., Lim, H.W., 2020. Photoprotection of the future: challenges and opportunities. *J. Eur. Acad. Dermatol. Venereol. JEADV* 34, 447–454. <https://doi.org/10.1111/jdv.16030>
- Krutmann, J., Piquero-Casals, J., Morgado-Carrasco, D., Granger, C., Trullàs, C., Passeron, T., Lim, H.W., 2023. Photoprotection for people with skin of colour: needs and strategies. *Br. J. Dermatol.* 188, 168–175. <https://doi.org/10.1093/bjd/ljac046>
- Kukkola, A., Chetwynd, A.J., Krause, S., Lynch, I., 2024. Beyond microbeads: Examining the role of cosmetics in microplastic pollution and spotlighting unanswered questions. *J. Hazard. Mater.* 476, 135053. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135053>
- Kurz, B., Klein, B., Berneburg, M., Meller, S., 2024. UV-induzierte Pathogenese des Lupus erythematoses. *Dermatol.* 75, 528–538. <https://doi.org/10.1007/s00105-024-05369-w>
- Lademann, J., Vergou, T., Darvin, M.E., Patzelt, A., Meinke, M.C., Voit, C., Papakostas, D., Zastrow, L., Sterry, W., Doucet, O., 2016. Influence of Topical, Systemic and Combined Application of Antioxidants on the Barrier Properties of the Human Skin. *Skin Pharmacol. Physiol.* 29, 41–46. <https://doi.org/10.1159/000441953>
- Lagacé, F., Noorah, B.N., Conte, S., Mija, L.A., Chang, J., Cattelan, L., LeBeau, J., Claveau, J., Turchin, I., Gulliver, W., Gniadecki, R., Netchiporouk, E., Miller Jr., W.H., Salopek, T.G., Rahme, E., Peláez, S., Litvinov, I.V., 2023. Assessing Skin Cancer Risk Factors, Sun Safety Behaviors and Melanoma Concern in Atlantic Canada: A Comprehensive Survey Study. *Cancers* 15, 3753. <https://doi.org/10.3390/cancers15153753>

- Lambert, M.W., Maddukuri, S., Karanfilian, K.M., Elias, M.L., Lambert, W.C., 2019. The physiology of melanin deposition in health and disease. *Clin. Dermatol.* 37, 402–417. <https://doi.org/10.1016/j.clindermatol.2019.07.013>
- Lapides, R., Saravi, B., Mueller, A., Wang-Evers, M., Maul, L.V., Németh, I., Navarini, A., Manstein, D., Roider, E., 2023. Possible Explanations for Rising Melanoma Rates Despite Increased Sunscreen Use over the Past Several Decades. *Cancers* 15, 5868. <https://doi.org/10.3390/cancers15245868>
- Lashway, S.G., Harris, R.B., Farland, L.V., O'Rourke, M.K., Dennis, L.K., 2021. Age and Cohort Trends of Malignant Melanoma in the United States. *Cancers* 13, 3866. <https://doi.org/10.3390/cancers13153866>
- Laughter, M.R., Anderson, J.B., Aguilera, M.N., Sadeghpour, M., Pugliano-Mauro, M., 2021. Indoor tanning: Evidence surrounding advertised health claims. *Clin. Dermatol.* 39, 865–872. <https://doi.org/10.1016/j.clindermatol.2021.08.015>
- Lawler, S., Sugiyama, T., Owen, N., 2007. Sun exposure concern, sun protection behaviors and physical activity among Australian adults. *Cancer Causes Control* 18, 1009–1014. <https://doi.org/10.1007/s10552-007-9041-5>
- Lax, C., Wicksell, E., Grip, A., Niemi, J.V.L., Liu, W., Rafeletou, A., Kudłak, B., Schiöth, H.B., 2023. The effect of sunscreen 4-methylbenzylidene camphor in different and reproductive models, its bioaccumulation and molecular effects on ligand-receptor interaction, and protein expression. *Basic Clin. Pharmacol. Toxicol.* 133, 130–141. <https://doi.org/10.1111/bcpt.13901>
- Lebaron, P., 2022. UV filters and their impact on marine life: state of the science, data gaps, and next steps. *J. Eur. Acad. Dermatol. Venereol.* 36, 22–28. <https://doi.org/10.1111/jdv.18198>
- Lee, A., Garbutcheon-Singh, K.B., Dixit, S., Brown, P., Smith, S.D., 2015. The influence of age and gender in knowledge, behaviors and attitudes towards sun protection: a cross-sectional survey of Australian outpatient clinic attendees. *Am. J. Clin. Dermatol.* 16, 47–54. <https://doi.org/10.1007/s40257-014-0106-4>
- Lee, J.H., Ahn, Y., Lee, H.E., Jang, Y.N., Park, A.Y., Kim, S., Jung, Y.H., Sung, S.H., Shin, J.H., Lee, S.H., Park, S.H., Kim, K.S., Jang, M.S., Kim, B.J., Oh, S.H., Lee, K.J., 2023. Wearable Surface-Lighting Micro-Light-Emitting Diode Patch for Melanogenesis Inhibition. *Adv. Healthc. Mater.* 12, 2201796. <https://doi.org/10.1002/adhm.202201796>
- Lee, J.H., Kim, M.S., Lee, S.H., Park, S.H., Nam, K.Y., An, J., Song, M., Kim, K.S., Oh, S.H., Kim, T.-S., Lee, K.J., 2025. Flexible, surface-lighting MicroLED skin patch for multiple human skincare. *Biomaterials* 318, 123139. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2025.123139>
- Leecharoen, W., Thanomkitti, K., Thuangtong, R., Varothai, S., Triwongwaranat, D., Jiamton, S., Kulthanan, K., 2021. Use of facial care products and frontal fibrosing alopecia: Coincidence or true association? *J. Dermatol.* 48, 1557–1563. <https://doi.org/10.1111/1346-8138.16063>
- LeGates, T.A., Fernandez, D.C., Hattar, S., 2014. Light as a central modulator of circadian rhythms, sleep and affect. *Nat. Rev. Neurosci.* 15, 443–454. <https://doi.org/10.1038/nrn3743>
- Leiter, U., Keim, U., Garbe, C., 2020. Epidemiology of Skin Cancer: Update 2019. *Adv. Exp. Med. Biol.* 1268, 123–139. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46227-7_6
- Li, W., Seo, I., Kim, B., Fassih, A., Southall, M.D., Parsa, R., 2021. Low-level red plus near infrared lights combination induces expressions of collagen and elastin in human skin *in vitro*. *Int. J. Cosmet. Sci.* 43, 311–320. <https://doi.org/10.1111/ics.12698>

