

Aus der Klinik für Dermatologie, Venerologie und Allergologie
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

UV-Schutz im Fokus - über den Einfluss von kosmetischer Vorbehandlung
und Trocknungsverhalten auf die Effektivität von Sonnenschutzprodukten

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Franziska Kluschke

aus Potsdam

Gutachter/in: 1. Prof. Dr. J. Lademann
 2. Prof. Dr. L. Zastrow
 3. Prof. Dr. C. Valenta

Datum der Promotion: 07.09.2012

„Das Wichtigste ist Licht. Licht ist Leben.“

Richard Meier

Inhaltsverzeichnis

VERZEICHNIS DER VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN	iii
1. EINLEITUNG	1
1.1 Sonnenlust und Sonnenfrust - über positive und negative Effekte von Sonnenstrahlung.....	1
1.1.1 Die Sonne.....	1
1.1.1 Positive Effekte von Sonnenstrahlung	3
1.1.2 Negative Effekte von Sonnenstrahlung	3
1.1.2.1 Physikalischer Hintergrund	3
1.1.2.2 Biologische Schäden	4
1.2 Aktuelle Relevanz.....	5
1.3 Möglichkeiten des Sonnenschutzes.....	6
1.3.1 Biologischer Sonnenschutz: die Haut	6
1.3.2 Chemischer Sonnenschutz	9
1.3.2.1 Produktspezifika.....	9
1.3.2.2 Anwendungsspezifika.....	10
1.4 Wirksamkeit: Verteilung der Sonnenschutzfilter auf und in der Haut	12
1.4.1 Horizontale Filterverteilung	12
1.4.2 Vertikal gebundene Filtermenge	12
1.5 Zur wissenschaftlichen Fragestellung der vorliegenden Untersuchung.....	13
2. MATERIAL UND METHODEN.....	15
2.1 Studiengruppe	15
2.2 Applikationsprotokoll.....	16
2.3 Vorbehandlung.....	17
2.4 Behandlung.....	18
2.5 Tape-Stripping-Prozedur und photospektrometrische Messungen	18
2.5.1 Sofortmessungen.....	19
2.5.2 Messungen in Lösung	19
2.6 Horizontale Filterverteilung	20
2.6.1 Bestimmung der Homogenität	20
2.7 Vertikale Filtermenge	21
2.7.1 Bestimmung der Wasserfestigkeit	21
2.7.2 Bestimmung des mechanischen Abriebs	22
2.8 Horizontale Filterverteilung und vertikale Filtermenge im Zusammenspiel	22
2.8.1 Bestimmung des effektiven UV-Schutzes	22
2.9 Statistische Auswertung.....	24
3. ERGEBNISSE	25
3.1 Charakterisierung der Sonnenschutzmittel.....	25

3.1.1 Extinktionsprofil der Sonnenschutzmittel	25
3.1.2 Transmissionsprofil der Sonnenschutzmittel	26
3.1.3 Schutzprofil der Sonnenschutzmittel	27
3.2 Horizontale Filterverteilung: Homogenität	28
3.2.1 Homogenität vor Wasserkontakt	28
3.2.2 Homogenität nach Wasserkontakt und Lufttrocknung	30
3.2.3 Homogenität nach Wasserkontakt und Handtuchtrocknung	31
3.3 Vertikale Filtermenge: Wasserfestigkeit	32
3.3.1 Vertikal gebundene Filtermenge vor Wasserkontakt	32
3.3.2 Vertikal gebundene Filtermenge nach Wasserkontakt und Lufttrocknung	33
3.3.3 Vertikal gebundene Filtermenge nach Wasserkontakt und Handtuchtrocknung	35
3.4 Effektiver UV-Schutz.....	37
3.4.1 Effektiver UV-Schutz vor Wasserkontakt	37
3.4.2 Effektiver UV-Schutz nach Wasserkontakt und Lufttrocknung	38
3.4.3 Effektiver UV-Schutz nach Wasserkontakt und Handtuchtrocknung.....	40
4. DISKUSSION	42
4.1 Vorbehandlung der Haut mit kosmetischen Produkten	42
4.1.1 Vorbetrachtung	42
4.1.2 Argumentationsansätze für eine kosmetische Vorbehandlung	43
4.1.1 Argumentationsansätze gegen eine kosmetische Vorbehandlung.....	46
4.1.3 Empfehlungen	50
4.2 Wasserkontakt unter Berücksichtigung unterschiedlichen Trocknungsverhaltens	50
4.2.1 Anhaftfähigkeit bei Schwimmen und Lufttrocknung.....	51
4.2.2 Anhaftfähigkeit bei Schwimmen und Handtuchtrocknung	53
4.2.3 Homogenität nach Luft- und Handtuchtrocknung	54
4.2.4 Empfehlungen	57
4.3 Grenzen der Methodik	57
4.4 Ausblick	60
4.4.1 Eine Aufgabe.....	60
4.4.2 Test- und Kennzeichnungssystem	61
5. ZUSAMMENFASSUNG	63
6. LITERATURVERZEICHNIS	65
DANKSAGUNG.....	75
LEBENS LAUF	77
ERKLÄRUNG	79

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

AUK	Fläche unter der Kurve
gAUK	Fläche unter der Kurve der Messungen in Lösung
sAUK	Fläche unter der Kurve der Sofortmessungen
cm, cm ²	Zentimeter, Quadratzentimeter
DNA	Desoxyribonukleinsäure
E	Extinktion
eV	Elektronenvolt
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff
HF	Homogenitätsfaktor
IR	Infrarot
Kp	Kilopascal
LSF	Lichtschutzfaktor
MED	minimale erythemauslösende Dosis
mg	Milligramm
min	Minuten
ml	Milliliter
mm	Millimeter
nm	Nanometer
n.s.	nicht signifikant
RPF	Radical Protection Factor (Radikalschutzfaktor)
UV	Ultraviolett
UVA/A1/A2	Ultraviolett-A/A1/A2
UVB	Ultraviolett-B
UVC	Ultraviolett-C
USPF	Universal Sun Protection Factor (universeller Lichtschutzfaktor)
°C	Grad Celsius

1. Einleitung

1.1 Sonnenlust und Sonnenfrust - über positive und negative Effekte von Sonnenstrahlung

1.1.1 Die Sonne

Etwa 150 Millionen Kilometer von der Erdoberfläche entfernt, rotiert im Zentrum unseres Planetensystems die Sonne. Fortwährend emittiert sie neben Partikelstrahlung elektromagnetische Wellen mit einer nahezu konstanten Strahlungsleistung von $3,845 \times 10^{26}$ Watt in einem kontinuierlichen Spektrum, welches von Gamma-, Röntgen- und UV-Strahlung über sichtbares Licht bis hin zu Infrarotstrahlung und Radiowellen reicht. Diese Sonnenstrahlung liefert nach wellenlängenspezifischer Absorption und Reflektion an der Erdatmosphäre, Wolkenschichten und Erdoberfläche 99,98 % des Gesamtbeitrags zur Erdenergiebilanz und ist durch Kopplung an die Photosynthese zentraler Motor biologischen Lebens auf unserem Planeten.

Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung des extraterrestrischen Sonnenspektrums (orange Kurve). Beim Durchtritt des Lichts durch Ozon- und Wolkenschicht verringert sich die Intensität der Sonnenstrahlung wellenlängenabhängig (schwarz-bunte Kurve). UVB-Strahlung (280 – 320 nm) erreicht die Erdoberfläche mit etwa 10 %, UVA-Strahlung (320 – 400 nm) mit etwa 90 % der ursprünglichen extraterrestrischen Intensität. Die kurzwelligere UVC-Strahlung wird nahezu vollständig von der Stratosphäre absorbiert und kann somit nicht mit dem menschlichen Organismus in Wechselwirkung treten (1).

Die Sonnenintensität am Erdboden ist abhängig von Atmosphärenparametern wie Temperatur, relativer Feuchtigkeit, Sichtweite und Bewölkungsgrad, sowie vom jeweiligen Sonnenstand, der in Abhängigkeit von Tages- und Jahreszeit sowie geographischer Position variiert (2).

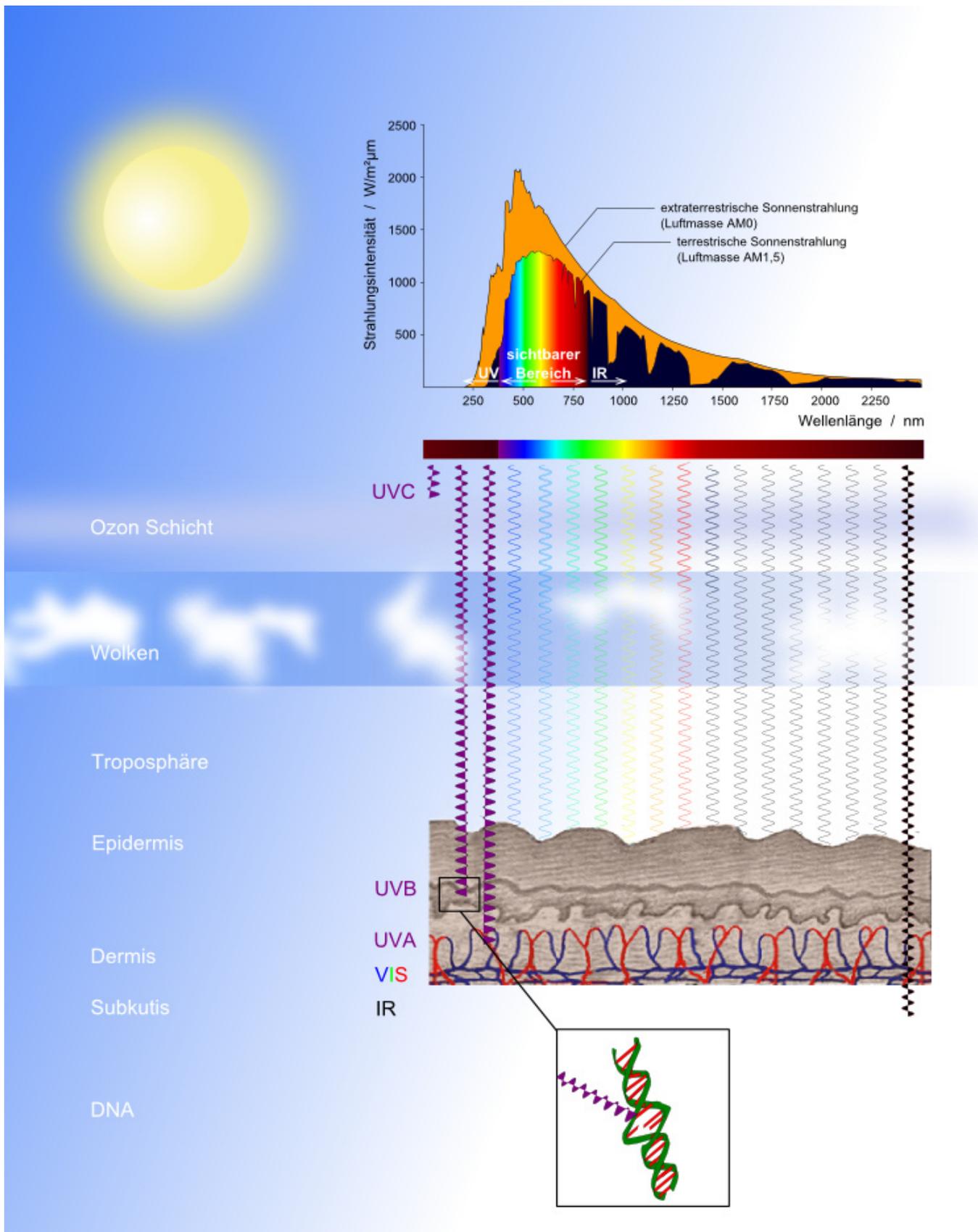


Abbildung 1: Illustration des solaren Spektrums, extraterrestrische und terrestrische Strahlungsintensitäten und Eindringtiefen von UVB-, UVA- und IR-Strahlung in die Haut (unter Verwendung 3–5)

1.1.1 Positive Effekte von Sonnenstrahlung

Der Einfluss von Sonnenstrahlung, vor allem in Form von Wärme und Licht, auf das menschliche Wohlbefinden und die Gesundheit ist seit langem bekannt. Bereits um 400 vor unserer Zeitrechnung verordnete Hippokrates seinen Patienten Sonnenbäder als festen Bestandteil der Behandlung einer Vielzahl von Krankheiten (6).

Auch heute ist die Phototherapie eine etablierte therapeutische Methode bei vornehmlich dermatologischen Erkrankungen wie Psoriasis, schweren Formen der atopischen Dermatitis oder Vitiligo (7–9). Sonnenexposition erhöht, wovon Studien neuerer Zeit zeugen, den Serotoninspiegel und vermag so zur Steigerung des allgemeinen Wohlbefindens beizutragen (10). Postoperativer Stress und Schmerzmittelbedarf können vermindert (11), der Verlauf saisonaler affektiver Störungen günstig beeinflusst werden (12). Nicht zuletzt spielt Sonnenstrahlung eine unverzichtbare Rolle bei der endogenen Synthese von Vitamin D, dessen Mangel mit einer Vielzahl von Erkrankungen in Verbindung gebracht wird (13).

1.1.2 Negative Effekte von Sonnenstrahlung

1.1.2.1 Physikalischer Hintergrund

Neben all den positiven Effekten, die die Sonnenstrahlung auf die Erde, das Leben im Allgemeinen und den Menschen im Speziellen hat, birgt sie jedoch auch gesundheitliche Gefahren. Diese liegen in der grundlegenden Fähigkeit von Licht zur Energieübertragung begründet. Gemäß dem Welle-Teilchen-Dualismus wirken Photonen gleichermaßen als elektromagnetische Wellen und Korpuskularstrahlung. Bei ausreichender Energie ist ein solches Photon in der Lage, molekulare Bindungen aufzuspalten. Gemäß dem Zusammenhang

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad \{1\}$$

E: Energie; h: Plancksches Wirkungsquantum; c: Lichtgeschwindigkeit; λ : Wellenlänge

ist die Energie eines Photons dabei umso größer, je kleiner die Wellenlänge der zugehörigen elektromagnetischen Strahlung ist (14). Stabile Moleküle verfügen über eine Bindungsenergie von mindestens 3 eV. Strahlung einer Wellenlänge von über 413 nm ist demnach nicht mehr in der Lage, solche Moleküle direkt aufzuspalten. Betrachtet man die Globalstrahlung unter diesem

Gesichtspunkt wird deutlich, dass das größte Gefahrenpotential bezüglich der Zerstörung molekularer Bindungen somit von Strahlung im ultravioletten Bereich ausgeht (15).

Experimentell konnte aufgezeigt werden, dass das größte Risiko für die Induktion von Einzel- und Doppelstrangbrüchen an der menschlichen DNA bei Energieeinwirkungen von 10 eV besteht. Dies entspricht der Energie eines Photons bei einer Wellenlänge von 123 nm. Eine so kurzwellige Strahlung erreicht die Erdoberfläche nicht. Jedoch können Sekundärelektronen, die infolge des Einwirkens von UVB- und UVA-Strahlung gebildet werden, Energien in dieser Größenordnung übertragen und somit erbgutschädigende Effekte vermitteln (16). In verschiedenen experimentellen Untersuchungen konnten vergleichbare Effekte bereits von Sekundärelektronen geringerer Energie ausgelöst werden (17; 18).

1.1.2.2 Biologische Schäden

Die vorausgehenden physikalischen Überlegungen decken sich mit den Ergebnissen zahlreicher klinischer Studien und epidemiologischer Beobachtungen, die eine zunehmende photochemische Schädigung der Haut infolge von UV-Exposition aufzeigen konnten (19–23).

Die wohl offensichtlichste und verbreitetste akute Reaktion der Haut auf eine übermäßige UV-Bestrahlung ist der Sonnenbrand. Seine Entstehung wird zu 90 % durch UVB- (280 - 320 nm) und nur zu 10 % durch UVA-Strahlung (320 - 400 nm) verursacht (24). Eine solche wiederholte akute Hautschädigung durch intermittierende, hochdosierte UV-Exposition, insbesondere während früher Lebensphasen, wird mit einem erhöhten Risiko für die Entstehung maligner Melanome in Verbindung gebracht (20; 25).

Die chronische UV-Exposition der Haut hingegen geht mit einer gesteigerten Inzidenz von Basalzellkarzinomen, Plattenepithelkarzinomen und deren Vorstufen, den aktinischen Keratosen, einher (2; 21; 22). Untersuchungen zum karzinogenen Wirkungsspektrum von UV-Strahlung an der Haut im Mausmodell zeigten Mutagenitätsmaxima bei einer Wellenlänge von 293 nm im UVB- und 340 nm im UVA-Bereich (26). Im Gegensatz zu UVB-Strahlung, die von biologische Zielstrukturen in der Haut direkt absorbiert wird und somit unmittelbar zu einer Schädigung zellulärer DNA führen kann, dringt UVA-Strahlung in tiefere Hautschichten vor und verursacht dort die Bildung reaktiver Sauerstoffverbindungen. Diese freien Radikale wiederum sind entscheidend an der Entstehung chronischer Hautschäden wie der lichtbedingten Hautalterung beteiligt (23; 27; 28).

Sowohl UVB- als auch der UVA2-Bereich (320 - 340 nm) der UVA-Strahlung, führen durch Supprimierung der Aktivität und Expression von Langerhans- und T-Zellen zu einer Abschwächung der Immunantwort und können somit der Ausbreitung einmal entarteter Zellenreihen wahrscheinlich Vorschub leisten (29–31). Neben den photokarzinogenen, photoallergischen und immunmodulatorischen Effekten an der Haut kann die ungeschützte UV-Exposition der Augen zu akuten und chronischen Schädigungen von Konjunktiva, Kornea, Linse und Retina, bis hin zur Kataraktbildung führen (32; 33).

1.2 Aktuelle Relevanz

UV-Strahlung ist, wie im vorausgegangenen Abschnitt dargestellt wurde, nachgewiesene Ursache einer Vielzahl, teils schwerwiegender biologischer Veränderungen und gesundheitlicher Schäden. Der Schutz der Haut vor Sonnenstrahlung ist daher ein Thema von hoher Relevanz. Dies gilt besonders in Anbetracht der folgenden, aktuellen Gegebenheiten.

1. Aufgrund eines veränderten Kleidungs- und Freizeitverhaltens, neuer ästhetischer Idealvorstellungen und nicht zuletzt auch vor dem Hintergrund eines kontinuierlichen Anstiegs der Lebenserwartung besteht in weiten Teilen der westlichen Bevölkerung eine unter medizinischen Gesichtspunkten relevante Strahlungsexposition. Ausdruck findet dies in einer seit Jahren ansteigenden Inzidenz der Hautkrebserkrankungen (34). Ein adäquater Schutz vor gesundheitsgefährdendem UV-Licht ist daher essentiell.
2. Seit den sechziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts hat die anhand von Strahlungstransfermodellen abgeschätzte UV-Strahlungsintensität am Erdboden, bedingt durch eine Abnahme des atmosphärischen Ozons, im Mittel zugenommen. Obwohl aufgrund der periodischen Veränderungen der Ozonschicht im Zusammenhang mit den Sonnenfleckenzyklen wieder eine Zunahme der Schichtdicke erwartet wird, könnte die UV-Strahlungsintensität in Mitteleuropa weiterhin ansteigen, da für diese Region eine Abnahme der Bewölkung in den Sommermonaten vorausgesagt wird. Insbesondere UVA-Strahlung, welche die Ozonschicht beinahe ungehindert passieren kann, würde in diesem Falle einen bedeutsamen Anstieg erfahren (35; 36).

1.3 Möglichkeiten des Sonnenschutzes

Aufgrund ihrer hohen gesundheitlichen und ökologischen Relevanz ist die Verringerung der kollektiven Strahlungsbelastung gemeinsames Ziel eines umfassenden globalen Regimes. Dieses umfasst geopolitische Interventionen wie die Bekämpfung des FCKW-bedingten Ozonabbaus ebenso wie mediengestützte Aufklärungskampagnen und industrielle Forschung, beispielsweise im Rahmen der Entwicklung moderner strahlungsundurchlässiger Textilien.

Neben einer Reihe einfacher Verhaltensweisen, wie dem Vermeiden direkter Sonnenexposition in der Mittagszeit, Aufsuchen schattiger Plätze, Tragen von geeigneter Bekleidung und Sonnenschutzbrillen bildet die Verwendung von Sonnencremes seit ihrer Markteinführung im Jahre 1935 einen Grundpfeiler der individuellen UV-Protektion. Insbesondere im Rahmen sonnenexponierter Freizeitaktivitäten haben sie sich, nicht zuletzt vor dem Hintergrund großer Werbekampagnen der Kosmetikindustrie, zu einer Schutzmaßnahme erster Wahl entwickelt (37; 38).

1.3.1 Biologischer Sonnenschutz: die Haut

Die Haut erfüllt als flächenmäßig größtes und schwerstes Organ des Menschen an der Grenze zwischen Körper und Umwelt eine Vielzahl unterschiedlicher Funktionen. Hierzu zählen (39; 40):

- Grenzfunktion und Schutz vor
 - mechanischer Belastung
 - chemischen Noxen
 - mikrobiologischen Erregern
 - Austrocknung durch Wasserverlust
 - UV-Strahlung
- Ort immunologischer Reaktionen
- Regulation des Wärmehaushalts
- Reizaufnahme
- soziale Signalfunktion

Die menschliche Haut kann mikroskopisch in drei Schichten unterteilt werden: Epidermis (Oberhaut), Dermis (Lederhaut) und Subkutis (Unterhaut). Der Aufbau dieser Schichten und ihre Funktion hinsichtlich des hauteigenen UV-Schutzes werden im Folgenden näher betrachtet. Eine

schematische Illustration der Hautzusammensetzung findet sich in Abbildung 2.

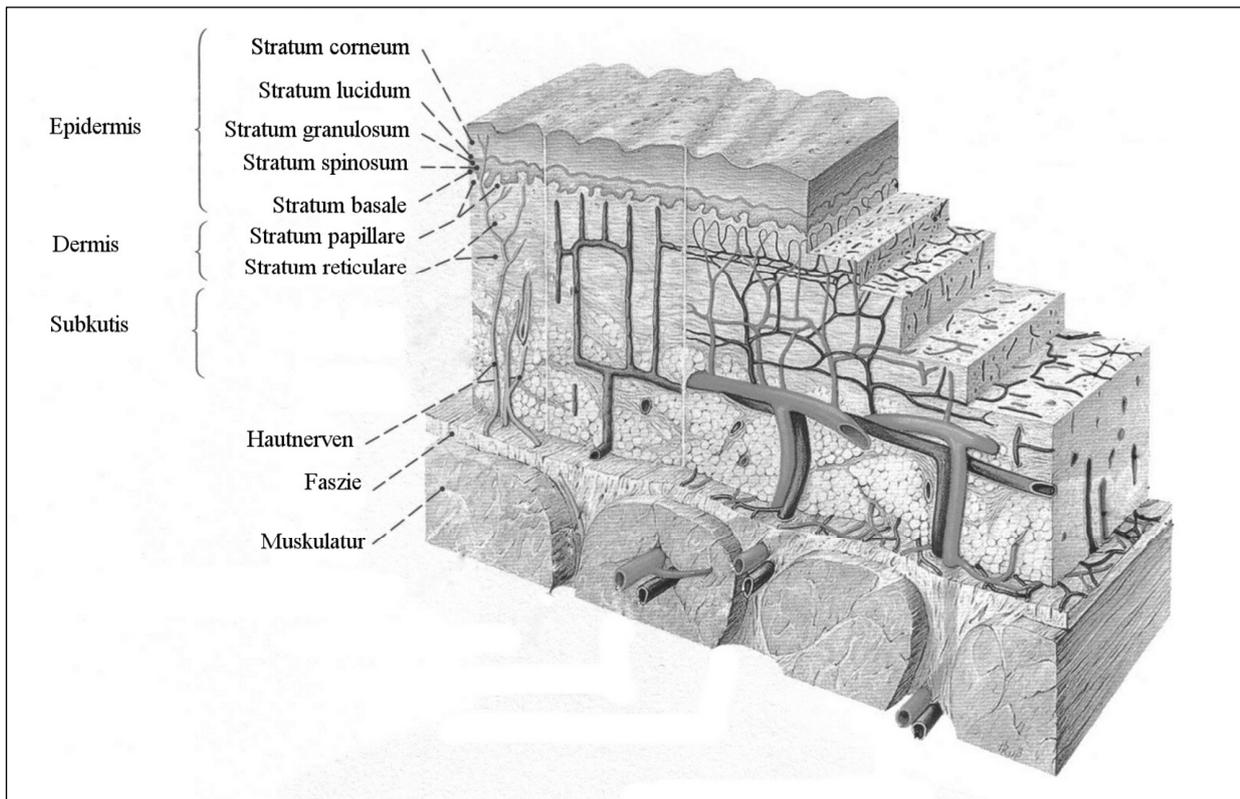


Abbildung 2: Schematischer Querschnitt durch die Haut (4, bearbeitet).

Die Epidermis bildet als oberste Schicht der Haut die äußerste Grenze des menschlichen Körpers. Sie besteht vorrangig aus Korneozyten, die an der Basis der Oberhaut aus teilungsfähigen Basalzellen entstehen und sich nach apikal zunehmend differenzieren. Die Korneozyten verändern ihre Morphologie und bilden in aufsteigender Reihenfolge das Stratum spinosum, das Stratum granulosum und nach Zerfall des Kerns als Zellfragmente zuoberst eine widerstandsfähige Hornschicht, das Stratum corneum. In der Leistenhaut an Hand- und Fußsohlen findet sich unterhalb des Stratum corneum eine zusätzliche, barrierewirksame Schicht, das Stratum lucidum. Eingebettet zwischen den Korneozyten liegen einzelne Langerhans-Zellen, die entscheidend an der Vermittlung von Immunreaktionen beteiligt sind.

Das Stratum corneum ist in der Lage, 90 % bis 99 % der einfallenden UVB- und bis zu 80 % der UVA-Strahlung vor Erreichen des Stratum basale zu absorbieren und reflektieren (41).

Von entscheidender Bedeutung hierfür sind die Melanozyten, welche in der Basalzellschicht kontinuierlich UV-absorbierendes Melanin an die neu gebildeten Korneozyten abgeben. Durch Photooxidation bereits vorhandenen Melanins führen UVA-Strahlen zu einer Sofortpigmentierung der Haut, die jedoch keinen bedeutsamen Strahlenschutz gewährt. Erst 72 Stunden nach UV-

Bestrahlung setzt die vornehmlich UVB-induzierte Spätpigmentierung ein. Dabei wird die Bildung von Melanozyten angeregt, die vorhandenen Melanozyten werden dazu veranlasst, verstärkt Melanosomen zu bilden und der Transport dieser neu gebildeten Melanosomen in die Kerneozyten wird fokussiert. Das vermehrt aufgenommene Melanin bildet eine Kappe auf dem Zellkern der Kerneozyten und schirmt die dort kodierte genetische Information dadurch effektiver vor den mutagenen Effekten einfallender UV-Strahlung ab. Makroskopisch spiegelt sich dieser Vorgang in einer zunehmenden Bräunung der Haut wieder.

In den oberen Epidermisschichten werden einfallende Photonen zudem von Urocaninsäure absorbiert und an der Oberfläche des Stratum corneum reflektiert. UV-Strahlung stimuliert die Proliferation von Basalzellen und führt dadurch unter Bildung so genannter Lichtschwielen zu einer Verdickung des Stratum corneum.

Unter dem Stratum basale schließt sich verzahnend das gefäß- und nervenreiche Stratum papillare der Dermis an. Die Dermis ist Sitz der Schweißdrüsen und Haarfollikel, der freien Abwehrzellen und Fibroblasten und wird im basalen Teil, dem Stratum reticulare von einem dichten Geflecht aus Kollagen- und Elastinfasern durchzogen, das der Haut Elastizität verleiht. Der Flüssigkeitsgehalt dieser Schicht ist entscheidend für die Straffheit der Haut.

Die Dermis bestimmt den überwiegenden Teil der optischen Hauteigenschaften. Sie trägt etwa 95 % zu ihrer Gesamtdicke bei und verfügt dabei über einen der Epidermis vergleichbaren Brechungsindex. Einfallende UV-Strahlung führt durch Gefäßerweiterung in der Dermis zur Erythembildung. Die primäre Photonenabsorption durch Fibroblasten sowie die Interaktionen mit freien Radikalen unterhalten die lichtbedingte Hautalterung.

Als Binde- und Verschiebeschicht zu den tiefer gelegenen Faszien, Muskeln und Knochen schließt sich die fettgewebsreiche Subkutis an.

Der Eigenschutz der Haut vor UV-Strahlung unterliegt einer hohen interindividuellen Variabilität. Durch die beiden in diesem Textabschnitt beschriebenen Anpassungsvorgänge - Anstieg der Melaninkonzentration in den Kerneozyten und Dickenzunahme des Stratum corneum - kann die Haut ihren Eigenschutz in etwa verdoppeln (42). Bei hohen UV-Intensitäten und längerem Aufenthalt in der Sonne ist die Haut in ihrer eigenen Schutzkapazität jedoch schnell überfordert.

1.3.2 Chemischer Sonnenschutz

1.3.2.1 Produktspezifika

Sonnenschutzprodukte bestehen aus einer Kombination sich ergänzender aktiver UV-Filter in einer photochemisch inaktiven Formulierung. Während die einzelnen Filtersubstanzen das grundlegende UV-Absorptionsvermögen eines Produktes bestimmen, ist die Zusammensetzung der jeweiligen Formulierung entscheidend für seine Anwendungseigenschaften wie Konsistenz und Wasserfestigkeit. Gemäß ihrer Herkunft lassen sich die aktiven Filtersubstanzen in zwei klassische Gruppen unterteilen, in Filter organischen und anorganischen Ursprungs.

Organische Filter werden gemäß ihrem Absorptionsspektrum in UVB-, UVA- und Breitbandfilter unterteilt. Sie setzen sich aus konjugierten aromatischen Ringsystemen zusammen, die in der Lage sind die Energie einfallender Photonen zu absorbieren und in Form thermischer Energie sowie in geringem Umfang als Fluoreszenz- und Phosphoreszenzstrahlung wieder abzugeben (43). Während des angeregten Zustandes ist es möglich, dass unerwünschte Interaktionen des Moleküls mit seiner Umgebung, beispielsweise mit Biomolekülen der Haut oder freiem Sauerstoff stattfinden, die zur Bildung schädlicher reaktiver Verbindungen führen (44). Zudem kann die Wirksamkeit eines Filters durch strukturelle Veränderungen im angeregten Zustand reduziert werden. Photostabilität und fehlende Photoreagibilität gehören daher zu den grundlegenden Anforderungen an einen modernen Lichtschutzfilter.

Anorganische Filtersubstanzen bestehen aus mineralischen Pigmenten und sind photostabil. Sie reflektieren, streuen und absorbieren einfallende UV-Strahlung und können bei einer ausreichend hohen Konzentration von beispielsweise 20 % Zinkoxid oder 20 % Titaniumoxid in Suspension eine vollständige UV-Blockade bewirken. Dabei filtern sie jedoch nicht nur UV-Strahlen, sondern gleichermaßen sichtbares Licht und Infrarotstrahlung, wodurch die Substanzen von einer auffallenden weißlichen Eigenfarbe sind, die kosmetisch wenig akzeptabel erscheint. Die Verkleinerung der mineralischen Pigmente auf 10-100 nm hat die kosmetischen Eigenschaften deutlich verbessert, jedoch mitunter auf Kosten der Breitbandfilterwirkung durch Verschiebung des Wirkungsspektrums zu kürzeren Wellenlängen und unter Inkaufnahme des Risikos biologischer Interaktionen bei fraglicher Penetration und Toxizität dieser neuen nanoskaligen Filterbestandteile (2; 45).

Organische und anorganische Filtersubstanzen beeinflussen den Schutzfaktor eines

Sonnenschutzproduktes synergistisch (46). Moderne Lichtschutzmittel enthalten daher zumeist mehrere organische UVB- und UVA-Filter sowie eine anorganische Komponente. Hierdurch verbessert sich nicht nur die direkte Lichtschutzwirkung, sondern auch die Photostabilität einzelner Filter (43).

Die Wirksamkeit von Sonnenschutzprodukten wird entsprechend den Vorgaben des europäischen Kosmetik- und Parfümerieverbandes COLIPA mit Hilfe des Lichtschutzfaktors (LSF) angegeben (47). Dieser bezeichnet gemäß {2} den Quotienten der minimalen erythemauslösenden Strahlungsdosis auf mit 2 mg/cm² eines Sonnenschutzproduktes behandelte und ungeschützte Haut.

$$LSF = \frac{MED \text{ Haut geschützt}}{MED \text{ Haut ungeschützt}} \quad \{2\}$$

LSF: Lichtschutzfaktor ; MED: minimale erythemauslösende Strahlungsdosis

Die Effektivität von Sonnenschutzmitteln (LSF) hängt dabei nicht nur vom Absorptionsvermögen der verwendeten Filter, sondern auch maßgeblich von der Homogenität ihrer Verteilung auf der Hautoberfläche ab (48). Durch die Wahl geeigneter Formulierungen können die Spreiteigenschaften von Sonnenschutzmitteln verbessert und ihre horizontale Verteilungshomogenität nach Applikation erhöht werden (49).

Da das sonneninduzierte Hauterythem zu etwa 90 % durch UVB-Strahlung hervorgerufen wird, ist zu beachten, dass der LSF keine relevanten Aussagen über eine Schutzwirkung außerhalb des Wellenlängenbereichs von etwa 300 bis 320 nm zulässt. Seit 2006 gelten hierzulande die Empfehlungen der COLIPA, nach denen der UVA-Schutz eines Produktes ab 2009 mindestens ein Drittel des ausgewiesenen UVB-Schutzes betragen soll (47). Weltweit sind die Test- und Ausweissysteme für die UVA-Schutzkapazität von Sonnenschutzmitteln jedoch uneinheitlich.

1.3.2.2 Anwendungsspezifika

Aus Anwendersicht sollte das ideale Sonnenschutzprodukt einen verlässlichen Schutz vor Licht-induzierten Akut- und Langzeitschäden bieten, sich gut auftragen lassen, schnell einziehen, lang vorhalten und möglichst unempfindlich gegenüber äußeren Einwirkungen wie Wasserkontakt oder Hitze sein. Zudem sollte es über eine gute Hautverträglichkeit bei minimalem Toxizitätsrisiko verfügen und sich aus ökonomischer Sicht zudem als kosteneffektiv erweisen. Die mit einem

wachsenden Wissensstand einhergehenden gestiegenen Anforderungen haben in den letzten 20 Jahren zu einer deutlichen Verbesserung der technischen Leistungsfähigkeit von Sonnenschutzmitteln geführt, die immer höhere Lichtschutzfaktoren aufwiesen (50). Dies darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass der effektive Schutz der Haut vor UV-Strahlung nicht nur von der chemischen Zusammensetzung eines Produktes abhängt, sondern maßgeblich auch davon, wie das jeweilige Produkt angewendet wird.

Diffey kam in seiner mathematischen Untersuchung 2001 zu dem Ergebnis, dass die Unterschiede im erreichten UV-Schutz innerhalb einer Sonnenschutzmittel verwendenden Population nur zu 10 % durch die jeweiligen Produktspezifika bedingt waren. Die restlichen 90 % ließen sich darauf zurückführen, wie viel Sonnenschutzmittel verwendet worden war und wie gut es verteilt wurde (51).