- Lim, H.W., Saint Aroman, M., Skayem, C., Halioua, B., Perez Cullell, N., Ben Hayoun, Y., Baissac, C., Bergqvist, C., Taieb, C., Richard, M., Ezzedine, K., 2024. Sun exposure and protection habits: Self-reported attitudes, knowledge and behaviours. *J. Eur. Acad. Dermatol. Venereol.* 38, 2024–2033. <https://doi.org/10.1111/jdv.20080>
- Lindqvist, P.G., Epstein, E., Landin-Olsson, M., 2022. Sun Exposure - Hazards and Benefits. *Anticancer Res.* 42, 1671–1677. <https://doi.org/10.21873/anticancer.15644>
- Liu, H.-M., Cheng, M.-Y., Xun, M.-H., Zhao, Z.-W., Zhang, Y., Tang, W., Cheng, J., Ni, J., Wang, W., 2023. Possible Mechanisms of Oxidative Stress-Induced Skin Cellular Senescence, Inflammation, and Cancer and the Therapeutic Potential of Plant Polyphenols. *Int. J. Mol. Sci.* 24, 3755. <https://doi.org/10.3390/ijms24043755>
- Lodén, M., Beitner, H., Gonzalez, H., Edström, D.W., Åkerström, U., Austad, J., Buraczewska-Norin, I., Matsson, M., Wulf, H.C., 2011. Sunscreen use: controversies, challenges and regulatory aspects: Sunscreen use. *Br. J. Dermatol.* 165, 255–262. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2011.10298.x>
- Lu, J.T., Ilyas, E., 2022. An Overview of Ultraviolet-Protective Clothing. *Cureus.* <https://doi.org/10.7759/cureus.27333>
- Lucas, R.M., Yazar, S., Young, A.R., Norval, M., De Gruijl, F.R., Takizawa, Y., Rhodes, L.E., Sinclair, C.A., Neale, R.E., 2019. Human health in relation to exposure to solar ultraviolet radiation under changing stratospheric ozone and climate. *Photochem. Photobiol. Sci.* 18, 641–680. <https://doi.org/10.1039/c8pp90060d>
- Luze, H., Nischwitz, S.P., Zalaudek, I., Müllegger, R., Kamolz, L.P., 2020. DNA repair enzymes in sunscreens and their impact on photoageing—A systematic review. *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.* 36, 424–432. <https://doi.org/10.1111/phpp.12597>
- Ma, J., Wang, Z., Qin, C., Wang, T., Hu, X., Ling, W., 2023. Safety of benzophenone-type UV filters: A mini review focusing on carcinogenicity, reproductive and developmental toxicity. *Chemosphere* 326, 138455. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138455>
- Ma, Y., Li, C., Su, W., Sun, Z., Gao, S., Xie, W., Zhang, B., Sui, L., 2025. Carotenoids in Skin Photoaging: Unveiling Protective Effects, Molecular Insights, and Safety and Bioavailability Frontiers. *Antioxid. Basel Switz.* 14, 577. <https://doi.org/10.3390/antiox14050577>
- Ma, Y., Yoo, J., 2021. History of sunscreen: An updated view. *J. Cosmet. Dermatol.* 20, 1044–1049. <https://doi.org/10.1111/jocd.14004>
- Madison, K.C., 2003. Barrier Function of the Skin: “La Raison d’Être” of the Epidermis. *J. Invest. Dermatol.* 121, 231–241. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1747.2003.12359.x>
- Mahmoud, B.H., Ruvolo, E., Hexsel, C.L., Liu, Y., Owen, M.R., Kollias, N., Lim, H.W., Hamzavi, I.H., 2010. Impact of Long-Wavelength UVA and Visible Light on Melanocompetent Skin. *J. Invest. Dermatol.* 130, 2092–2097. <https://doi.org/10.1038/jid.2010.95>
- Mancebo, S.E., Hu, J.Y., Wang, S.Q., 2014a. Sunscreens. *Dermatol. Clin.* 32, 427–438. <https://doi.org/10.1016/j.det.2014.03.011>
- Mancebo, S.E., Hu, J.Y., Wang, S.Q., 2014b. Sunscreens. *Dermatol. Clin.* 32, 427–438. <https://doi.org/10.1016/j.det.2014.03.011>
- Mancuso, J.B., Maruthi, R., Wang, S.Q., Lim, H.W., 2017. Sunscreens: An Update. *Am. J. Clin. Dermatol.* 18, 643–650. <https://doi.org/10.1007/s40257-017-0290-0>
- Marcellini, F., Varrella, S., Ghilardi, M., Barucca, G., Giorgetti, A., Danovaro, R., Corinaldesi, C., 2024. Inorganic UV filter-based sunscreens labelled as eco-friendly

- threaten sea urchin populations. *Environ. Pollut.* 351, 124093.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124093>
- Marionnet, C., Piffaut, V., Sasai, J., Jouni, H., Nouveau, S., Roudot, A., Planel, E., Gillant, F., Tricaud, C., Duteil, L., Bernerd, F., 2023. A precise analysis of the relative contribution of UVA1 and visible light colour domains in solar light-induced skin pigmentation. *J. Eur. Acad. Dermatol. Venereol.* 37, 3–11.
<https://doi.org/10.1111/jdv.18948>
- Mascarenhas-Melo, F., Mathur, A., Murugappan, S., Sharma, A., Tanwar, K., Dua, K., Singh, S.K., Mazzola, P.G., Yadav, D.N., Rengan, A.K., Veiga, F., Paiva-Santos, A.C., 2023. Inorganic nanoparticles in dermopharmaceutical and cosmetic products: Properties, formulation development, toxicity, and regulatory issues. *Eur. J. Pharm. Biopharm.* 192, 25–40. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2023.09.011>
- Mastroeni, S., Sampogna, F., Salcedo, N.M., Ricci, F., Fania, L., Antonelli, F., Abeni, D., Cristofolini, M., 2021. Factors associated with sunbed use among 3692 outpatients in 18 centers of the Italian Cancer League (LILT). *Sci. Rep.* 11, 23180.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-02026-3>
- Matta, M.K., Florian, J., Zusterzeel, R., Pilli, N.R., Patel, V., Volpe, D.A., Yang, Y., Oh, L., Bashaw, E., Zineh, I., Sanabria, C., Kemp, S., Godfrey, A., Adah, S., Coelho, S., Wang, J., Furlong, L.-A., Ganley, C., Michele, T., Strauss, D.G., 2020. Effect of Sunscreen Application on Plasma Concentration of Sunscreen Active Ingredients: A Randomized Clinical Trial. *JAMA* 323, 256.