Es ist vielfach untersucht und beschrieben worden, dass die in der realen Anwendungssituation aufgetragene Menge Sonnenschutzmittel die aus technischen Gründen zur Bestimmung des Lichtschutzfaktors verwendete Konzentration von 2 mg/cm^2 Hautoberfläche deutlich unterschreitet. Bimczoc et al. konnten mittels standardisierter in vivo Testmethodik zeigen, dass zwischen applizierter Sonnenschutzmittelmenge und dem erzielten LSF bei einem Auftrag von 0,5 bis 2,5 mg Sonnenschutzmittel pro cm^2 Haut ein annähernd linearer Zusammenhang besteht (52). Faurschou und Wulf beschrieben sogar einen exponentiellen Abfall der Schutzwirkung bei der Anwendung von 0,5 bis $4,0 \text{ mg/cm}^2$ (53). In jedem Falle gilt: eine gegenüber der Standarddosis verringerte Auftragsmenge reduziert die Wirksamkeit von Sonnenschutzmitteln.

Zudem sind, bedingt durch das unregelmäßige Oberflächenprofil der Haut und das manuelle Eincremeverhalten, die aufgetragenen Sonnenschutzmittel auf der Hautoberfläche inhomogen verteilt, wodurch sich ihre Schutzwirkung noch weiter verringert (48; 54; 55). Allein aufgrund dieser beiden Einflussfaktoren, geringe Auftragsmenge und ungleichmäßige Verteilung, liegt der tatsächlich erreichte UV-Schutz im Mittel nur bei der Hälfte bis einem Drittel des vom Produkt ausgewiesenen Wertes (56).

In der realen Anwendungssituation führen darüber hinaus Wasser, Sand oder Schweiß zu einem Materialverlust und reduzieren so den effektiven UV-Schutz. Dieser Effekt kann nur durch wiederholtes Auftragen der Sonnenschutzprodukte ausgeglichen werden. Häufigkeit und Abstand der Reapplikation sind dabei entscheidend für die Funktion eines Sonnenschutzmittels und unterliegen starken intra- und interindividuellen Schwankungen (57).

1.4 Wirksamkeit: Verteilung der Sonnenschutzfilter auf und in der Haut

1.4.1 Horizontale Filterverteilung

Neben den Absorptionscharakteristika der verwendeten Filter entscheidet vor allem ihre Verteilung auf der Hautoberfläche über die Wirksamkeit (LSF) der Sonnenschutzprodukte nach dem Auftragen. Je homogener sich die Filter auf der Oberfläche der Haut und im Stratum corneum verteilen, das heißt je weniger Ausdünnungen und Lücken der Schutzfilm aufweist, desto höher ist die Schutzwirkung des Produktes.

In vivo wird die Verteilungshomogenität nach anleitungsgemäßer Verwendung eines handelsüblichen Sonnenschutzproduktes in gebräuchlicher Menge vor allem durch das von Furchen und Falten geprägte Oberflächenrelief der menschlichen Haut limitiert (58). Die menschliche Epidermis ist durchzogen von einem Netz feiner Furchen, die sich zwischen einzelnen Haarfollikeln aufspannen (59). Etwa ab dem 25. Lebensjahr führt eine Reduktion der Zellteilungsaktivität in der Dermis zudem sukzessive zu einem Nachlassen der bindegewebsvermittelten Hautelastizität und Falten können entstehen. In diesen Furchen und Falten setzen sich topisch applizierte Substanzen ab und führen so zu einem inhomogenen Verteilungsmuster, das deutlich von der Idealverteilung der jeweiligen Substanz abweicht. Die Inhomogenität ist umso ausgeprägter, je ungleichmäßiger das jeweilige Hautprofil ist (48; 54). In Übereinstimmung mit den Aussagen des Lambert-Beerschen-Gesetzes führt diese Inhomogenität bei einer vorgegebenen Konzentration zu einer Zunahme der Strahlungsdurchlässigkeit {3}.

$$E = c \cdot d \cdot \varepsilon$$

{3}

E: Extinktion, c : Konzentration, d : Schichtdicke, ε : dekadischer Extinktionskoeffizient

Eine Erhöhung der horizontalen Verteilungshomogenität auf und in der Haut, ist demgemäß ein erfolversprechender Ansatz für die Verbesserung der Wirksamkeit von Sonnenschutzprodukten.

1.4.2 Vertikal gebundene Filtermenge

Um in der realen Anwendungssituation ihre Schutzwirkung voll entfalten zu können, ist es darüber hinaus notwendig, dass die Filter der applizierten Sonnenschutzmittel ausreichend tief in die Haut eindringen und dort möglichst fest gebunden werden. Dieses Verhalten ist insbesondere für die

Wasserfestigkeit von Produkten von entscheidender Bedeutung. Je erfolgreicher die Filter im und am Stratum corneum haften, desto geringer fällt der durch Wasser, Sand, Schweiß und anderen externen Stressoren verursachte Material- und Wirkungsverlust aus. Eine reduzierte Anhaftfähigkeit von UV-Filtern bedingt einen schlechteren UV-Schutz. Zur Wirksamkeitsbeurteilung von Sonnenschutzmitteln ist es daher unabdingbar, neben dem erzielten Sofortschutz stets auch die Anhaftfähigkeit, beispielsweise anhand der Wasserfestigkeit zu betrachten.

1.5 Zur wissenschaftlichen Fragestellung der vorliegenden Untersuchung

In Übereinstimmung mit den im vorausgegangenen Abschnitt dargestellten Grundlagen zur Wirksamkeitsbeurteilung von Sonnenschutzmitteln sollen in der vorliegenden Arbeit zwei Einflussgrößen auf die Effektivität von chemischen Sonnenschutzprodukten untersucht werden:

Vorbehandlung der Haut mit kosmetischen Produkten

Gemäß den Ausführungen zur Homogenität unter Punkt 1.4.1, können zur Optimierung des Sonnenschutzes entweder die Verteilungs- und Anhafteigenschaften der Filter und ihrer Formulierungen verbessert, oder aber der Versuch unternommen werden, die Unregelmäßigkeiten im Oberflächenprofil der Haut abzumildern. In der vorliegenden Untersuchung soll daher den Fragen nachgegangen werden,

1. ob eine kosmetische Vorbehandlung der Haut durch Optimierung der Filterverteilungseigenschaften oder den Ausgleich von Hautunebenheiten die horizontale Verteilungshomogenität und somit auch die Wirksamkeit von Sonnenschutzmitteln zu verbessern vermag.
2. ob eine solche kosmetische Vorbehandlung eine Veränderung der Wasserfestigkeit als Parameter der Anhaftfähigkeit von Sonnenschutzmitteln nach sich zieht.
3. welche konkreten Anwendungsempfehlungen für den Verbraucher sich aus den Ergebnissen ableiten lassen.

Wasserkontakt unter Berücksichtigung unterschiedlichen Trocknungsverhaltens

Unter realen Anwendungsbedingungen, insbesondere am Badestrand, wird die Wirkung von Sonnenschutzmitteln durch den Kontakt der Haut mit Wasser und dem sich anschließenden

Trocknungsprozess beeinflusst. In der vorliegenden Untersuchung soll eruiert werden,

1. wie sich Luft- und Handtuchtrocknung nach Wasserkontakt auf die verbleibende Menge, Homogenität und Wirksamkeit von Sonnenschutzmitteln auswirken und in welchem Ausmaß sich die beiden Trocknungsvarianten voneinander unterscheiden.
2. inwieweit konkrete Anwendungsempfehlungen aus diesen Ergebnissen abgeleitet werden können.

Zur Untersuchung dieser Fragestellungen unter in vivo Bedingungen steht ein suffizientes Verfahren zu Verfügung: die Kombination von Tape-Stripping-Prozedur und Photospektrometrie.

2. Material und Methoden

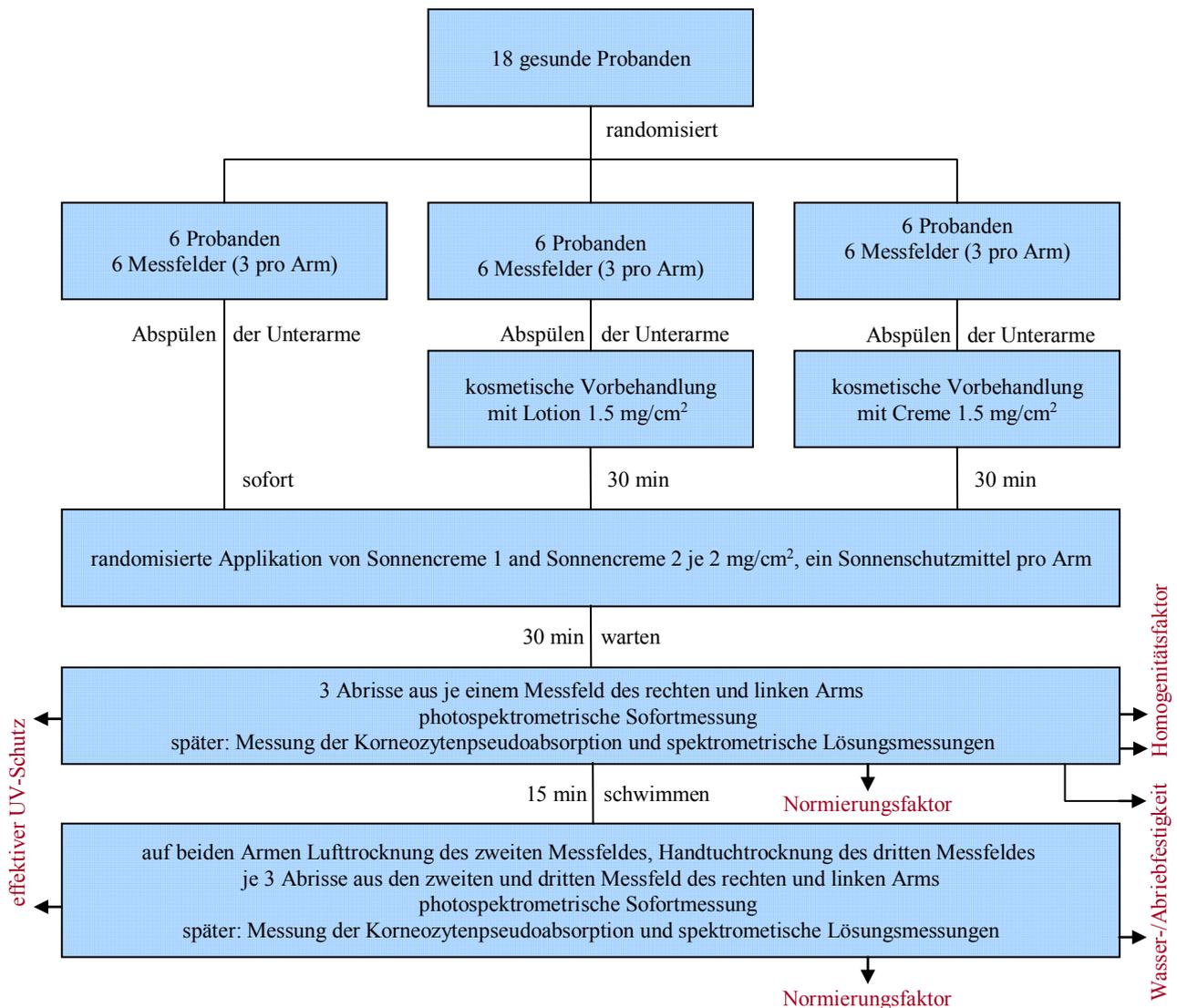


Abbildung 3: Studienablaufplan im Überblick

2.1 Studiengruppe

Für die Durchführung der Studie wurden 18 Erwachsene, 8 Frauen und 10 Männer vom Hauttyp I, II und III nach Fitzpatrick (60), im Alter von 20 bis 47 Jahren ohne akute oder chronische dermatologische sowie internistische Vorerkrankungen rekrutiert. Eine vorbestehende Hautbräunung, relevante individuelle Hautauffälligkeiten, beispielsweise Verletzungen der Hautbarriere, starke Behaarung, Naevi oder inhomogene Pigmentierung im Untersuchungsgebiet sowie das Vorliegen von Kontraindikationen für die Benutzung des Bewegungstherapiebades

fürten zu einem Studienausschluss. Die Probanden wurden randomisiert in drei Gruppen zu je sechs Personen unterteilt und durchliefen nach unterschiedlicher kosmetischer Hautvorbehandlung jeweils zwei Untersuchungsphasen zur Bewertung von Verteilungshomogenität, Wasserfestigkeit und effektivem UV-Schutz zweier verschiedener Sonnenschutzmittel unter Berücksichtigung verschiedener Trocknungsvarianten.

Gruppe	Lotion	Creme	Sonnenschutzmittel 1	Sonnenschutzmittel 2
I	-	-	+	+
II	+	-	+	+
III	-	+	+	+

Tabelle 1: Verteilung der 18 Probanden auf drei Vorbehandlungsgruppen

Die Studie wurde in Übereinstimmung mit den Vorgaben der Deklaration von Helsinki durchgeführt (61), eine Genehmigung des Untersuchungsprotokolls durch die Ethikkommission der Charité – Universitätsmedizin Berlin lag vor.

2.2 Applikationsprotokoll

Nach Abspülen der Unterarme mit klarem Wasser und vorsichtigem Trockentupfen erfolgte der Auftrag der zwei Sonnenschutzprodukte in einer definierten Menge von 2 mg/cm^2 in je drei $4 \times 5 \text{ cm}$ umfassenden Felder auf den Innenflächen beider Unterarme. Die applizierte Sonnencreme wurde unter Zuhilfenahme eines gesättigten Fingerlings homogen verteilt und anschließend 30 Minuten bei Standardraumklima (Temperatur $21 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, $50 \pm 5 \%$ relative Luftfeuchtigkeit) einwirken gelassen.

Im Falle der Studiengruppen II und III erfolgte 30 Minuten vor dem Auftrag der beiden Sonnenschutzprodukte eine Vorbehandlung der sechs Hautareale mit einer Lotion (II) oder Creme (III) in nämlicher Art und Weise. Das Abspülen der Arme erfolgte in diesem Fall vor Applikation der kosmetischen Vorbehandlung. Die aufgetragene Menge betrug $1,5 \text{ mg/cm}^2$ und wurde im Vorfeld der Untersuchung anhand von Eincremeversuchen an Probanden bestimmt. In Studiengruppe I fand keine kosmetische Vorbehandlung der Haut statt.

Im Zeitraum zwischen Hautbehandlung und Beginn der Tape-Stripping-Prozedur wurden die Probanden angehalten ruhig sitzen zu bleiben, um mögliches Schwitzen sowie einen bewegungsbedingten Kontakt der behandelten Areale mit Textilien oder unbehandelte Haut zu vermeiden.

2.3 Vorbehandlung

Zur Vorbehandlung der Haut verwendeten wir zwei handelsübliche Produkte folgender Zusammensetzung:

Lotion: *Aqua, Glycerin, Paraffinum Liquidum, Stearic Acid, Sorbitol, Glycol Stearate, Octyldodecanol, Dimethicone, Caprylic/Capric Triglyceride, Linoleic Acid, Tocopheryl Acetate, Vitis Vinifera Seed Extract, Camellia Sinensis Leaf Extract, Zinc Sulfate, Magnesium Sulfate, Cyclopentasiloxane, Dimethiconol, Isohexadecane, Propylene Glycol, Cetyl Alcohol, Glyceryl Stearate, Stearamide AMP, Polysorbate 80, Magnesium Aluminum Silicate, Triethanolamine, Sodium Acrylate/Sodium Acryloyldimethyl Taurate Copolymer, Carbomer, Disodium EDTA, Parfum, Phenoxyethanol, Methylparaben, Propylparaben, Sodium Benzoate, Potassium Sorbate, Sorbic Acid, Benzoic Acid, Alpha-Isomethyl Ionone, Benzyl Alcohol, Butylphenyl Methylpropional, Citronellol, Coumarin, Geraniol, Hexyl Cinnamal, Hydroxyisohexyl 3-Cyclohexene Carboxaldehyde, Limonene, Linalool*

Creme: *Aqua/Water/Eau, Glycerin, Caprylic/Capric Triglyceride, Diethylhexyl Succinate, Tribehenin, PEG-20 Esters, Sesamum Indicum (Sesame) Seed Oil, Stearyl Heptanoate, Petrolatum, Silica, Glyceryl Stearate, PEG-100 Stearate, Acrylates/C10-30 Alkyl Acrylate Crosspolymer, Aesculus Hippocastanum (Horse Chestnut) Seed Extract, Alcohol, Alcohol Denat., Alpha-Isomethyl Ionone, Ammonium Acryloyldimethyltaurate/Beheneth-25 Methacrylate Crosspolymer, Angelica Archangelica Root Extract, Ascorbic Acid, Ascorbyl Palmitate, BHT, Butylene Glycol, Butylphenyl Methylpropional, C13-14 Isoparaffin, Camellia Sinensis Leaf Extract, Carbomer, Cellulose Gum, Ceramide 1, Ceramide 3, Ceramide 6 II, Cetyl Alcohol, Chitosan, Cholesterol, Citric Acid, Coffea Arabica (Coffee) Extract, Corylus Avellana (Hazel) Seed Oil, Cynara Scolymus (Artichoke) Leaf Extract, Diethyl Phthalate, Ginkgo Biloba Leaf Extract, Glucose, Glyceryl Acrylate/Acrylic Acid Copolymer, Glycine Soja (Soybean) Oil, Glycolic Acid, Guar Hydroxypropyltrimonium Chloride, Hexapeptide-11, Hexyl Cinnamal, Hydrolyzed Soy Protein, Hydrolyzed Viola Tricolor Extract, Lactic Acid, Laminaria Ochroleuca Extract, Laureth-7, Lecithin, MICA, Nephrite Powder, PEG-8, Phytosphingosine, Plukenetia Volubilis Seed Oil, Polyacrylamide, Polysorbate 20, Pongamia Pinnata Seed Extract, Propylene Glycol, Retinol, Sodium Hyaluronate, Sodium Lauroyl Lactylate, Sorbitan Oleate, Stearyl Caprylate, Tetrasodium EDTA, Tocopherol, Triethanolamine, Triticum Vulgare (Wheat) Germ Oil, Xanthan Gum, Butylparaben, Ethylparaben, Isobutylparaben, Methylparaben, Phenoxyethanol, Propylparaben, Parfum/Fragrance, FD&C Red*