<https://doi.org/10.1001/jama.2019.20747>
- Matta, M.K., Zusterzeel, R., Pilli, N.R., Patel, V., Volpe, D.A., Florian, J., Oh, L., Bashaw, E., Zineh, I., Sanabria, C., Kemp, S., Godfrey, A., Adah, S., Coelho, S., Wang, J., Furlong, L.-A., Ganley, C., Michele, T., Strauss, D.G., 2019. Effect of Sunscreen Application Under Maximal Use Conditions on Plasma Concentration of Sunscreen Active Ingredients: A Randomized Clinical Trial. *JAMA* 321, 2082.
<https://doi.org/10.1001/jama.2019.5586>
- Maverakis, E., Miyamura, Y., Bowen, M.P., Correa, G., Ono, Y., Goodarzi, H., 2010. Light, including ultraviolet. *J. Autoimmun.* 34, J247–J257.
<https://doi.org/10.1016/j.jaut.2009.11.011>
- Maz, M.P., Martens, J.W.S., Hannoudi, A., Reddy, A.L., Hile, G.A., Kahlenberg, J.M., 2022. Recent advances in cutaneous lupus. *J. Autoimmun.* 132, 102865.
<https://doi.org/10.1016/j.jaut.2022.102865>
- McCarty, M.F., Benzvi, C., Vojdani, A., Lerner, A., 2023. Nutraceutical strategies for alleviation of UVB phototoxicity. *Exp. Dermatol.* 32, 722–730.
<https://doi.org/10.1111/exd.14777>
- McDonald, K.A., Lytvyn, Y., Mufti, A., Chan, A.-W., Rosen, C.F., 2023a. Review on photoprotection: a clinician’s guide to the ingredients, characteristics, adverse effects, and disease-specific benefits of chemical and physical sunscreen compounds. *Arch. Dermatol. Res.* 315, 735–749. <https://doi.org/10.1007/s00403-022-02483-4>
- McDonald, K.A., Lytvyn, Y., Mufti, A., Chan, A.-W., Rosen, C.F., 2023b. Review on photoprotection: a clinician’s guide to the ingredients, characteristics, adverse effects, and disease-specific benefits of chemical and physical sunscreen compounds. *Arch. Dermatol. Res.* 315, 735–749. <https://doi.org/10.1007/s00403-022-02483-4>
- McKenzie, C., Nahm, W.J., Kearney, C.A., Zampella, J.G., 2023. Sun-protective behaviors and sunburn among US adults. *Arch. Dermatol. Res.* 315, 1665–1674.
<https://doi.org/10.1007/s00403-023-02547-z>

- McSweeney, S.M., Sarkany, R., Fassih, H., Tziotziou, C., McGrath, J.A., 2022. Pathogenesis of solar urticaria: Classic perspectives and emerging concepts. *Exp. Dermatol.* 31, 586–593. <https://doi.org/10.1111/exd.14493>
- Melián-Olivera, A., Imbernón-Moya, A., Porriño-Bustamante, M.L., Pindado-Ortega, C., Fernandes-Melo, D., Saceda-Corralo, D., 2025. Frontal Fibrosing Alopecia in Men: A Review of the Literature. *J. Clin. Med.* 14, 1914. <https://doi.org/10.3390/jcm14061914>
- Messenger, A.G., Asfour, L., Harries, M., 2025. Frontal Fibrosing Alopecia: An Update. *Am. J. Clin. Dermatol.* 26, 155–174. <https://doi.org/10.1007/s40257-024-00912-w>
- Michalak, M., 2022. Plant-Derived Antioxidants: Significance in Skin Health and the Ageing Process. *Int. J. Mol. Sci.* 23, 585. <https://doi.org/10.3390/ijms23020585>
- Millard, T.P., Hawk, J.L.M., 2002. Photosensitivity Disorders: Cause, Effect and Management. *Am. J. Clin. Dermatol.* 3, 239–246. <https://doi.org/10.2165/00128071-200203040-00002>
- Mima, Y., Yamada, T., Omatsu, J., Yamashita, T., Suzuki, S., Takechi, T., Ichikawa, M., Yamazaki, K., Sato, S., Yoshizaki, A., 2025. Inhibitory Effect of 505 nm Green Light Emitting Diode on Melanin Synthesis in Cellular Experiments and a Human Intervention Study. *Acta Derm. Venereol.* 105, adv43441. <https://doi.org/10.2340/actadv.v105.43441>
- Mineroff, J., Austin, E., Feit, E., Ho, A., Lowe, B., Marson, J., Mojeski, J., Wechter, T., Nguyen, J.K., Jagdeo, J., 2023. Male facial rejuvenation using a combination 633, 830, and 1072 nm LED face mask. *Arch. Dermatol. Res.* 315, 2605–2611. <https://doi.org/10.1007/s00403-023-02663-w>
- Miranda, J.A., Cruz, Y.F.D., Girão, Í.C., Souza, F.J.J.D., Oliveira, W.N.D., Alencar, É.D.N., Amaral-Machado, L., Egito, E.S.T.D., 2024. Beyond Traditional Sunscreens: A Review of Liposomal-Based Systems for Photoprotection. *Pharmaceutics* 16, 661. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16050661>
- Moan, J., Porojnicu, A.C., Dahlback, A., Setlow, R.B., 2008. Addressing the health benefits and risks, involving vitamin D or skin cancer, of increased sun exposure. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 105, 668–673. <https://doi.org/10.1073/pnas.0710615105>
- Mohania, D., Chandel, S., Kumar, P., Verma, V., Digvijay, K., Tripathi, D., Choudhury, K., Mitten, S.K., Shah, D., 2017a. Ultraviolet Radiations: Skin Defense-Damage Mechanism, in: Ahmad, S.I. (Ed.), *Ultraviolet Light in Human Health, Diseases and Environment, Advances in Experimental Medicine and Biology*. Springer International Publishing, Cham, pp. 71–87. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56017-5_7
- Mohania, D., Chandel, S., Kumar, P., Verma, V., Digvijay, K., Tripathi, D., Choudhury, K., Mitten, S.K., Shah, D., 2017b. Ultraviolet Radiations: Skin Defense-Damage Mechanism, in: Ahmad, S.I. (Ed.), *Ultraviolet Light in Human Health, Diseases and Environment, Advances in Experimental Medicine and Biology*. Springer International Publishing, Cham, pp. 71–87. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56017-5_7
- Montero, P., Roger, I., Milara, J., Cortijo, J., 2023. Damaging effects of UVA, blue light, and infrared radiation: in vitro assessment on a reconstructed full-thickness human skin. *Front. Med.* 10, 1267409. <https://doi.org/10.3389/fmed.2023.1267409>
- Morris, K.L., Perna, F.M., 2018. Decision Tree Model vs Traditional Measures to Identify Patterns of Sun-Protective Behaviors and Sun Sensitivity Associated With Sunburn. *JAMA Dermatol.* 154, 897. <https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2018.1646>
- Murray, J.C., Burch, J.A., Streilein, R.D., Iannacchione, M.A., Hall, R.P., Pinnell, S.R., 2008. A topical antioxidant solution containing vitamins C and E stabilized by

- ferulic acid provides protection for human skin against damage caused by ultraviolet irradiation. *J. Am. Acad. Dermatol.* 59, 418–425.