N°40 (CI 16035), FD&C Yellow N°5 (CI 19140), Titanium Dioxide (CI 77891)

2.4 Behandlung

Zur Behandlung der Haut verwendeten wir zwei handelsübliche Sonnencremes, im Folgenden bezeichnet als Sonnenschutzprodukt 1 und Sonnenschutzprodukt 2, mit LSF 25, ausgewiesener Schutzwirkung im UVB- und UVA-Bereich und der Herstellerangabe „wasserfest“ (Sonnenschutzprodukt 1) bzw. „besonders wasserfest“ (Sonnenschutzprodukt 2). Sonnenschutzprodukt 2 enthielt organische und anorganische, Sonnenschutzprodukt 1 lediglich organische Filterbestandteile. Zusammensetzung:

Sonnenschutzprodukt 1: *Aqua, Glycerin, Ethylhexyl Salicylate, Butyl Methoxydibenzoylmethane, Ethylhexyl Salicylate, Alcohol Denat., C12-15 Alkyl Benzoate, Dimethicone, Octocrylene, Bis-Ethylhexyloxyphenol Methoxyphenyl Triazine, Hydrogenated Coco-Glycerides, Diethylhexyl Butamido Triazone, Sodium Citrate, C18-36 Acid Triglyceride, Citric Acid, Tocopheryl Acetate, Glucosylrutin, Isoquercitrin, Ethylhexyl Methoxycinnamate, Acrylates/C10-30 Alkyl Acrylate Crosspolymer, Xanthan Gum, Trisodium EDTA, Phenoxyethanol, Methylparaben, Ethylparaben*

Sonnenschutzprodukt 2: *Aqua, Butylene Glycol Dicaprylate/Diacaprate, Glycerin, Alcohol Denat. Butyl Methoxydibenzoylmethane, Octocrylene, Titanium Dioxide, Dicaprylyl Carbonate, Cetearyl Alcohol, Cetyl Alcohol, Bis-Ethylhexylphenol Methoxyphenyl Triazine, Sodium Phenylbenzimidazole Sulfonate, C18-36 Acid Triglyceride, Glyceryl Stearate SE, Hydrogenated Coco-Glycerides, Tocopheryl Acetate, VP/Hexadecene Copolymer, Sodium Cetearyl Sulfate, PEG-40 Castor Oil, Xanthan Gum, Trisodium EDTA, Trimethoxycaprylylsilane, Phenoxyethanol, Ethylhexylglycerin, Methylparaben, Propylparaben, Limonene, Linalool, Geraniol, Hydroxyisohexyl 3-Cyclohexene Carboxaldehyde, Butylphenyl Methylpropional, Citronellol, Benzyl Salicylate, Cinnamyl Alcohol, Benzyl Benzoate, Citral, Parfum*

2.5 Tape-Stripping-Prozedur und photospektrometrische Messungen

Beim Tape-Stripping handelt es sich um eine etablierte, minimalinvasive Methode, bei der einzelne Zellschichten des Stratum corneum unter Verwendung von Adhäsivfilm nach und nach abgetragen werden. Topisch applizierte Substanzen weisen auf diesen Zellschichten die gleiche Verteilung auf wie in der Haut (48). Hierdurch wird es unter anderem möglich, Penetrations-, Exkretions- und

Reservoirverhalten endogener, exogener und topisch applizierter Substanzen im Stratum corneum zu untersuchen sowie dort lokalisierte physiologische Vorgänge, beispielsweise die epidermale Wundheilung, zu beobachten. Wiederholt wurde das Verfahren auch in Untersuchungen zum Verhalten chemischer UV-Filter und exogener Einflüsse auf applizierte Sonnenschutzmittel herangezogen (48; 62–66). In Verbindung mit photospektrometrischen Messungen ermöglicht dies sowohl Aussagen bezüglich der vertikal gebundenen Filtermenge und der horizontalen Filterverteilung auf und im Stratum corneum (48) als auch die Bestimmung des USPF (Universal Sun Protection Factor), welcher - anders als der LSF - die Wirksamkeit des Sonnenschutzmittels im UVA-Bereich mitbeurteilt (65).

2.5.1 Sofortmessungen

Die Durchführung der Tape-Stripping-Prozedur erfolgte nach dem etablierten, in der Literatur beschriebenen Standardprotokoll (67).

Zum Anfertigen der Hautabrisse verwendeten wir einen flexiblen Adhäsivfilm (*tesa* film No. 5529, Beiersdorf, Hamburg, Deutschland, Breite: 19mm, Länge ca. 6cm), der plan im markierten Untersuchungsfeld aufgebracht und mit einem stempeldefinierten Druck von $14,5 \text{ kp/cm}^2$ über ein Zeitintervall von drei Sekunden der Haut angedrückt wurde. Die Entfernung des Adhäsivfilms erfolgte in einer einzigen fließenden Bewegung, unmittelbar gefolgt vom Fixieren des Hautabrisses auf dem Objektträger des Photospektrometers (Lambda 5 mit Ulbricht-Kugel, Perkin Elmer, Frankfurt, Deutschland) und Starten der Extinktionsmessung im Wellenlängenbereich von 240 bis 500 nm. Die Messung erfolgte gegen einen leeren Streifen *tesa* film.

Von jedem Untersuchungsfeld wurden aufeinanderfolgend drei Abrisse aus gleicher Position entnommen und analysiert. Das 2 cm^2 umfassende Messareal wurde noch auf dem Objektträger markiert. Zur Einordnung der jeweiligen Abrisse in das Hautprofil bestimmten wir photospektrometrisch (Lambda 20, Perkin Elmer, Frankfurt, Deutschland) die Pseudoabsorption der Korneozyten bei 800 nm.

2.5.2 Messungen in Lösung

Das 2 cm^2 umfassende Messfeld eines jeden Hautabrisses wurde aus dem jeweiligen Adhäsivfilm herausgeschnitten und in 3,5 ml Ethanol gelöst. Es erfolgte eine 10-minütige Behandlung im

Ultraschallbad. Feste Bestandteile wurden anschließend bei 4000 Umdrehungen pro Sekunde über 10 Minuten abzentrifugiert. Der klare Überstand wurde in 10x10-mm-Quarzglasküvetten umpipettiert und die photospektrometrische Messung der Extinktionskurve zwischen 240 und 500 nm gegen reines Ethanol durchgeführt.

2.6 Horizontale Filterverteilung

2.6.1 Bestimmung der Homogenität

Vorausgehende Untersuchungen haben gezeigt, dass die Verteilung topisch applizierter Substanzen auf den mittels Tape-Stripping gewonnen Hautabrisse nahezu uneingeschränkt der in vivo Verteilung auf und in der Haut entspricht (48). Es ist jedoch zu beachten, dass das so erhaltene Abbild der Substanzverteilung auf den Hautabrisse nicht stabil ist, sondern Diffusionsprozesse in der Klebphase des jeweiligen Adhäsivfilms zu einer fortschreitenden Homogenisierung führen. Daher ist es für die Beurteilung der Verteilungshomogenität der Filter auf der Haut unabdingbar, die jeweiligen Messungen ohne Zeitverlust, binnen der ersten Minute nach Abreißen des Adhäsivfilms durchzuführen (58).

An jedem Abriss führten wir sowohl eine photospektrometrische Sofortmessung als auch eine Extinktionsmessung in Lösung durch und erhielten somit Informationen über das Wirkvermögen der Sonnenschutzprodukte einerseits in Korrelation mit den in vivo Bedingungen, andererseits im Zustand der idealen, homogenen Filterverteilung. Als Maß für die optische UV-Dichte der Abrisse diente bei der Betrachtung die Fläche unter den Summenextinktionskurven im Bereich zwischen 280 und 400 nm. Die Summenextinktionskurve wurde gemäß {4} aus den Extinktionskurven der drei nacheinander von derselben Stelle gewonnenen Abrisse bestimmt.

$$E_{\text{Summe}}(\lambda) = E_{\text{Abriss1}}(\lambda) + E_{\text{Abriss2}}(\lambda) + E_{\text{Abriss3}}(\lambda) \quad \{4\}$$

Es folgte die Berechnung des Areal unter den jeweiligen Summenextinktionskurven (AUK) im UVB- und UVA-Bereich {5}.

$$AUK = \int_{280\text{nm}}^{400\text{nm}} E_{\text{Summe}}(\lambda) \cdot d\lambda \quad d\lambda = 1 \text{ nm} \quad \{5\}$$

Der Unterschied zwischen dem AUK in der Sofort- (sAUK) und Lösungsmessung (gAUK) ein und desselben Abrisses wurde als Maß für das Abweichen der Filterverteilung auf der Haut von der homogenen Idealverteilung zur Berechnung eines Homogenitätsfaktors (HF) herangezogen {6}.

$$\text{Homogenitätsfaktor} = \frac{sAUK}{gAUK} \quad \{6\}$$

2.7 Vertikale Filtermenge

2.7.1 Bestimmung der Wasserfestigkeit

Die Alltagstauglichkeit von Sonnenschutzprodukten wird maßgeblich durch ihre Fähigkeit bestimmt, auch unter erschwerten Bedingungen wie beispielsweise Textil-, Sand- oder Wasserkontakt auf der Haut zu verbleiben und so einen nachhaltigen Schutz vor UV-Strahlung zu gewährleisten. Die Wasserfestigkeit einer Formulierung ist ein beurteilbares Maß für die Anhaftfähigkeit und somit ein relevanter Parameter für die Güte eines Sonnenschutzmittels im alltäglichen Gebrauch.

Nach Ablauf der Einwirkzeiten entnahmen und analysierten wir wie oben beschrieben von beiden Armen der Probanden Abrisse aus dem ersten Auftragsfeld und bestimmten so den Ausgangs-UV-Schutz nach Applikation der beiden Sonnenschutzprodukte. Anschließend durchliefen die Probanden bei mittlerer bis hoher Bewegungsintensität eine 15-minütige Badeprozedur im hauseigenen Schwimmbad (Wassertemperatur: $24^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$; freies Chlor: $0,36 \pm 0,03$ mg/l; gebundenes Chlor $0,06 \pm 0,02$ mg/l; pH: $7,0 \pm 0,1$, separates Ozonfiltersystem). Nach Verlassen des Wassers wurde an jedem Arm eines der verbliebenen Felder luftgetrocknet, das andere durfte der Proband auf jene Art und Weise mit einem Handtuch abtrocknen, wie er es auch für gewöhnlich nach dem Schwimmen tun würde.

Bei initial gleicher Auftragsmenge der Sonnenschutzmittel in allen Untersuchungsfeldern konnte anhand der Veränderung des AUK der gelösten Abrisse vor Wasserkontakt und nach Lufttrocknung die Wasserfestigkeit der beiden Formulierungen beurteilt werden {7}.

$$Wasserfestigkeit [\%] = \frac{100 \cdot \underset{\text{nach Lufttrocknung}}{gAUK}}{\underset{\text{vor Wasserkontakt}}{gAUK}} \quad \{7\}$$

2.7.2 Bestimmung des mechanischen Abriebs

Zur Beurteilung des Einflusses unterschiedlicher Trocknungsvarianten auf die am und im Stratum corneum gebundene Filtermenge bestimmten wir den jeweiligen prozentualen Filterverlust bei Luft- {8} und Handtuchtrocknung {9}. Der auf die Handtuchtrocknung zurückführbare Verlust ergab sich durch Abzug der durch den Abwascheffekt bedingten Filterreduktion {10}.

$$\underset{\text{Lufttrocknung}}{Filterverlust} [\%] = 100 - \frac{100 \cdot \underset{\text{nach Lufttrocknung}}{gAUK}}{\underset{\text{vor Wasserkontakt}}{gAUK}} \quad \{8\} \quad \text{Filterverlust durch Wasser}$$

$$\underset{\text{Handtuchtrocknung}}{Filterverlust} [\%] = 100 - \frac{100 \cdot \underset{\text{nach Handtuchtrocknung}}{gAUK}}{\underset{\text{vor Wasserkontakt}}{gAUK}} \quad \{9\} \quad \text{Filterverlust durch Wasser und Handtuch}$$

$$\underset{\text{mechanischer Abrieb}}{Filterverlust} [\%] = \underset{\text{Handtuchtrocknung}}{Filterverlust} - \underset{\text{Lufttrocknung}}{Filterverlust} \quad \{10\} \quad \text{Filterverlust durch Handtuch}$$

2.8 Horizontale Filterverteilung und vertikale Filtermenge im Zusammenspiel

2.8.1 Bestimmung des effektiven UV-Schutzes

Wasserfestigkeit und Verteilungshomogenität beeinflussen die Effektivität eines Sonnenschutzproduktes in vivo. In welchem Maß Veränderungen dieser Parameter konkrete Auswirkungen auf den effektiven UV-Schutz haben, wird jedoch erst anhand einer Beurteilung der Strahlungsundurchlässigkeit ersichtlich. Zur Bestimmung der prozentualen UV-Dichte war es zunächst notwendig, die Summenextinktionskurven der Sofortmessungen zu normieren, um Abweichungen, die durch unterschiedliche Korneozytenabrissmengen bedingt waren,

auszugleichen. Es wurde hierfür aus den Messungen in Lösung ein gruppenspezifischer AUK-Mittelwert für alle Einzelgruppen nach Wasserkontakt gebildet. Für die Messungen vor Wasserkontakt bildeten wir einen gemeinsamen AUK-Mittelwert über alle drei Untersuchungsgruppen, da hier Mengenunterschiede, die durch ein unterschiedliches Abwaschverhalten bedingt waren, nicht berücksichtigt werden mussten. Für jede Summenextinktionskurve wurden die jeweiligen Gruppenmittelwerte zur Bildung eines Normierungsfaktors herangezogen {11}.

$$\text{Normierungsfaktor} = \frac{\text{mittelAUKgelöst}}{\text{AUKgelöst}} \quad \{11\}$$

Die mit dem ihnen zugehörigen Normierungsfaktor korrigierten Summenextinktionskurven der Sofortmessungen wurden gemäß der Korrelation {12} zur Bildung der Summentransmissionskurven herangezogen.

$$\text{Extinktion} = -\log(\text{Transmission}) \quad \{12\}$$

Der Transmissionsgrad ist ein Maß für die Strahlungsdurchlässigkeit eines Messobjekts. Per Definition entspricht er dem Quotienten aus Strahlungsintensität hinter (I) und vor (I_0) dem Hindernis und kann somit Werte zwischen 0 (optisch undurchlässig) und 1 (transparent) annehmen. Grund für die Intensitätsabschwächung ist, dass Strahlung beim Durchtritt durch ein Hindernis absorbiert und reflektiert wird. Ist der Transmissionsgrad bekannt, lassen sich hieraus Aussagen über die Strahlungsundurchlässigkeit, eines Messobjekts, also über den effektiven Schutz vor der einfallenden Strahlung I_0 ableiten {13}.

$$\text{effektiver Schutz}(\lambda) = 1 - \frac{I}{I_0} = 1 - \text{Transmissionsgrad}(\lambda) \quad \{13\}$$

Eine weitere Unterteilung der Schutzwirkung, entsprechend dem sich aus der eindimensionalen Strahlungstransportgleichung für elektromagnetische Strahlung beim Durchtritt eines nicht selbst emittierenden Mediums ableitenden Zusammenhangs {14}, ist aufgrund der Einschränkungen des Lambert-Beerschen-Gesetzes nicht möglich.

$$\text{Transmissionsgrad} + \text{Absorptionsgrad} + \text{Reflexionsgrad} = 1 \quad \{14\}$$

Zur Beurteilung des effektiven UV-Schutzes im Bereich 280 bis 400 nm wurde die Schutzwirkung der einzelnen Wellenlängen summiert und anschließend zur besseren Veranschaulichung auf 100% skaliert {15}.

$$\text{effektiver UV-Schutz}_{280-400nm} [\%] = \left(\sum_{\lambda=280}^{400} 1 - \text{Transmissionsgrad}(\lambda) \right) \times \frac{100}{130} \quad \{15\}$$

Dies entspricht dem mittleren effektiven UV-Schutz über das gesamte untersuchte UV-Spektrum ohne Gewichtung von UVB, UVA1 oder UVA2.

2.9 Statistische Auswertung

Die primäre Aufzeichnung der Daten erfolgte mit UV-WinLab, die Auswertung mathematisch mit OpenOffice Calc 3.2.0 und statistisch mithilfe von DataLab 2.7. Zur Prüfung auf Normalverteilung wurde der Kolmogorov-Smirnov-Test durchgeführt. Es schlossen sich zweiseitige T-Tests für ungebundene Stichproben sowie bei ungleicher Varianz im 2 Sample F-Test WELCH-Tests an. Eine statistische Signifikanz wurde bei $p < 0.05$ (*) angenommen. Ergebnisse für die galt $p < 0.01$ wurden als hoch signifikant (**), $p < 0.001$ als höchst signifikant (***) bewertet.

Sofern nicht gesondert erwähnt sind alle Ergebnisse im Text und in den Tabellen in der Form Mittelwert \pm Standardfehler angegeben.

3. Ergebnisse

3.1 Charakterisierung der Sonnenschutzmittel

3.1.1 Extinktionsprofil der Sonnenschutzmittel

Diagramm 1 und 2 zeigen die Summenextinktionsspektren der beiden in der Studie verwendeten Sonnenschutzmittel in der Sofortmessung (orange Kurven) und in Lösung (blaue Kurven).