<https://doi.org/10.1016/j.jaad.2008.05.004>
- Mustieles, V., Balogh, R.K., Axelstad, M., Montazeri, P., Márquez, S., Vrijheid, M., Draskau, M.K., Taxvig, C., Peinado, F.M., Berman, T., Frederiksen, H., Fernández, M.F., Marie Vinggaard, A., Andersson, A.-M., 2023. Benzophenone-3: Comprehensive review of the toxicological and human evidence with meta-analysis of human biomonitoring studies. *Environ. Int.* 173, 107739.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107739>
- Nam, K.Y., Kim, M.S., An, J., Min, S., Lee, J.H., Park, J.S., Huh, C., Yun, S.H., Lee, K.J., 2025. Human-Centric, Three Dimensional Micro Light-Emitting Diodes for Cosmetic and Medical Phototherapy. *Adv. Sci.* 12, 2416716.
<https://doi.org/10.1002/advs.202416716>
- Naseer, M., Asad, N., Javid, A., Moughal, R., Akram, H., Mudassir, S., Asif, M.I., Maheshwary, N., Ahmed, A., 2024. Participants' Experiences and Satisfaction With Sun Protection Factor (SPF) 100 Sunscreen in Actual Use Conditions. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.61212>
- Natarelli, N., Aflatooni, S., Stankiewicz, K., Correa-Selm, L., Sivamani, R.K., 2025. Oral Supplements and Photoprotection: A Systematic Review. *J. Med. Food* 28, 519–541. <https://doi.org/10.1089/jmf.2024.0023>
- Neale, R.E., Lucas, R.M., Byrne, S.N., Hollestein, L., Rhodes, L.E., Yazar, S., Young, A.R., Berwick, M., Ireland, R.A., Olsen, C.M., 2023. The effects of exposure to solar radiation on human health. *Photochem. Photobiol. Sci.* 22, 1011–1047.
<https://doi.org/10.1007/s43630-023-00375-8>
- Ngoc, L.T.N., Moon, J., Lee, Y., 2023. Utilization of light-emitting diodes for skin therapy: Systematic review and meta-analysis. *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.* 39, 303–317. <https://doi.org/10.1111/phpp.12841>
- O'Connor, C., Rafferty, S., Murphy, M., 2022. A qualitative review of misinformation and conspiracy theories in skin cancer. *Clin. Exp. Dermatol.* 47, 1848–1852.
<https://doi.org/10.1111/ced.15249>
- O'Leary, R.E., Diehl, J., Levins, P.C., 2014. Update on tanning: More risks, fewer benefits. *J. Am. Acad. Dermatol.* 70, 562–568.
<https://doi.org/10.1016/j.jaad.2013.11.004>
- Olsen, C.M., Pandeya, N., Ragaini, B.S., Neale, R.E., Whiteman, D.C., 2024. International patterns and trends in the incidence of melanoma and cutaneous squamous cell carcinoma, 1989-2020. *Br. J. Dermatol.* 190, 492–500.
<https://doi.org/10.1093/bjd/ljad425>
- Onyango, D.O., Selman, B.G., Rose, J.L., Ellison, C.A., Nash, J.F., 2023. Comparison between endocrine activity assessed using ToxCast/Tox21 database and human plasma concentration of sunscreen active ingredients/UV filters. *Toxicol. Sci.* 196, 25–37. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfad082>
- Opländer, C., Hidding, S., Werners, F.B., Born, M., Pallua, N., Suschek, C.V., 2011. Effects of blue light irradiation on human dermal fibroblasts. *J. Photochem. Photobiol. B* 103, 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2011.02.018>
- Osterwalder, U., Herzog, B., 2009. Sun protection factors: world wide confusion. *Br. J. Dermatol.* 161, 13–24. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2009.09506.x>
- Owczarek, M., Jałowska, M., Mariowska, A., Grochowska, W., Szyszkowska, J., Metelkina, D., Spalek, M.M., 2025. FFA Patient Profile Analysis Based on the Authors' Observations and a Review of the Literature—An Original Survey. *J. Clin. Med.* 14, 4346. <https://doi.org/10.3390/jcm14124346>

- Paiva, J.P., Diniz, R.R., Leitão, A.C., Cabral, L.M., Fortunato, R.S., Santos, B.A.M.C., De Pádula, M., 2020. Insights and controversies on sunscreen safety. *Crit. Rev. Toxicol.* 50, 707–723. <https://doi.org/10.1080/10408444.2020.1826899>
- Pantelic, M.N., Wong, N., Kwa, M., Lim, H.W., 2023. Ultraviolet filters in the United States and European Union: A review of safety and implications for the future of US sunscreens. *J. Am. Acad. Dermatol.* 88, 632–646. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2022.11.039>
- Park, S.H., Park, S.O., Jung, J.-A., 2025. Clinical study to evaluate the efficacy and safety of home-used LED and IRED mask for crow’s feet: A multi-center, randomized, double-blind, sham-controlled study. *Medicine (Baltimore)* 104, e41596. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000041596>
- Pastor-Nieto, M.A., Gatica-Ortega, M.E., Borrego, L., 2024. Sensitisation to ethylhexyl salicylate: Another piece of the frontal fibrosing alopecia puzzle. *Contact Dermatitis* 90, 402–410. <https://doi.org/10.1111/cod.14463>
- Patel, S.P., Chien, A.L., 2021. Sun Protective Clothing and Sun Avoidance: The Most Critical Components of Photoprotection in Patients With Melanoma. *Dermatol. Surg.* 47, 333–337. <https://doi.org/10.1097/DSS.0000000000002794>
- Pauwels, M., Rogiers, V., 2010. Human health safety evaluation of cosmetics in the EU: A legally imposed challenge to science. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 243, 260–274. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2009.12.007>
- Pellacani, G., Lim, H.W., Stockfleth, E., Sibaud, V., Brugués, A.O., Saint Aroman, M., 2024a. Photoprotection: Current developments and controversies. *J. Eur. Acad. Dermatol. Venereol.* 38, 12–20. <https://doi.org/10.1111/jdv.19677>
- Pellacani, G., Lim, H.W., Stockfleth, E., Sibaud, V., Brugués, A.O., Saint Aroman, M., 2024b. Photoprotection: Current developments and controversies. *J. Eur. Acad. Dermatol. Venereol.* 38, 12–20. <https://doi.org/10.1111/jdv.19677>
- Pinnell, S.R., 2003. Cutaneous photodamage, oxidative stress, and topical antioxidant protection. *J. Am. Acad. Dermatol.* 48, 1–22. <https://doi.org/10.1067/mjd.2003.16>
- Piovani, D., Brunetta, E., Bonovas, S., 2023. UV radiation and air pollution as drivers of major autoimmune conditions. *Environ. Res.* 224, 115449. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115449>
- Porriño-Bustamante, M.L., Montero-Vilchez, T., Pinedo-Moraleda, F.J., Fernández-Flores, Á., Fernández-Pugnaire, M.A., Arias-Santiago, S., 2022. Frontal Fibrosing Alopecia and Sunscreen Use: A Cross-sectional Study of Actinic Damage. *Acta Derm. Venereol.* 102, adv00757. <https://doi.org/10.2340/actadv.v102.306>
- Pourang, A., Tisack, A., Ezekwe, N., Torres, A.E., Kohli, I., Hamzavi, I.H., Lim, H.W., 2022. Effects of visible light on mechanisms of skin photoaging. *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.* 38, 191–196. <https://doi.org/10.1111/phpp.12736>
- Proksch, E., Brandner, J.M., Jensen, J., 2008. The skin: an indispensable barrier. *Exp. Dermatol.* 17, 1063–1072. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0625.2008.00786.x>
- Proksch, E., Fölster-Holst, R., Bräutigam, M., Sepehrmanesh, M., Pfeiffer, S., Jensen, J., 2009. Role of the epidermal barrier in atopic dermatitis. *JDDG J. Dtsch. Dermatol. Ges.* 7, 899–910. <https://doi.org/10.1111/j.1610-0387.2009.07157.x>
- PS-Access to Sunscreen_Sun Protective Clothing, n.d.