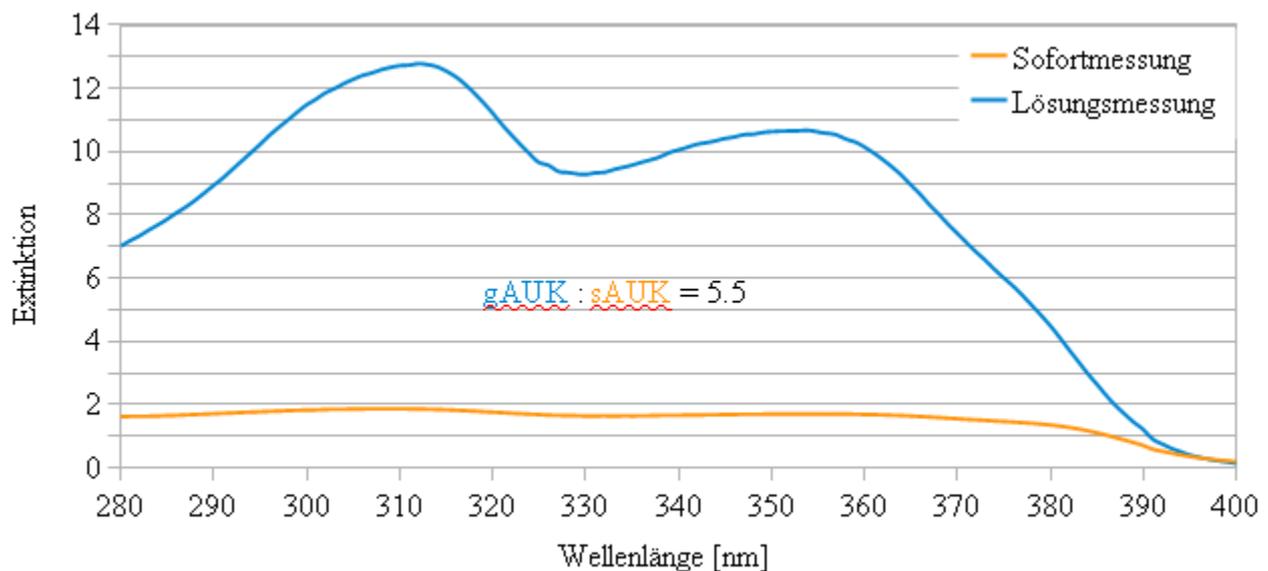


Diagramm 1: Extinktionsspektrum von Sonnenschutzprodukt 1 (Summenextinktion) auf der Haut ohne kosmetische Vorbehandlung. Zum Vergleich Sofortmessung und Messung in homogener Lösung.

Beide Produkte wirken über den gesamten UV-Bereich, mit einem Abfall der Filterwirkung in den Randbereichen des Spektrums. Sie erfüllen somit die Charakteristik moderner Sonnenschutzmittel, die sich durch eine gute Filterabsorption im UVB- und UVA-Bereich auszeichnen. Diese Breitbandwirkung wird durch die Kombination von Filtern mit unterschiedlichen Wirksamkeitsmaxima in einem Produkt erzielt. Der mehrgipfelige Verlauf der Extinktionsspektren in Lösung spiegelt dies wider. In gelöster Form weisen die die Sonnenschutzprodukte eine um den Faktor 5 (Sonnenschutzprodukt 2) bis 5.5 (Sonnenschutzprodukt 1) höhere Extinktion auf als in den Sofortmessungen.

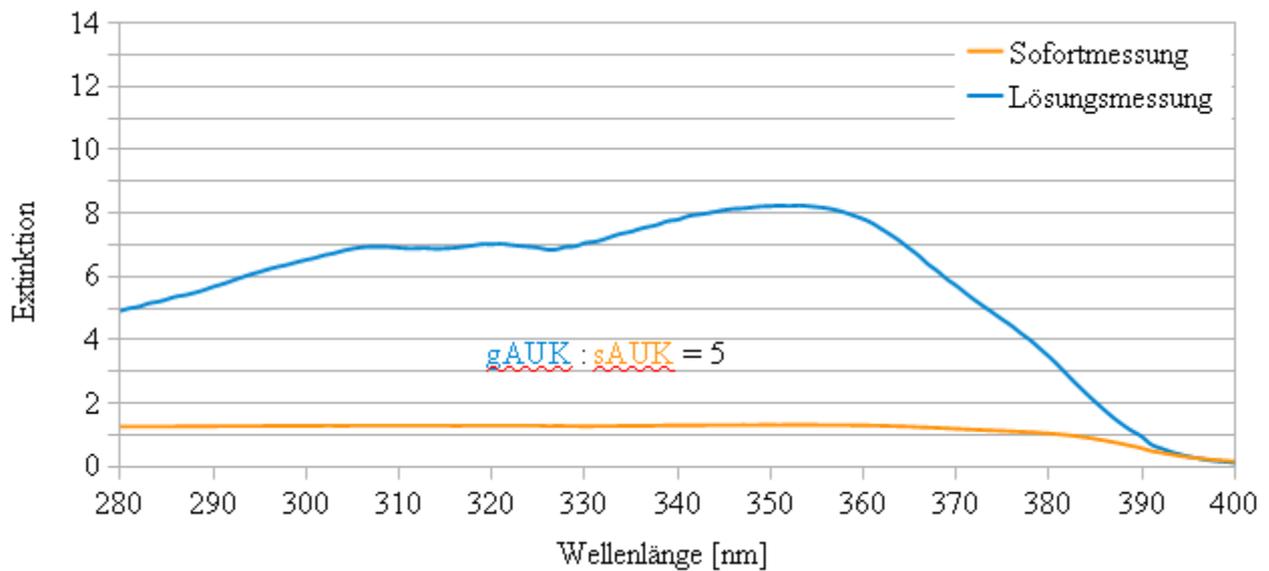


Diagramm 2: Extinktionsspektrum von Sonnenschutzprodukt 2 (Summenextinktion) auf der Haut ohne kosmetische Vorbehandlung.

3.1.2 Transmissionsprofil der Sonnenschutzmittel

In Diagramm 3 und 4 ist die UV-Transmission der beiden Sonnenschutzprodukte in der Sofortmessung (orange Kurven) und in Lösung (blaue Kurven) auf einer logarithmischen Skala dargestellt. Die nicht erreichte Maximaltransmission von 1 (1E+0) entspricht einem vollständigen, nicht abgeschwächten Durchtritt der UV-Strahlung durch das Medium.

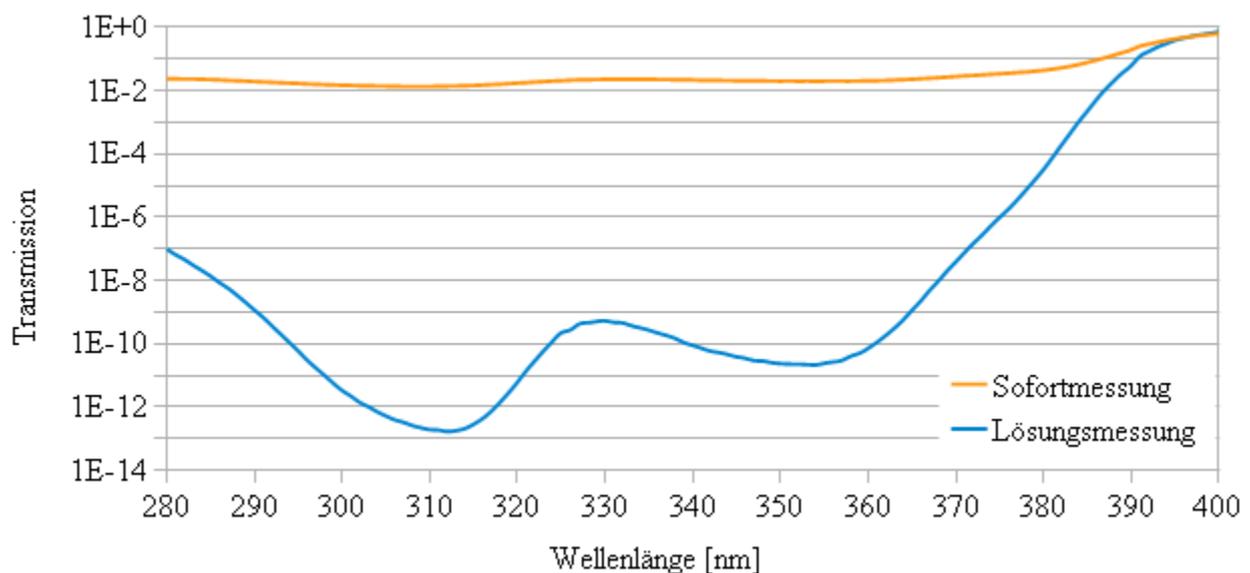


Diagramm 3: UV-Transmissionsspektrum von Sonnenschutzprodukt 1 auf der Haut (Sofortmessung) und in homogener Verteilung in Lösung

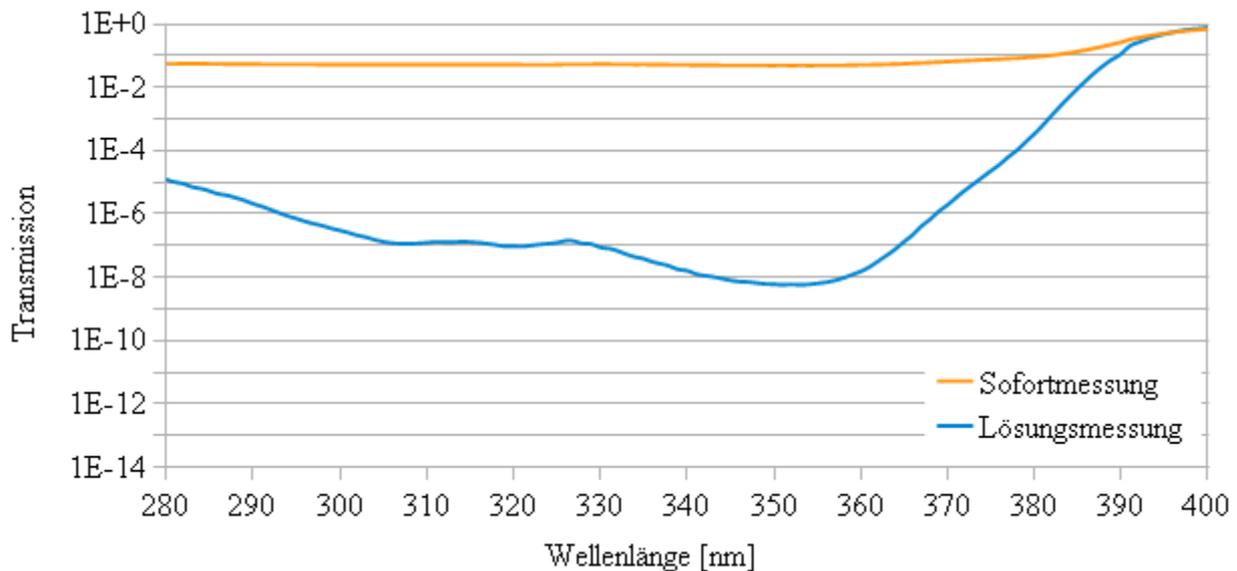


Diagramm 4: UV-Transmissionsspektrum von Sonnenschutzprodukt 2 auf der Haut (Sofortmessung) und in homogener Verteilung in Lösung

Auf der Haut unterscheiden sich die beiden Sonnenschutzmittel bezüglich ihrer Strahlungsdurchlässigkeit kaum voneinander. Zwischen den sofort gemessenen Spektren und den Messungen in Lösung besteht ein ausgeprägter Unterschied. In ihrem realen Verteilungszustand auf der Haut sind die Sonnenschutzmittel produkt- und wellenlängenabhängig um bis zu 10 Größenordnungen durchlässiger für einfallende UV-Strahlung als in ihrer homogen gelösten Form.

3.1.3 Schutzprofil der Sonnenschutzmittel

In Diagramm 5 ist das UV-Schutzprofil der beiden in der Studie angewendeten Sonnenschutzmittel dargestellt.

Im Einklang mit den zuvor dargestellten Extinktions- und Transmissionsspektren zeigen beide Sonnenschutzmittel eine sehr gute Strahlungsabschwächung im UVB- (280-320 nm) und UVA2-Bereich (320-340 nm). Ein deutliches Nachlassen der Filterwirkung gegen 400 nm, das auch in den Diagrammen 1 bis 4 abgebildet ist, resultiert in einer gegenüber dem UVB- und UVA2-Bereich verringerten Schutzleistung im UVA1-Bereich (340-400 nm).

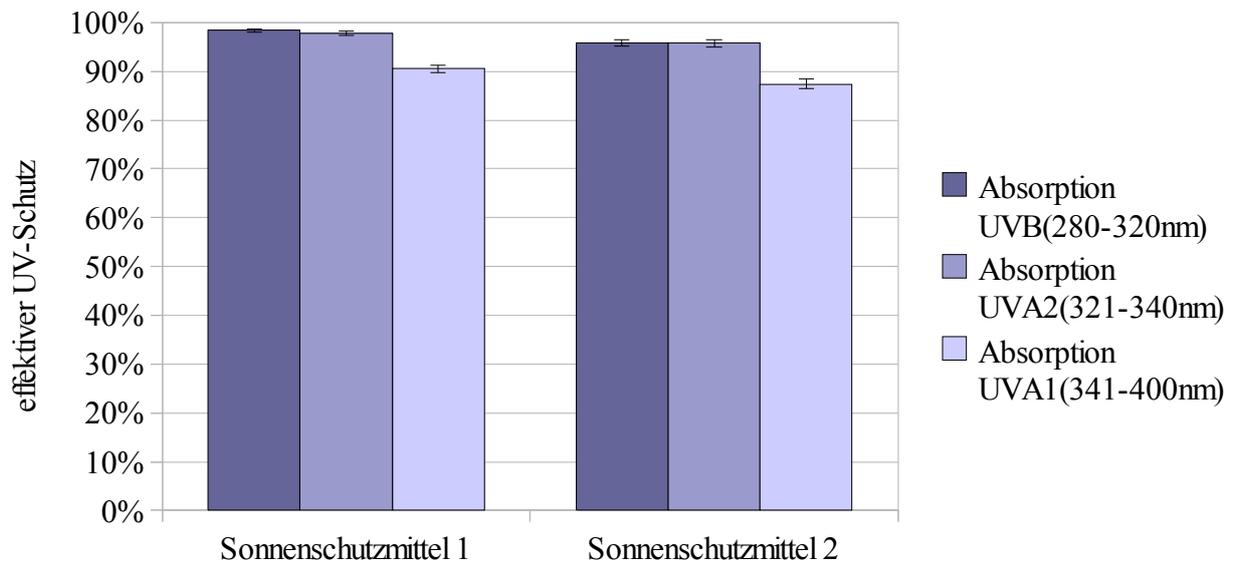


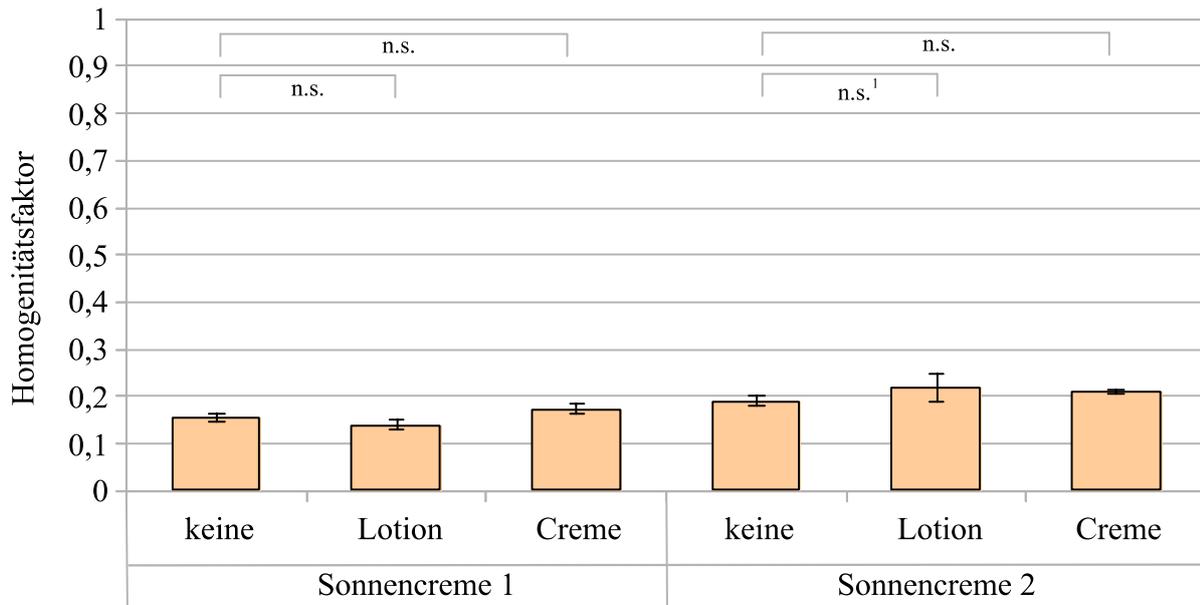
Diagramm 5: Effektiver UV-Schutz der beiden Sonnenschutzmittel auf der Haut für Strahlung im UVB-, UVA2- und UVA1-Bereich vor Wasserkontakt

3.2 Horizontale Filterverteilung: Homogenität

3.2.1 Homogenität vor Wasserkontakt

Wie im Kapitel 2.6. methodisch dargestellt, untersuchten wir die Verteilungshomogenität der beiden applizierten Sonnenschutzmittel auf der Haut nach unterschiedlichen Vorbehandlungen. In Diagramm 6 ist der mittlere Homogenitätsfaktor der einzelnen Sonnenschutzprodukt- und Vorbehandlungsgruppen nach 30-minütiger Einwirkzeit dargestellt. Ein Homogenitätsfaktor von 1 entspricht einer vollständig homogenen Filterverteilung.