- Pudlarz, A.M., Ranoszek-Soliwoda, K., Karbownik, M.S., Czechowska, E., Tomaszewska, E., Celichowski, G., Grobelny, J., Chabielska, E., Gromotowicz-Popławska, A., Szemraj, J., 2022. Antioxidant enzymes immobilized on gold and silver nanoparticles enhance DNA repairing systems of rat skin after exposure to ultraviolet radiation. *Nanomedicine Nanotechnol. Biol. Med.* 43, 102558. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2022.102558>

- Rafeletou, A., Niemi, J.V.L., Lagunas-Rangel, F.A., Liu, W., Kudlak, B., Schiöth, H.B., 2024. The exposure to UV filters: Prevalence, effects, possible molecular mechanisms of action and interactions within mixtures. *Sci. Total Environ.* 928, 170999. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170999>
- Raimondi, S., Suppa, M., Gandini, S., 2020. Melanoma Epidemiology and Sun Exposure. *Acta Derm. Venereol.* 100, adv00136. <https://doi.org/10.2340/00015555-3491>
- Rajasekar, M., Mary, J., Sivakumar, M., Selvam, M., 2024. Recent developments in sunscreens based on chromophore compounds and nanoparticles. *RSC Adv.* 14, 2529–2563. <https://doi.org/10.1039/D3RA08178H>
- Ramírez, N., Serey, M., Illanes, A., Piumetti, M., Ottone, C., 2021. Immobilization strategies of photolyases: Challenges and perspectives for DNA repairing application. *J. Photochem. Photobiol. B* 215, 112113. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2020.112113>
- Ramos, P.M., Anzai, A., Duque-Estrada, B., Farias, D.C., Melo, D.F., Mulinari-Brenner, F., Pinto, G.M., Abraham, L.S., Santos, L.D.N., Pirmez, R., Miot, H.A., 2021. Risk factors for frontal fibrosing alopecia: A case-control study in a multiracial population. *J. Am. Acad. Dermatol.* 84, 712–718. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2020.08.076>
- Rauhala, L., Hämäläinen, L., Salonen, P., Bart, G., Tammi, M., Pasonen-Seppänen, S., Tammi, R., 2013. Low Dose Ultraviolet B Irradiation Increases Hyaluronan Synthesis in Epidermal Keratinocytes via Sequential Induction of Hyaluronan Synthases Has1–3 Mediated by p38 and Ca²⁺/Calmodulin-dependent Protein Kinase II (CaMKII) Signaling*. *J. Biol. Chem.* 288, 17999–18012. <https://doi.org/10.1074/jbc.M113.472530>
- Regazzetti, C., Sormani, L., Debayle, D., Bernerd, F., Tulic, M.K., De Donatis, G.M., Chignon-Sicard, B., Rocchi, S., Passeron, T., 2018. Melanocytes Sense Blue Light and Regulate Pigmentation through Opsin-3. *J. Invest. Dermatol.* 138, 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.jid.2017.07.833>
- Reichrath, J., 2020. Lessons Learned from Paleolithic Models and Evolution for Human Health: A Snap Shot on Beneficial Effects and Risks of Solar Radiation, in: Reichrath, J. (Ed.), *Sunlight, Vitamin D and Skin Cancer, Advances in Experimental Medicine and Biology*. Springer International Publishing, Cham, pp. 3–15. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46227-7_1
- Rigel, D.S., Lim, H.W., Draelos, Z.D., Weber, T.M., Taylor, S.C., 2022. Photoprotection for all: Current gaps and opportunities. *J. Am. Acad. Dermatol.* 86, S18–S26. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2021.12.023>
- Robert, C., Bonnet, M., Marques, S., Numa, M., Doucet, O., 2015. Low to Moderate Doses of Infrared A Irradiation Impair Extracellular Matrix Homeostasis of the Skin and Contribute to Skin Photodamage. *Skin Pharmacol. Physiol.* 28, 196–204. <https://doi.org/10.1159/000369829>
- Roberts, C., Goldstein, E., Goldstein, B., Jarman, K., Paci, K., Goldstein, A., 2021. Men's Attitudes and Behaviors About Skincare and Sunscreen Use Behaviors. *J. Drugs Dermatol.* 20, 88–93. <https://doi.org/10.36849/JDD.5470>
- Roberts, C.A., Goldstein, E.K., Goldstein, B.G., Jarman, K.L., Paci, K., Goldstein, A.O., 2021. Men's Attitudes and Behaviors About Skincare and Sunscreen Use Behaviors. *JDDonline - J. Drugs Dermatol.* URL <https://jddonline.com/articles/mens-attitudes-and-behaviors-about-skincare-and-sunscreen-use-behaviors-S1545961621P0088X/> (accessed 2.14.25).