Die beiden Sonnenschutzprodukte unterscheiden sich in der Verteilung ihrer Filter nur wenig voneinander. Wie anhand der orangen Balken in Diagramm 6 ersichtlich, sind die auf der Haut applizierten Sonnenschutzmittel nach dem Auftrag ungleichmäßig verteilt. Beide Produkte erreichen ohne Vorbehandlung weniger als 1/5 ihrer Verteilungshomogenität in Lösung. Eine kosmetische Vorbehandlung der Haut mit Bodylotion oder Creme verbessert die Homogenität des später applizierten Sonnenschutzmittels nicht signifikant (n.s.).



¹ Ausreißer entfernt

Diagramm 6: Einfluss unterschiedlicher kosmetischer Vorbehandlungen auf die Verteilungshomogenität von Sonnenschutzfiltern auf der Haut vor Wasserkontakt (Mittelwert ± Standardfehler).

Unterteilt man die Homogenitätsfaktoren unabhängig von der Art des verwendeten Sonnenschutzmittels und dem genauen Typ der Vorbehandlung in zwei übergreifende Gruppen – eine Gruppe in der eine kosmetischer Vorbehandlung durchgeführt wurde und eine Gruppe ohne Vorbehandlung – so bestätigt sich diese Beobachtung.

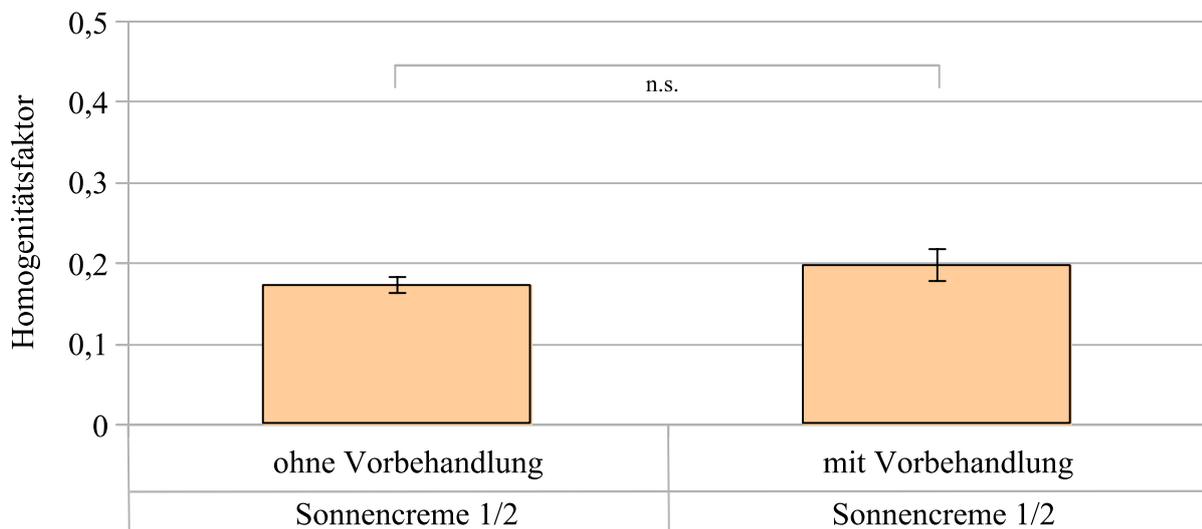


Diagramm 7: Verteilungshomogenität der Sonnenschutzfilter (Mittelwert ± Standardfehler) vor Wasserkontakt ohne (Sonnenscreme 1/2) und mit kosmetischer Vorbehandlung (Lotion/Creme + Sonnencreme 1/2)

Eine kosmetische Vorbehandlung führt, wie Diagramm 7 veranschaulicht, zu keiner signifikanten Änderung der Verteilungshomogenität später applizierter Sonnenschutzfilter.

3.2.2 Homogenität nach Wasserkontakt und Lufttrocknung

Nach einer 15-minütigen Schwimmphase und anschließender Lufttrocknung untersuchten wir erneut die Verteilungshomogenität der Sonnenschutzfilter auf der Haut.

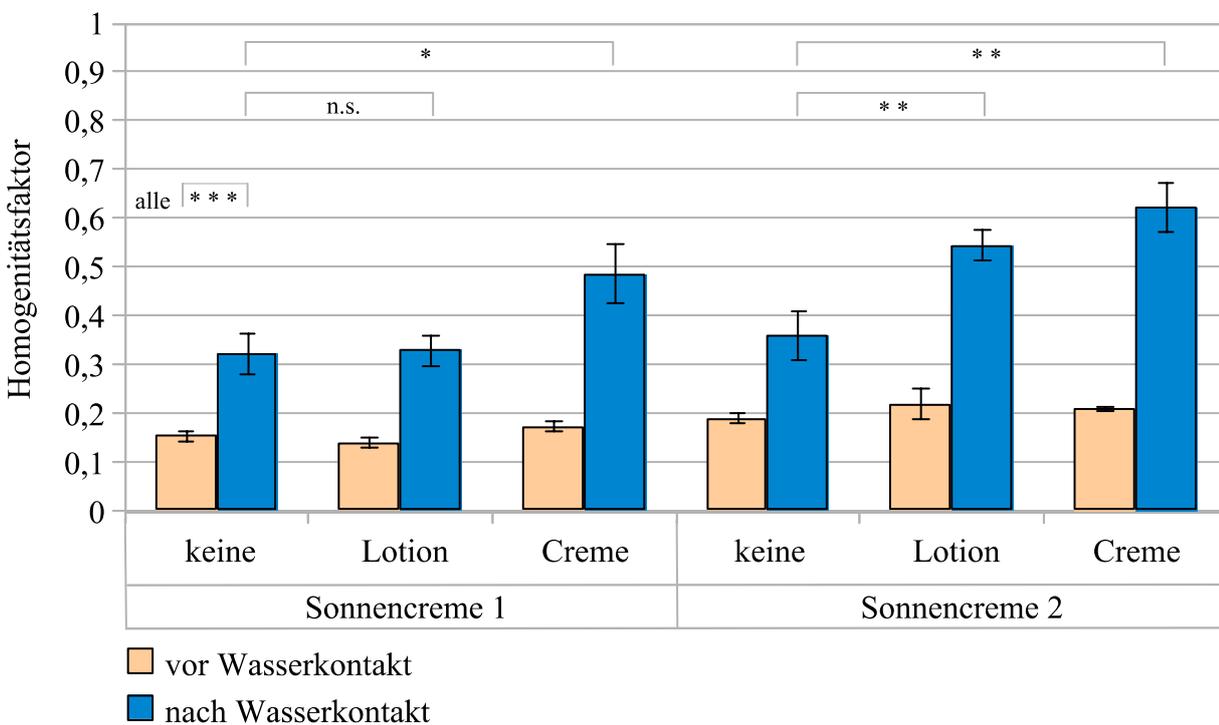


Diagramm 8: Verteilungshomogenität der Sonnenschutzmittel auf der Haut vor und nach Wasserkontakt bei unterschiedlichen kosmetischen Vorbehandlungen (Mittelwert \pm Standardfehler).

Es gilt: $p > 0,05$ n.s. $p < 0,05$ * $p < 0,01$ ** $p < 0,0001$ ***

In allen Untersuchungsgruppen zeigt sich nach Wasserkontakt eine statistisch höchst signifikante Zunahme der Filterverteilungshomogenität um 17 bis 41 Prozentpunkte (Diagramm 8 blaue Balken, orange Balken vor Wasserkontakt zum Vergleich). Das jeweilige Ausmaß dieser Homogenitätszunahme ist produkt- und vorbehandlungsabhängig.

Ohne eine kosmetische Vorbehandlung zeigen die beiden getesteten Sonnenschutzmittel nach Wasserkontakt eine ähnlich homogene Verteilung (HF Produkt 1: $0,32 \pm 0,04$; Produkt 2: $0,36 \pm$

0,05) mit je 17 Prozentpunkten Zugewinn verglichen mit dem Zustand vor Wasserkontakt.

Eine Vorbehandlung der Haut mit Lotion beeinflusst die Verteilungshomogenität von Produkt 1 nach Wasserkontakt nicht. Bei Produkt 2 führt sie jedoch im Vergleich mit der unvorbehandelten Haut zu einer hoch signifikanten Verbesserung der horizontalen Filterverteilung um 19 Prozentpunkte auf etwa die Hälfte der maximal möglichen Homogenität ($HF\ 0,55 \pm 0,03$).

Ein noch ausgeprägterer Effekt tritt nach einer Vorbehandlung der Haut mit Creme auf. In dieser Vorbehandlungsgruppe zeigte sich nach Wasserkontakt einer Zunahme des Homogenitätsfaktors auf $0,49 \pm 0,06$ beziehungsweise auf $0,62 \pm 0,05$ für die Sonnenschutzprodukte 1 und 2.

3.2.3 Homogenität nach Wasserkontakt und Handtuchrocknung

Welchen Einfluss das Trockenreiben der Haut mit einem Handtuch im Vergleich zur Lufttrocknung auf die Verteilungshomogenität von Sonnenschutzmitteln hat, wurde nach dem Schwimmen untersucht. Die Ergebnisse nach Handtuchrocknung (grüne Balken) und Lufttrocknung (blaue Balken) bei unterschiedlichen Vorbehandlungen sind in Diagramm 9 gegenübergestellt. In keiner der Untersuchungsgruppen zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Trocknungsvarianten.

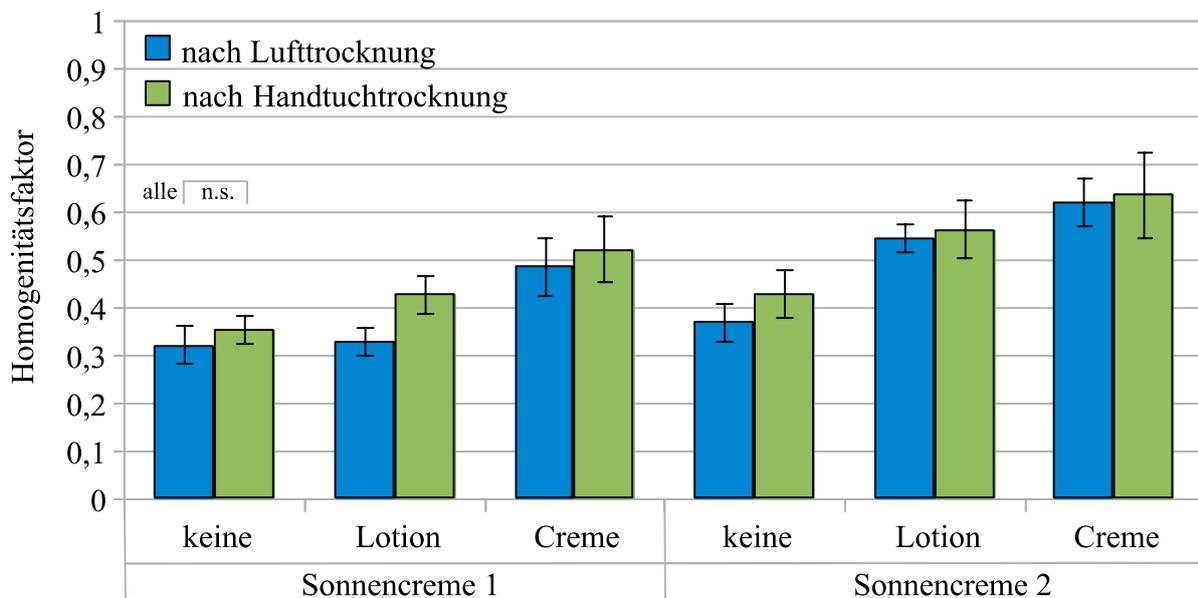


Diagramm 9: Einfluss von Luft- und Handtuchrocknung nach Wasserkontakt auf die Verteilungshomogenität der Sonnenschutzmittel (Mittelwert \pm Standardfehler) nach verschiedenen Vorbehandlungen

Vergleicht man die Homogenitätsfaktoren aller Probanden nach Wasserkontakt unabhängig von der Art der Vorbehandlung und dem verwendeten Sonnenschutzmittel miteinander, so bestätigt sich diese Beobachtung. Das individuell sehr unterschiedliche Abtrocknen der Haut mit einem Handtuch (HF 0.49 ± 0.03) verursacht, verglichen mit Lufttrocknung (HF 0.45 ± 0.03) keine statistisch signifikante Veränderung der Homogenität (Diagramm 10).

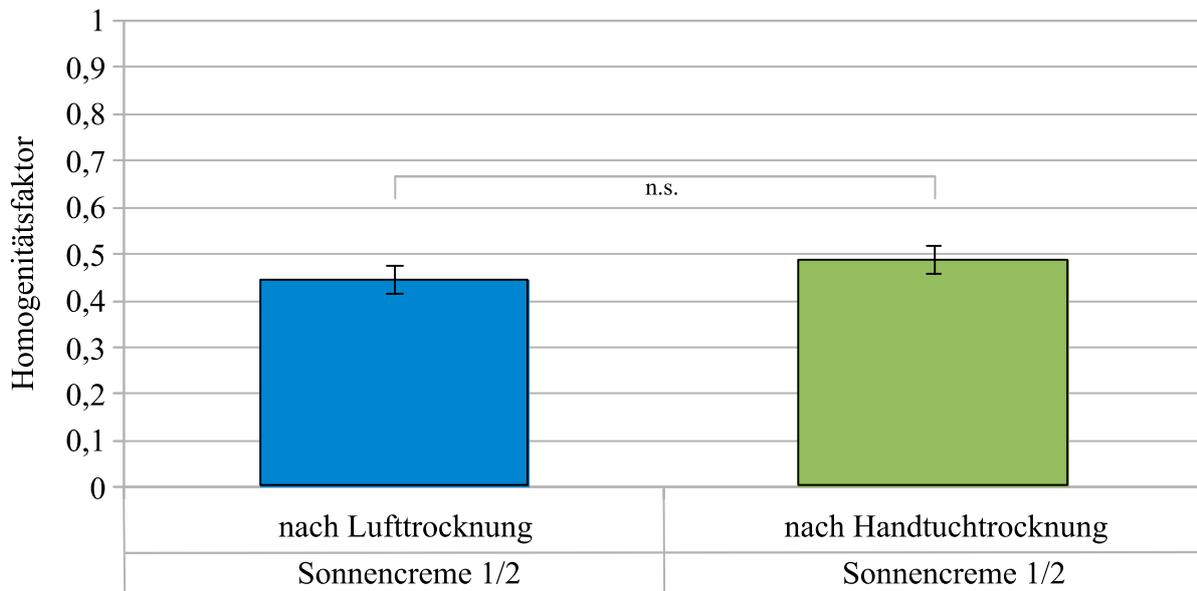


Diagramm 10: Verteilungshomogenität der Sonnenschutzfilter (Mittelwert \pm Standardfehler) auf der Haut nach Wasserkontakt und Lufttrocknung oder Handtuchtrocknung. Alle Sonnenschutzmittel, alle Vorbehandlungsgruppen enthalten.

3.3 Vertikale Filtermenge: Wasserfestigkeit

Die Fläche unter den Summenextinktionskurven der in Lösung gemessenen Tape-Strips (gAUK) ist ein Maß für die UV-Undurchlässigkeit von Sonnenschutzmitteln. Da sie, anders als die Sofortmessungen, nicht durch die Inhomogenität der Filterverteilung beeinflusst wird, spiegelt sie bei gleicher Filterzusammensetzung primär die vorhandene Filtermenge wider und ist damit ein geeigneter Parameter zur Beurteilung der Wasserfestigkeit. Das genaue Vorgehen zur Bestimmung der Wasserfestigkeit und des mechanischen Abriebs wurde in Kapitel 1.7. beschrieben.

3.3.1 Vertikal gebundene Filtermenge vor Wasserkontakt

Unmittelbar nach dem Einwirken der Sonnenschutzprodukte unterscheidet sich die am und im Stratum corneum gebundene Filtermenge eines Produktes bei unterschiedlicher Vorbehandlung statistisch nicht signifikant voneinander (Diagramm 11).

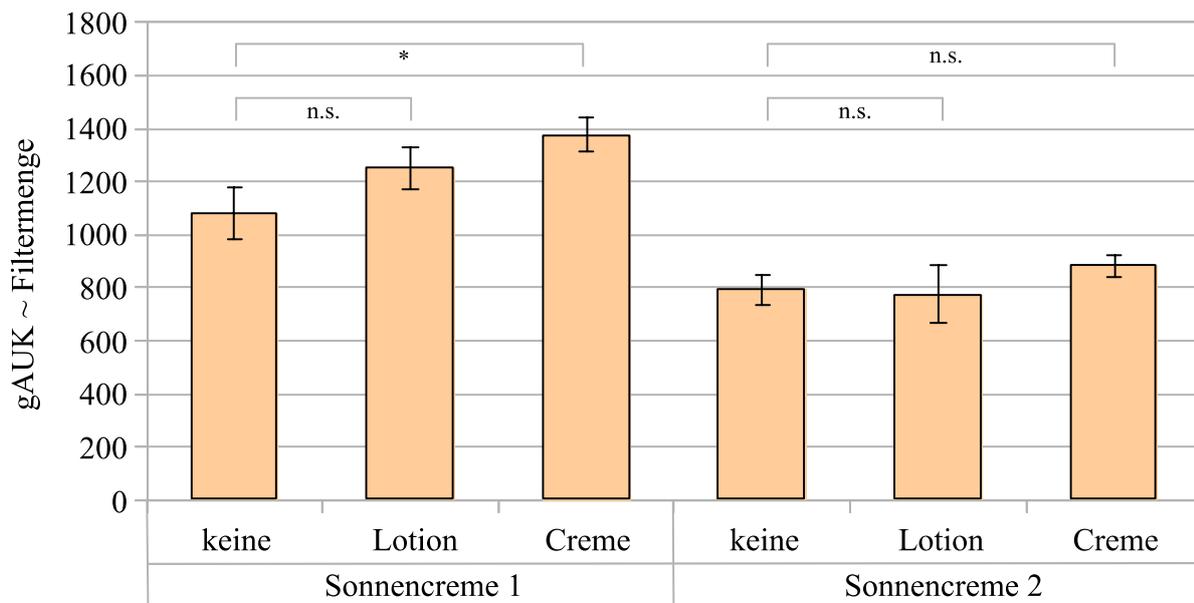


Diagramm 11: Fläche unter der Summenextinktionskurve (~ Filtermenge) auf der Haut nach Ende der Einwirkzeit (Mittelwert ± Standardfehler).

Eine Ausnahme bildet Produkt 1 nach Vorbehandlung mit Creme, das nach dem Auftrag eine höhere UV-Undurchlässigkeit (gAUK 1374 ± 63) zeigt als ohne (gAUK 1079 ± 97). Hierfür ist eine Kumulation von geringgradig variierenden Auftrag- und Abrissmengen, bei gleichzeitigem Verzicht auf eine Normierung, als Ursache anzunehmen.

Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung zeigt Sonnenschutzprodukt 1 eine höhere UV-Dichte als das Produkt 2 (gAUK 1235 ± 37 zu gAUK 819 ± 30).

3.3.2 Vertikal gebundene Filtermenge nach Wasserkontakt und Lufttrocknung

Wasserkontakt per se führt zu einem höchst signifikanten Verlust von Sonnenschutzfiltern auf der Haut. Nach einer 15-minütigen Schwimmprozedur ist die Fläche unter den Summenextinktionskurven um 74 % bis 92 % abgesunken. Dies und der Einfluss unterschiedlicher

kosmetischer Vorbehandlungen auf das Abwaschverhalten von Sonnenschutzmitteln sind in Diagramm 12 dargestellt. Die filterbedingten Aktivitätsunterschiede zwischen den beiden Sonnenschutzmitteln relativieren sich nach dem Aufenthalt im Wasser.

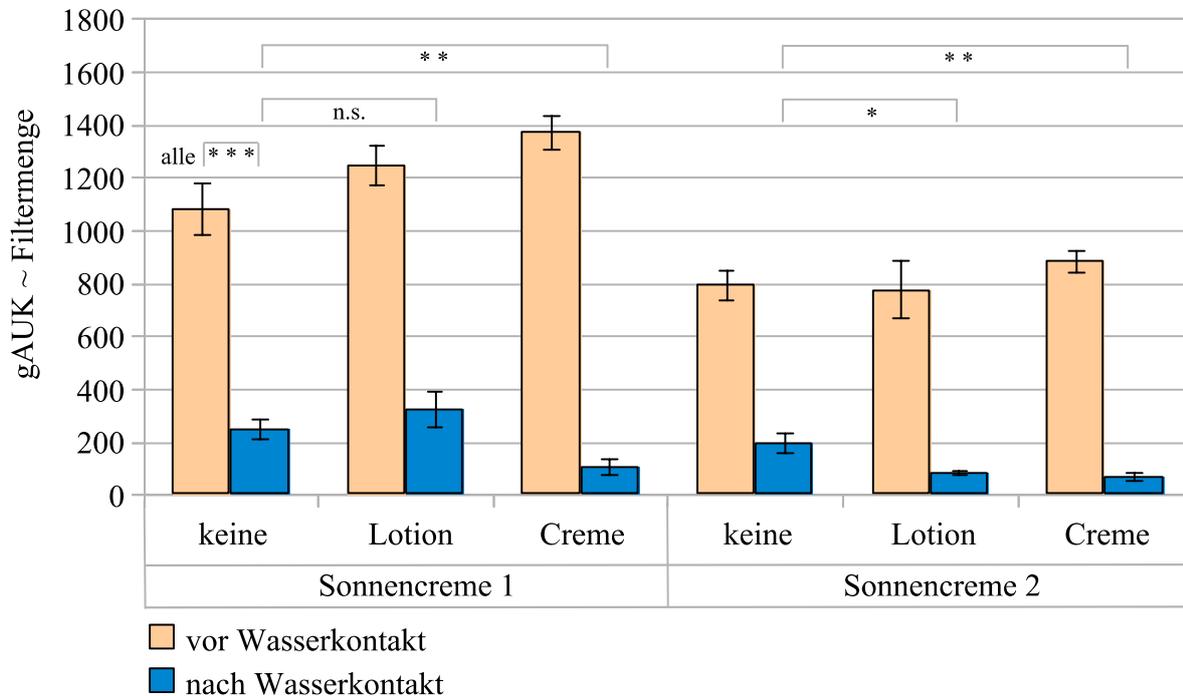


Diagramm 12: Einfluss unterschiedlicher kosmetischer Vorbehandlungen auf die nach Wasserkontakt im Stratum corneum gebundene Filtermenge (Mittelwert \pm Standardfehler). Vertikale Filtermenge vor (orange Balken) und nach Wasserkontakt (blaue Balken) zum Vergleich.

Ohne eine kosmetische Vorbehandlung unterscheiden sich die beiden Sonnenschutzmittel hinsichtlich ihrer Wasserfestigkeit nicht signifikant voneinander. Wie in Diagramm 13 dargestellt, beträgt sie $24 \% \pm 3 \%$ beziehungsweise $25 \% \pm 5 \%$.

Die Verringerung der UV-Dichte der Filter, Ausdruck des Materialverlusts im Wasser, ist abhängig von der Art der Vorbehandlung. Sonnenschutzprodukt 1 wird durch den Auftrag der Lotion in seiner Wasserfestigkeit nicht beeinträchtigt. Eine Vorbehandlung der Haut mit Creme führt beim Schwimmen jedoch zu einem zusätzlichen Materialverlust und damit zu einer hoch signifikanten Reduktion der Wasserfestigkeit um weitere $16 \% \pm 2 \%$. Die Wasserfestigkeit von Produkt 2 wird sowohl durch den Auftrag einer Lotion signifikant um $12 \% \pm 2 \%$, als auch durch die Vorbehandlung mit Creme hoch signifikant um $17 \% \pm 2 \%$ verringert.

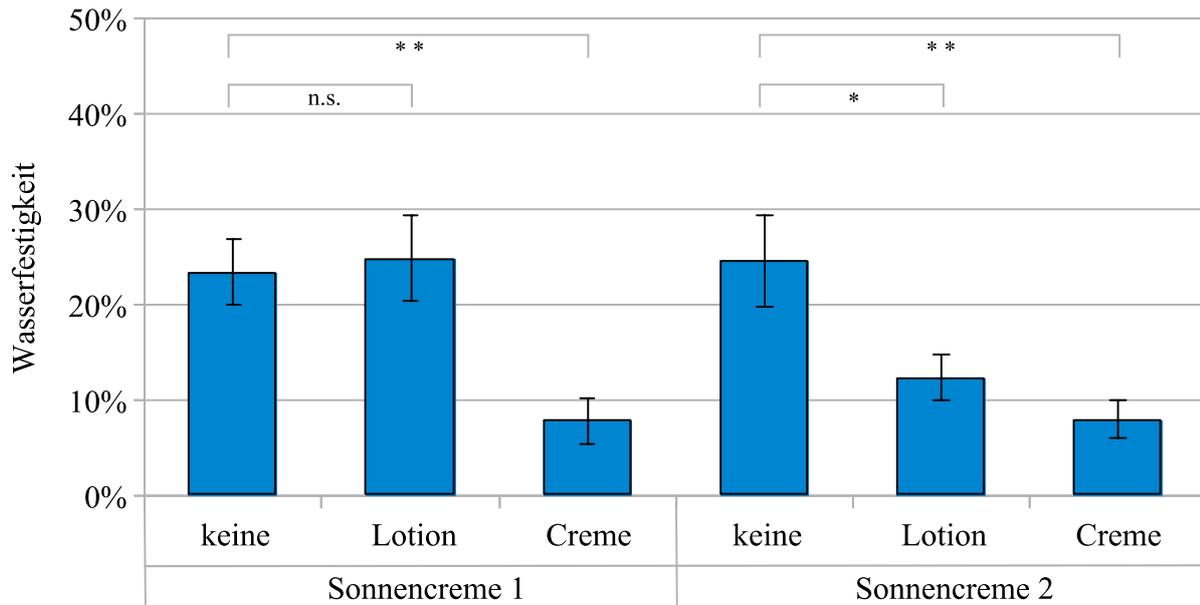


Diagramm 13: Einfluss unterschiedlicher kosmetischer Vorbehandlungen auf die Wasserfestigkeit von Sonnenschutzmitteln (Mittelwert \pm Standardfehler).

Gruppiert man, wie in Diagramm 14, die Wasserfestigkeit ausschließlich nach dem Kriterium ob eine kosmetische Vorbehandlung durchgeführt wurde, so zeigt sich ein hoch signifikanter Abfall der Wasserfestigkeit nach Vorbehandlung.

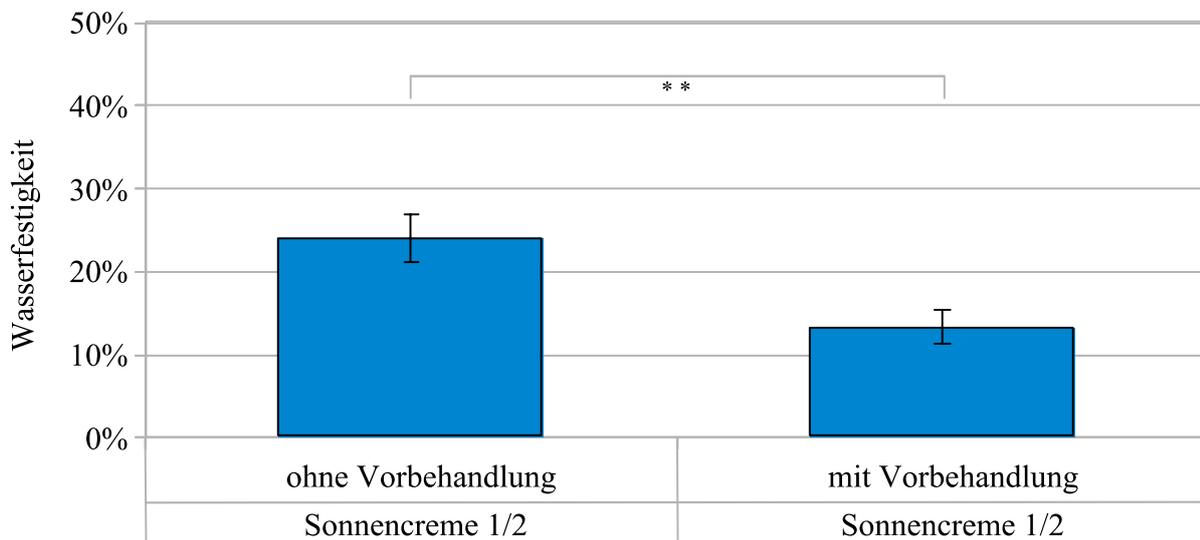


Diagramm 14: Wasserfestigkeit der Sonnenschutzfilter (Mittelwert \pm Standardfehler) nach Wasserkontakt und Lufttrocknung ohne (Sonnenscreme 1/2) und mit kosmetischer Vorbehandlung (Lotion/Creme + Sonnenscreme 1/2)

3.3.3 Vertikal gebundene Filtermenge nach Wasserkontakt und Handtuchrocknung

Neben der Wasserfestigkeit der Sonnenschutzmittel untersuchten wir, wie in Kapitel 2.7.2 detailliert beschrieben, das Ausmaß des zusätzlichen mechanischen Abriebs, der durch Handtuchrocknung nach dem Schwimmen entsteht.

Beim Vergleich der auf und in der Haut gebundenen Filter nach Luftrocknung (Diagramm 15, blaue Balken) und Handtuchrocknung (Diagramm 15, grüne Balken) zeigt sich in allen Untersuchungsgruppen ein zusätzlicher Materialverlust durch den mechanischen Abrieb. Aufgrund der interindividuell großen Varianz im Abtrocknungsverhalten der einzelnen Probanden erreicht dieser Unterschied jedoch nur in der mit Lotion und Produkt 1 behandelten Untersuchungsgruppe eine statistische Relevanz. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Vorbehandlungsgruppen sind in der erhöhten Abwaschbarkeit der Sonnenschutzmittel nach kosmetischer Vorbehandlung begründet.

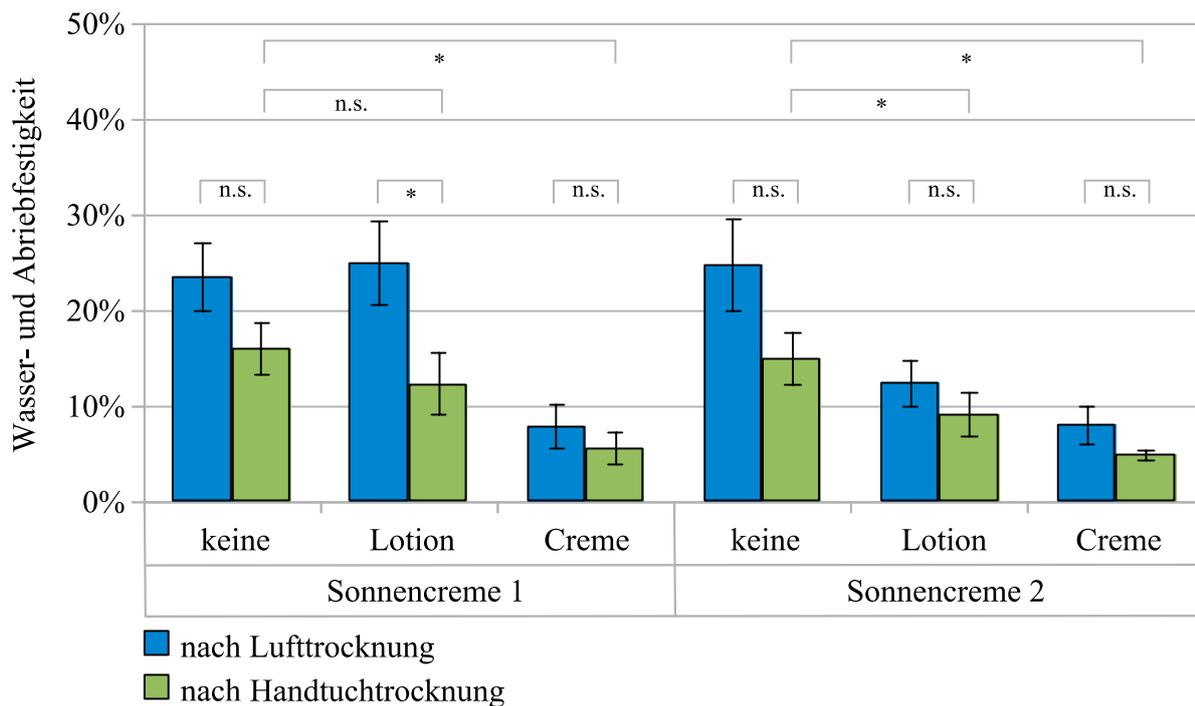


Diagramm 15: Einfluss von kosmetischer Vorbehandlung auf die Wasser- und Abriebfestigkeit von Sonnenschutzmitteln (Mittelwert \pm Standardfehler). Luftrocknung und Handtuchrocknung im Vergleich.

In der Gesamtbetrachtung aller Probanden ohne Unterscheidung nach Vorbehandlung und verwendetem Sonnenschutzmittel stellt sich der Einfluss der Handtuchrocknung deutlich dar

(Diagramm 16).

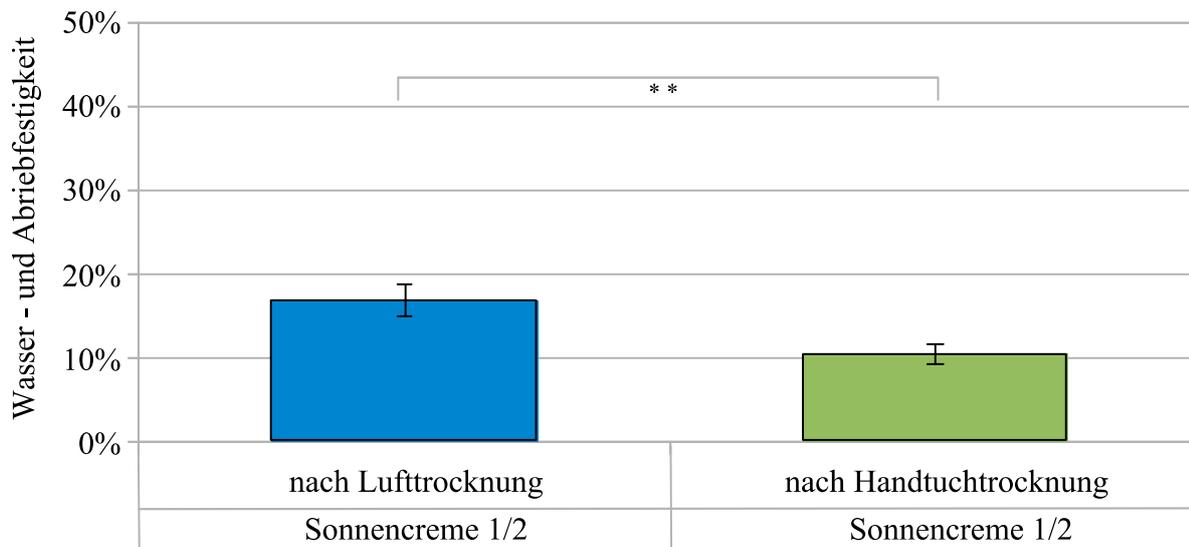


Diagramm 16: Wasser und Abriebfestigkeit von Sonnenschutzmitteln nach unterschiedlichen Trocknungsvarianten (Mittelwert \pm Standardfehler).

Die probandenspezifische Abtrocknung der Haut mit einem Handtuch verringert die nach dem Schwimmen auf und im Stratum corneum gebundene Filtermenge hoch signifikant (gAUK 104 ± 12) im Vergleich zu Lufttrocknung (gAUK 171 ± 21). Der durchschnittliche Filterverlust durch mechanischen Abrieb beim Trockenreiben beträgt $6,4 \% \pm 1,5 \%$, Maximum 36% . Ersichtlich als Abstand zwischen den beiden in Diagramm 16 abgebildeten Balken.