- Robinson, J.K., Rademaker, A.W., 1998. Sun Protection by Families at the Beach. *Arch. Pediatr. Adolesc. Med.* 152. <https://doi.org/10.1001/archpedi.152.5.466>

- Rodriguez-Acevedo, A.J., Green, A.C., Sinclair, C., Deventer, E., Gordon, L.G., 2020. Indoor tanning prevalence after the International Agency for Research on Cancer statement on carcinogenicity of artificial tanning devices: systematic review and meta-analysis. *Br. J. Dermatol.* 182, 849–859. <https://doi.org/10.1111/bjd.18412>
- Romanhole, R.C., Ataide, J.A., Moriel, P., Mazzola, P.G., 2015. Update on ultraviolet A and B radiation generated by the sun and artificial lamps and their effects on skin. *Int. J. Cosmet. Sci.* 37, 366–370. <https://doi.org/10.1111/ics.12219>
- Sabzevari, N., Qiblawi, S., Norton, S.A., Fivenson, D., 2021. Sunscreens: UV filters to protect us: Part 1: Changing regulations and choices for optimal sun protection. *Int. J. Womens Dermatol.* 7, 28–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijwd.2020.05.017>
- Safian, M.T., Raja, P.B., Muniandy, K., Karam Chand, N.S., Mohd Sahak, M.Z., Shaharudin, S., Mohamad Ibrahim, M.N., 2025. The dual challenge of FDA-evaluated non-GRASE UV filters: Photostability and systemic absorption – A path toward safer and more effective sunscreens. *Int. J. Pharm.* 680, 125790. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2025.125790>
- Sakkaravarthi, V., 2022. History of sunscreen. *Cosmoderma* 2, 16. https://doi.org/10.25259/CSDM_11_2022
- Salih, H., Psomadakis, C., George, S.M.C., 2024. Sunscreens: A Narrative Review. *Skin Health Dis.* 4, ski2.432. <https://doi.org/10.1002/ski2.432>
- Schmidt-Borko, K., 2011. Tanorexie - eine neue Lifestyle-Erkrankung. *DMW - Dtsch. Med. Wochenschr.* 136, p16–p16. <https://doi.org/10.1055/s-0031-1271834>
- Schmuth, M., Eckmann, S., Moosbrugger-Martinz, V., Ortner-Tobider, D., Blunder, S., Trafoier, T., Gruber, R., Elias, P.M., 2024. Skin Barrier in Atopic Dermatitis. *J. Invest. Dermatol.* 144, 989-1000.e1. <https://doi.org/10.1016/j.jid.2024.03.006>
- Schneider, S., Diehl, K., Bock, C., Schlüter, M., Breitbart, E.W., Volkmer, B., Greinert, R., 2013. Sunbed Use, User Characteristics, and Motivations for Tanning: Results From the German Population-Based SUN-Study 2012. *JAMA Dermatol.* 149, 43. <https://doi.org/10.1001/2013.jamadermatol.562>
- Schroeder, P., Calles, C., Benesova, T., Macaluso, F., Krutmann, J., 2010. Photoprotection beyond Ultraviolet Radiation – Effective Sun Protection Has to Include Protection against Infrared A Radiation-Induced Skin Damage. *Skin Pharmacol. Physiol.* 23, 15–17. <https://doi.org/10.1159/000257259>
- Schroeder, P., Lademann, J., Darvin, M.E., Stege, H., Marks, C., Bruhnke, S., Krutmann, J., 2008. Infrared Radiation-Induced Matrix Metalloproteinase in Human Skin: Implications for Protection. *J. Invest. Dermatol.* 128, 2491–2497. <https://doi.org/10.1038/jid.2008.116>
- Schuetz, R., Claypool, J., Sfriso, R., Vollhardt, J.H., 2024. Sunscreens can preserve human skin microbiome upon erythematous UV exposure. *Int. J. Cosmet. Sci.* 46, 71–84. <https://doi.org/10.1111/ics.12910>
- Scott, T.L., Christian, P.A., Kesler, M.V., Donohue, K.M., Shelton, B., Wakamatsu, K., Ito, S., D’Orazio, J., 2012. Pigment-independent cAMP-mediated epidermal thickening protects against cutaneous UV injury by keratinocyte proliferation. *Exp. Dermatol.* 21, 771–777. <https://doi.org/10.1111/exd.12012>
- Searle, T., Ali, F.R., Al-Niimi, F., 2021. Systemic photoprotection in 2021. *Clin. Exp. Dermatol.* 46, 1189–1204. <https://doi.org/10.1111/ced.14697>
- Serpone, N., 2021. Sunscreens and their usefulness: have we made any progress in the last two decades? *Photochem. Photobiol. Sci.* 20, 189–244. <https://doi.org/10.1007/s43630-021-00013-1>
- Shetty, N., Schalka, S., Lim, H.W., Mohammad, T.F., 2023. The effects of UV filters on health and the environment. *Photochem. Photobiol. Sci. Off. J. Eur. Photochem.*

- Assoc. Eur. Soc. Photobiol. 22, 2463–2471. <https://doi.org/10.1007/s43630-023-00446-w>
- Shi, Y., Manco, M., Moyal, D., Huppert, G., Araki, H., Banks, A., Joshi, H., McKenzie, R., Seewald, A., Griffin, G., Sen-Gupta, E., Wright, D., Bastien, P., Valceschini, F., Seité, S., Wright, J.A., Ghaffari, R., Rogers, J., Balooch, G., Pielak, R.M., 2018. Soft, stretchable, epidermal sensor with integrated electronics and photochemistry for measuring personal UV exposures. *PLOS ONE* 13, e0190233. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190233>
- Shin, D.W., 2020. Various biological effects of solar radiation on skin and their mechanisms: implications for phototherapy. *Anim. Cells Syst.* 24, 181–188. <https://doi.org/10.1080/19768354.2020.1808528>
- Sklar, L.R., Almutawa, F., Lim, H.W., Hamzavi, I., 2012. Effects of ultraviolet radiation, visible light, and infrared radiation on erythema and pigmentation: a review. *Photochem. Photobiol. Sci.* 12, 54–64. <https://doi.org/10.1039/c2pp25152c>
- Skopelja-Gardner, S., An, J., Tai, J., Tanaka, L., Sun, X., Hermanson, P., Baum, R., Kawasumi, M., Green, R., Gale, M., Kalus, A., Werth, V.P., Elkon, K.B., 2020. The early local and systemic Type I interferon responses to ultraviolet B light exposure are cGAS dependent. *Sci. Rep.* 10, 7908. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64865-w>
- Skotarczak, K., Osmola-Mańkowska, A., Lodyga, M., Polańska, A., Mazur, M., Adamski, Z., 2015. Photoprotection: facts and controversies. *Eur. Rev. Med. Pharmacol. Sci.* 19, 98–112.
- Slominski, R.M., Chen, J.Y., Raman, C., Slominski, A.T., 2024. Photo-neuro-immuno-endocrinology: How the ultraviolet radiation regulates the body, brain, and immune system. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 121, e2308374121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2308374121>
- Solano, F., 2020. Photoprotection and Skin Pigmentation: Melanin-Related Molecules and Some Other New Agents Obtained from Natural Sources. *Molecules* 25, 1537. <https://doi.org/10.3390/molecules25071537>
- Stevenson, A.C., Clemens, T., Pairo-Castineira, E., Webb, D.J., Weller, R.B., Dibben, C., 2024. Higher ultraviolet light exposure is associated with lower mortality: An analysis of data from the UK biobank cohort study. *Health Place* 89, 103328. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2024.103328>
- Stockdale, M., 1985. Sun protection factors. *Int. J. Cosmet. Sci.* 7, 235–246. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2494.1985.tb00417.x>
- Stockfleth, E., Revol, O., 2022. Encouraging sun protection early in life: from a successful prevention programme in children to the identification of psychological barriers in adolescents. *J. Eur. Acad. Dermatol. Venereol.* 36, 12–21. <https://doi.org/10.1111/jdv.18194>
- Sun, A., Wang, W.-X., 2025. Photodegradation Controls of Potential Toxicity of Secondary Sunscreen-Derived Microplastics and Associated Leachates. *Environ. Sci. Technol.* 59, 5223–5236. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c12077>
- Sun, A., Wang, W.-X., 2024. Differentiation of cellular responses to particulate and soluble constituents in sunscreen products. *J. Hazard. Mater.* 474, 134791. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134791>
- Sun, A., Wang, W.-X., 2023. Photodegradation of Microplastics by ZnO Nanoparticles with Resulting Cellular and Subcellular Responses. *Environ. Sci. Technol.* 57, 8118–8129. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c01307>
- Sun, Y.-H., Wu, H.-Y., Xie, F.-Q., Ma, J.-R., Tang, Q.-L., Chen, Y.-F., Li, H., Liu, Y.-S., Ying, G.-G., 2024. Environmental contamination and risks of organic UV filters:

- Source, discharge, analytical methods and implications for ecological and human health. *Sci. Total Environ.* 955, 176930.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176930>
- Suoizzi, K., Turban, J., Girardi, M., 2020. Cutaneous Photoprotection: A Review of the Current Status and Evolving Strategies. *Yale J. Biol. Med.* 93, 55–67.
- Suoizzi, K., Turban, J., Girardi, M., n.d. Cutaneous Photoprotection: A Review of the Current Status and Evolving Strategies.
- Surber, C., Braun, R.P., 2017a. Sonnenschutz – Altes und Neues zu wiederkehrenden Fragen. *Swiss Med. Forum* 17, 544–555.
- Surber, C., Braun, R.P., 2017b. Sonnenschutz – Altes und Neues zu wiederkehrenden Fragen. *Swiss Med. Forum* 17, 544–555.
- Sutterby, E., Chheang, C., Thurgood, P., Khoshmanesh, K., Baratchi, S., Pirogova, E., 2022. Investigating the effects of low intensity visible light on human keratinocytes using a customized LED exposure system. *Sci. Rep.* 12, 18907.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-23751-3>
- Svarc, F., 2015. A brief illustrated history on sunscreens and sun protection. *Pure Appl. Chem.* 87, 929–936. <https://doi.org/10.1515/pac-2015-0303>
- Swope, V.B., Abdel-Malek, Z.A., 2018. MC1R: Front and Center in the Bright Side of Dark Eumelanin and DNA Repair. *Int. J. Mol. Sci.* 19, 2667.
<https://doi.org/10.3390/ijms19092667>
- Symanzik, C., John, S.M., 2022. Sun protection and occupation: Current developments and perspectives for prevention of occupational skin cancer. *Front. Public Health* 10, 1110158. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1110158>
- Tang, X., Yang, T., Yu, D., Xiong, H., Zhang, S., 2024. Current insights and future perspectives of ultraviolet radiation (UV) exposure: Friends and foes to the skin and beyond the skin. *Environ. Int.* 185, 108535.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108535>
- Tatara, P., Mawlichanów, M., Gancorz, S., 2025. Does sunscreen block vitamin D synthesis? A literature review. *Environ. Med.* 27, 154–158.
<https://doi.org/10.26444/ms/199718>
- Touitou, Y., Point, S., 2020. Effects and mechanisms of action of light-emitting diodes on the human retina and internal clock. *Environ. Res.* 190, 109942.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109942>
- Tran, V., Janda, M., Lucas, R.M., McLeod, D.S.A., Thompson, B.S., Waterhouse, M., Whiteman, D.C., Neale, R.E., 2023. Vitamin D and Sun Exposure: A Community Survey in Australia. *Curr. Oncol.* 30, 2465–2481.
<https://doi.org/10.3390/curroncol30020188>
- Tsai, J., Chien, A.L., 2022. Photoprotection for Skin of Color. *Am. J. Clin. Dermatol.* 23, 195–205. <https://doi.org/10.1007/s40257-021-00670-z>
- Tsai, S.-R., Hamblin, M.R., 2017. Biological effects and medical applications of infrared radiation. *J. Photochem. Photobiol. B* 170, 197–207.
<https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2017.04.014>
- Turner, C.W., Torgerson, L., 2025. Modernizing U.S. Sunscreen Regulations: How Newer Filters Can Improve Public Health. *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.* 41, e70032. <https://doi.org/10.1111/phpp.70032>
- Urbach, F., 2001a. The historical aspects of sunscreens. *J. Photochem. Photobiol. B* 64, 99–104. [https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(01\)00202-0](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(01)00202-0)
- Urbach, F., 2001b. The historical aspects of sunscreens. *J. Photochem. Photobiol. B* 64, 99–104. [https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(01\)00202-0](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(01)00202-0)

- US Preventive Services Task Force, Grossman, D.C., Curry, S.J., Owens, D.K., Barry, M.J., Caughey, A.B., Davidson, K.W., Doubeni, C.A., Epling, J.W., Kemper, A.R., Krist, A.H., Kubik, M., Landefeld, S., Mangione, C.M., Silverstein, M., Simon, M.A., Tseng, C.-W., 2018. Behavioral Counseling to Prevent Skin Cancer: US Preventive Services Task Force Recommendation Statement. *JAMA* 319, 1134. <https://doi.org/10.1001/jama.2018.1623>
- V. Chalupczak, N., A. Lio, P., 2025. Sunscreens: Mechanisms and Safety in Depth. *J. Drugs Dermatol.* 24, 142–146. <https://doi.org/10.36849/JDD.8102>
- V Shimon, S., E Hernandez, L., Nouri, K., 2023. Commentary: Sunscreen Compliance with American Academy of Dermatology Recommendations: A 2022 Update and Cross-Sectional Study. *J. Dermatol. Skin Sci.* 5, 1–3. <https://doi.org/10.29245/2767-5092/2023/1.1167>
- Valerio, H.P., Ravagnani, F.G., Ronsein, G.E., Di Mascio, P., 2021. A single dose of Ultraviolet-A induces proteome remodeling and senescence in primary human keratinocytes. *Sci. Rep.* 11, 23355. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02658-5>
- Van Der Rhee, H.J., De Vries, E., Coebergh, J.W.W., 2006. Does sunlight prevent cancer? A systematic review. *Eur. J. Cancer* 42, 2222–2232. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2006.02.024>
- van Bodegraven, M., Kröger, M., Zamudio Díaz, D.F., Lohan, S.B., Moritz, R.K.C., Möller, N., Knoblich, C., Vogelsang, A., Milinic, Z., Hallhuber, M., Weise, J.M., Kolbe, L., Gallinger, J., Graupner, C., Klose, H., Ulrich, C., Meinke, M.C., 2024. Redefine photoprotection: Sun protection beyond sunburn. *Exp. Dermatol.* 33, e15002. <https://doi.org/10.1111/exd.15002>
- Varrella, S., Danovaro, R., Corinaldesi, C., 2022. Assessing the eco-compatibility of new generation sunscreen products through a combined microscopic-molecular approach. *Environ. Pollut.* 314, 120212. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120212>
- Wanat, K., Fivenson, D., Norton, S., 2025. Sun Exposure in Travelers, in: *CDC Yellow Book: Health Information for International Travel*, Ausgabe 2026. Centers for Disease Control and Prevention.
- Weinberg, M., Weinberg, N., Maloney, S., 2025. Traveling Safely with Infants and Children, in: *CDC Yellow Book: Health Information for International Travel* (2026. Edition). Centers for Disease Control and Prevention.
- Weller, R.B., 2024. Sunlight: Time for a Rethink? *J. Invest. Dermatol.* 144, 1724–1732. <https://doi.org/10.1016/j.jid.2023.12.027>
- Wicks, N.L., Chan, J.W., Najera, J.A., Ciriello, J.M., Oancea, E., 2011. UVA Phototransduction Drives Early Melanin Synthesis in Human Melanocytes. *Curr. Biol.* 21, 1906–1911. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.09.047>
- Wilkerson, A.H., Yau, J., Pearlman, R.L., Cobb, E.K., Aldana, I., Garcia, N., Patel, R.H., Pandya, A., Hilts, A., Bengel, J.C., Huynh, T., Cruse, A.R., Nahar, V.K., 2025. Skin cancer knowledge, attitudes, beliefs, and prevention practices among beachgoers: a narrative review. *Arch. Dermatol. Res.* 317, 314. <https://doi.org/10.1007/s00403-024-03547-3>
- Williams, J.D., Maitra, P., Atillasoy, E., Wu, M.-M., Farberg, A.S., Rigel, D.S., 2018. SPF 100+ sunscreen is more protective against sunburn than SPF 50+ in actual use: Results of a randomized, double-blind, split-face, natural sunlight exposure clinical trial. *J. Am. Acad. Dermatol.* 78, 902-910.e2. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2017.12.062>
- Wolf, P., Cox, P., Yarosh, D.B., Kripke, M.L., 1995. Sunscreens and T4N5 Liposomes Differ in Their Ability to Protect Against Ultraviolet-Induced Sunburn Cell

- Formation, Alterations of Dendritic Epidermal Cells, and Local Suppression of Contact Hypersensitivity. *J. Invest. Dermatol.* 104, 287–292.
<https://doi.org/10.1111/1523-1747.ep12612828>
- Yang, C.-Y., Guo, Y., Wu, W.-J., Man, M.-Q., Tu, Y., He, L., 2022. UVB-Induced Secretion of IL-1 β Promotes Melanogenesis by Upregulating TYR/TRP-1 Expression In Vitro. *BioMed Res. Int.* 2022, 8230646.
<https://doi.org/10.1155/2022/8230646>
- Yeager, D.G., Lim, H.W., 2019. What's New in Photoprotection. *Dermatol. Clin.* 37, 149–157. <https://doi.org/10.1016/j.det.2018.11.003>
- Young, A.R., 2023. The adverse consequences of not using sunscreens. *Int. J. Cosmet. Sci.* 45, 11–19. <https://doi.org/10.1111/ics.12897>
- Yu, E., Oh, S.W., Park, S.-H., Kwon, K., Han, S.B., Kang, S.H., Lee, J.H., Ha, H., Yoon, D., Jung, E., Song, M., Cho, J.Y., Lee, J., 2025. The Pigmentation of Blue Light Is Mediated by Both Melanogenesis Activation and Autophagy Inhibition through OPN3–TRPV1. *J. Invest. Dermatol.* 145, 908–918.e6.
<https://doi.org/10.1016/j.jid.2024.07.034>
- Yuan, S., Huang, J., Jiang, X., Huang, Y., Zhu, X., Cai, Z., 2022. Environmental Fate and Toxicity of Sunscreen-Derived Inorganic Ultraviolet Filters in Aquatic Environments: A Review. *Nanomaterials* 12, 699.
<https://doi.org/10.3390/nano12040699>
- Zastrow, L., Meinke, M.C., Albrecht, S., Patzelt, A., Lademann, J., 2017a. From UV Protection to Protection in the Whole Spectral Range of the Solar Radiation: New Aspects of Sunscreen Development. *Adv. Exp. Med. Biol.* 996, 311–318.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-56017-5_26
- Zastrow, L., Meinke, M.C., Albrecht, S., Patzelt, A., Lademann, J., 2017b. From UV Protection to Protection in the Whole Spectral Range of the Solar Radiation: New Aspects of Sunscreen Development, in: Ahmad, S.I. (Ed.), *Ultraviolet Light in Human Health, Diseases and Environment, Advances in Experimental Medicine and Biology*. Springer International Publishing, Cham, pp. 311–318.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-56017-5_26
- Zhou, Y., Ashokkumar, V., Amobonye, A., Bhattacharjee, G., Sirohi, R., Singh, V., Flora, G., Kumar, V., Pillai, S., Zhang, Z., Awasthi, M.K., 2023. Current research trends on cosmetic microplastic pollution and its impacts on the ecosystem: A review. *Environ. Pollut.* 320, 121106. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121106>
- Ziehfrend, S., Schuster, B., Zink, A., 2019. Primary prevention of keratinocyte carcinoma among outdoor workers, the general population and medical professionals: a systematic review updated for 2019. *J. Eur. Acad. Dermatol. Venereol.* 33, 1477–1495. <https://doi.org/10.1111/jdv.15525>
- Ziglar, J., Mohammad, T.F., Gilaberte, Y., Lim, H.W., 2025. Sunscreens: Updates on Sunscreen Filters and Formulations. *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.* 41, e70026. <https://doi.org/10.1111/phpp.70026>