Zum Vergleich: die Reduktion der vertikal gebundenen Filtermenge durch Wasserkontakt liegt hingegen bei $83 \% \pm 2 \%$, Minimum 57% , Maximum 97% .

3.4 Effektiver UV-Schutz

Der effektive UV-Schutz eines Sonnenschutzmittels auf der Haut ist abhängig von den beiden bislang separat dargestellten Parametern horizontale Verteilungshomogenität (Abschnitt 3.2) und vertikal gebundene Filtermenge (Abschnitt 3.3). Ihr Zusammenwirken bestimmt wie viel UV-Licht in vivo durch das Sonnenschutzmittel aufgehalten werden kann. Die Berechnung der effektiven UV-Schutzwirkung wurde im Detail in Kapitel 1.8 erläutert.

3.4.1 Effektiver UV-Schutz vor Wasserkontakt

Nach Auftrag der beiden Sonnenschutzmittel in standardisierter Menge verfügen beide Produkte über eine sehr gute Schutzwirkung. Mit einem effektiven UV-Schutz von $94.4 \% \pm 0.5 \%$ beziehungsweise $91.7 \% \pm 0.8 \%$ über das gesamte untersuchte UV-Spektrum unterscheiden sie sich nur geringfügig (Diagramm 17, keine Vorbehandlung). Eine Vorbehandlung der Haut mit Creme oder Lotion verändert diese Schutzwirkung nicht signifikant.

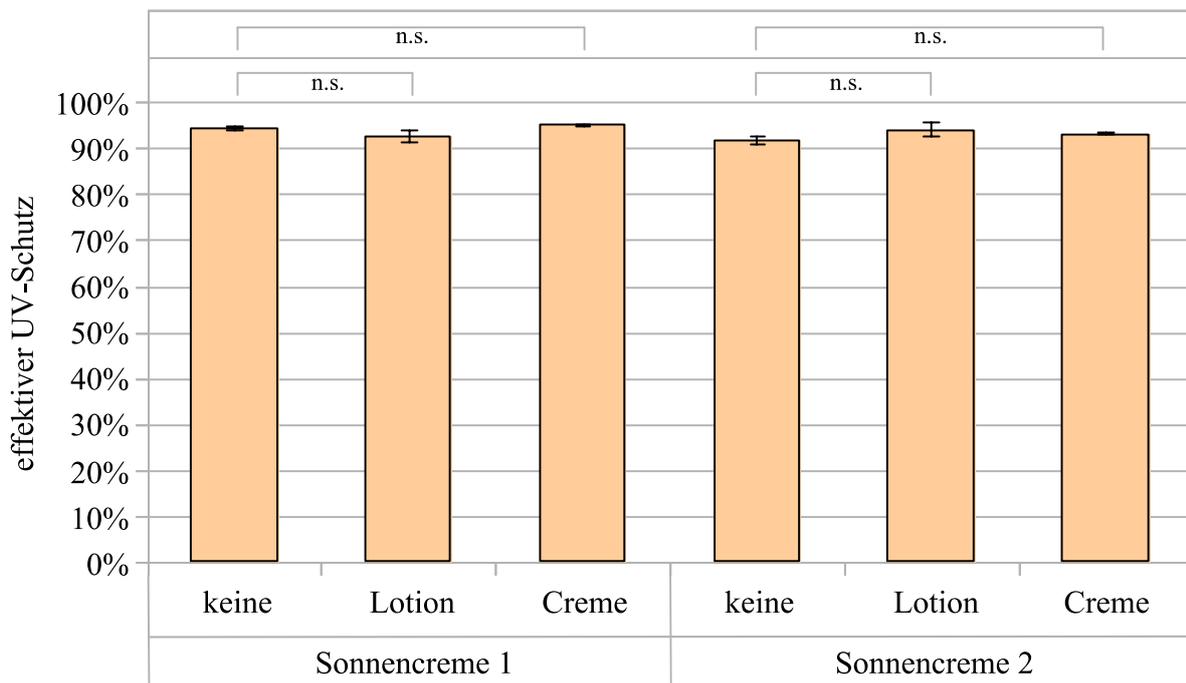


Diagramm 17: Einfluss unterschiedlicher kosmetischer Vorbehandlungen auf den mittleren effektiver UV-Schutz im UVB- und UVA-Bereich (280-400 nm) vor Wasserkontakt (Mittelwert \pm Standardfehler).

3.4.2 Effektiver UV-Schutz nach Wasserkontakt und Lufttrocknung

Nach 15-minütigem Schwimmen ist die effektive UV-Schutzwirkung der aufgetragenen Sonnenschutzmittel stark reduziert (Diagramm 18).

Ohne eine Vorbehandlung sinkt der effektive UV-Schutz der beiden Sonnenschutzprodukte durch Abwaschung um jeweils etwa 21 Prozentpunkte auf $74 \% \pm 2.5 \%$ (Produkt 1) beziehungsweise $70 \% \pm 3 \%$ (Produkt 2). Dies entspricht einem relativen Verlust zwischen 1/5 und 1/4 der

ursprünglichen UV-Schutz-Kapazität vor Wasserkontakt.

Eine Vorbehandlung mit Creme senkt die UV-Schutzwirkung des Sonnenschutzmittels 1 nach Wasserkontakt um zusätzliche 15 % ± 4.5 %. Dies entspricht einer relativen AbsorptionseinbuÙe von etwa 1/3 der Ausgangskapazität. Bei Vorbehandlung der Haut mit Lotion hingegen zeigt sich nach Wasserkontakt keine signifikante Veränderung gegenüber der nicht vorbehandelten Haut.

Der UV-Schutz von Produkt 2 nach Wasserkontakt verringert sich sowohl nach einer Vorbehandlung mit Lotion, als auch mit Creme hoch signifikant um zusätzlich 14 beziehungsweise 15 Prozentpunkte auf 56 % ± 2 % (Lotion) und 55 % ± 3 % (Creme). Der effektive UV-Schutz nach beiden Vorbehandlungen hat sich dabei im Vergleich zur Schutzkapazität von Produkt 2 vor Wasserkontakt um etwa 1/3 verringert.

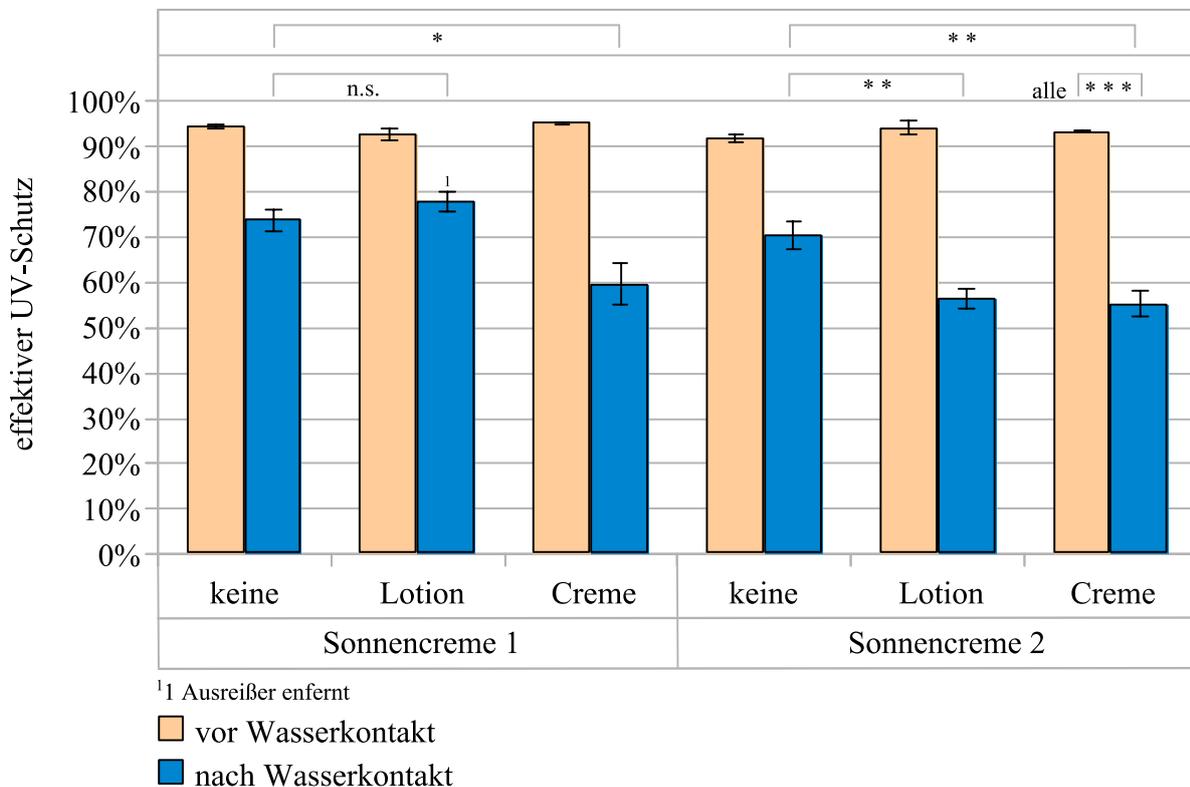


Diagramm 18: Einfluss der kosmetischen Vorbehandlung auf den effektiven UV-Schutz nach Wasserkontakt und Lufttrocknung (blaue Balken). UV-Schutz vor Wasserkontakt (orange Balken) zum Vergleich. Mittelwert ± Standardfehler

Wie auch die vom Sonnenschutzmittel und der Vorbehandlungsart unabhängige Auswertung bestätigt (Diagramm 19), hat eine kosmetische Vorbehandlung keinen Einfluss auf die nach dem Sonnenschutzmittelauftrag vorliegende Strahlungsdurchlässigkeit, verschlechtert den UV-Schutz nach Wasserkontakt jedoch signifikant.

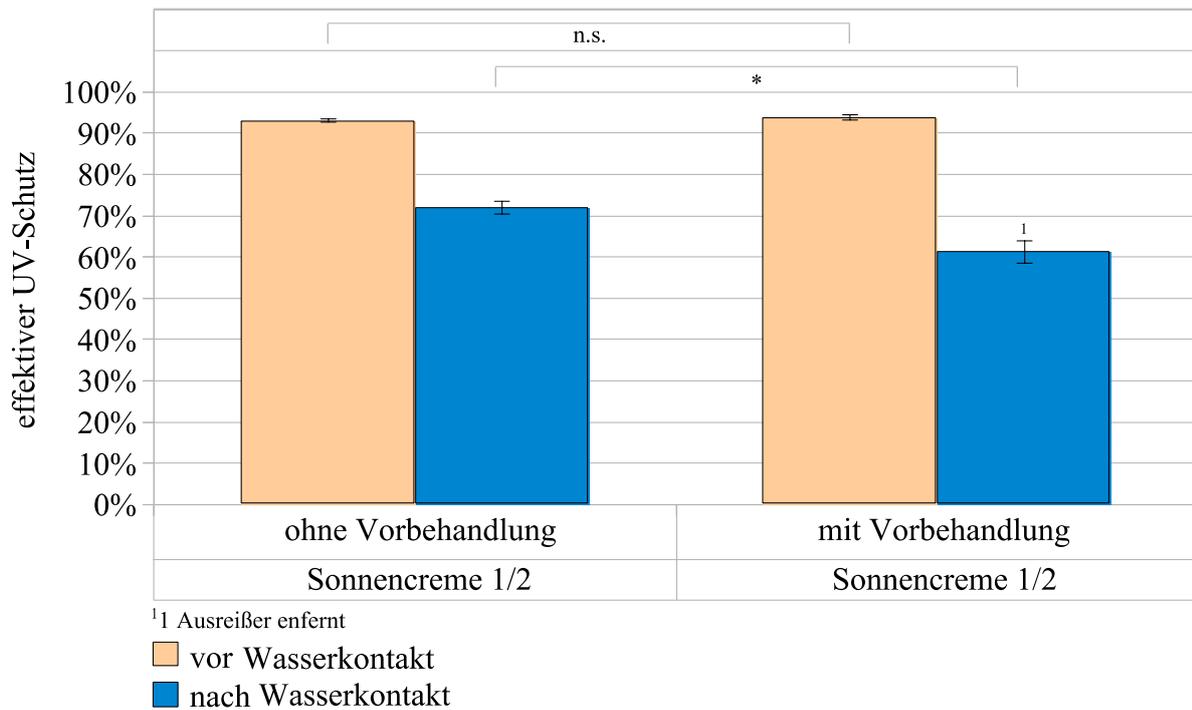


Diagramm 19: Effektiver UV-Schutz (280-400nm) vor und nach Wasserkontakt, mit und ohne Vorbehandlung (Mittelwert ± Standardfehler). Alle Sonnenschutzmittel, alle Vorbehandlungsgruppen enthalten.

3.4.3 Effektiver UV-Schutz nach Wasserkontakt und Handtuchtrocknung

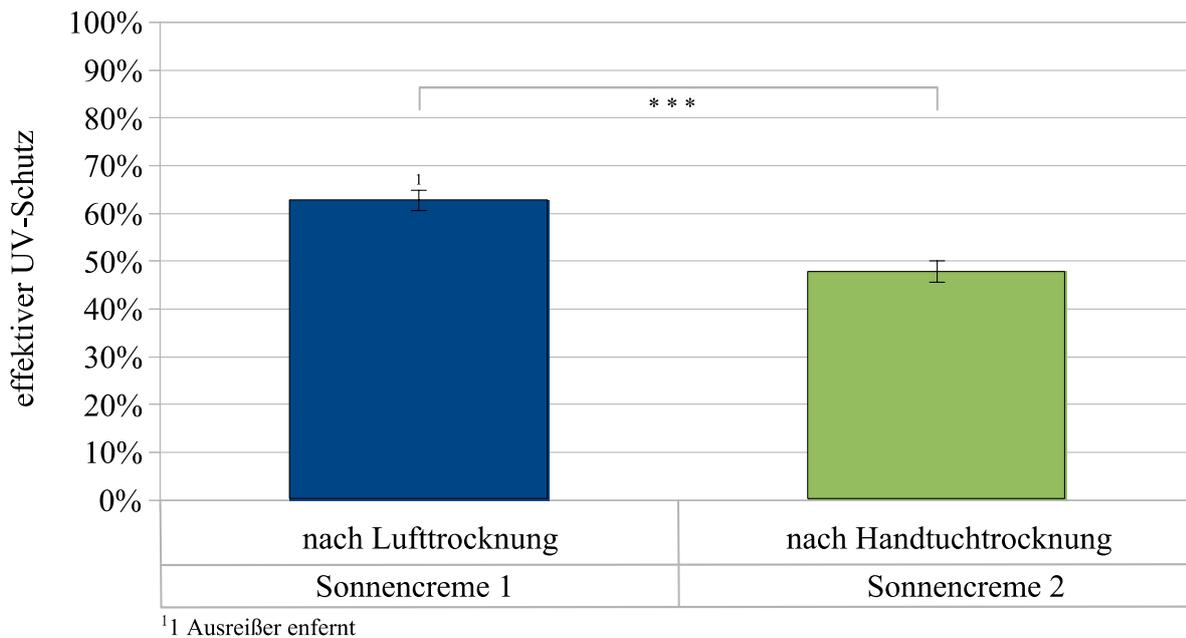


Diagramm 20: Einfluss unterschiedlicher Trocknungsvarianten auf den effektiven UV-Schutz (Mittelwert ± Standardfehler).

Nach dem Schwimmen verringert die Trocknung der Haut mit einem Handtuch den effektiven UV-Schutz eines Sonnenschutzmittels höchst signifikant ($48 \% \pm 2 \%$) gegenüber der Lufttrocknung ($63 \% \pm 2 \%$). Eine Untersuchungsgruppen- und Sonnenschutzmittelunabhängige Darstellung findet sich in Diagramm 20. Der Effektivitätsverlust nach Schwimmen und Handtuch Trocknung wird im Mittel zu etwa $2/3$ durch Wassereinwirkung und zu etwa $1/3$ durch den mechanischen Abrieb beim Trockenreiben der Haut verursacht. Dabei ist zu beachten, dass letzterer Einfluss - abhängig vom jeweiligen Trocknungsverhalten - hohen interindividuellen Schwankungen unterliegt.

4. Diskussion

Mithilfe der Kombination von Tape-Stripping und Photospektrometrie wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit

- der Einfluss einer Hautvorbehandlung mit kosmetischen Produkten,
- der Einfluss von Wasserkontakt unter Berücksichtigung unterschiedlichen Trocknungsverhaltens

auf die Wirksamkeit von Sonnenschutzmitteln untersucht. Die im vorausgegangenen Abschnitt ausführlich dargestellten Ergebnisse werden im Folgenden systematisch mit aus dem aktuellen Wissensstand resultierenden Argumentationsansätzen abgeglichen und diskutiert. Nachfolgend werden konkrete Verhaltenshinweise für die Bevölkerung abgeleitet.

4.1 Vorbehandlung der Haut mit kosmetischen Produkten

Bislang haben sich nur wenige Studien mit dem Zusammenwirken von Kosmetika und Sonnenschutz der Haut auseinandergesetzt (68; 69). Zu Beginn unserer Untersuchung waren auf Grundlage des derzeitigen Wissensstandes verschiedene Auswirkungen einer kosmetischen Vorbehandlung auf den erzielten Sonnenschutz denkbar.

4.1.1 Vorbetrachtung

Zum besseren Verständnis der nachfolgenden Argumentationsansätze soll an dieser Stelle noch einmal kurz die primäre physikalische Interaktion von UV-Strahlung und Haut sowie die Wirkung von kosmetischen Produkten auf der Haut beleuchtet werden.

Einfallende energiereiche Strahlung wird an der Oberfläche des Stratum corneum und in den tiefer gelegenen Schichten der Haut reflektiert, gestreut und absorbiert. Ein Maß für die optische Dichte eines Stoffes ist die Brechzahl, für deren Bestimmung die Phasengeschwindigkeit des Lichts im Vakuum mit der Phasengeschwindigkeit des Lichts in einem anderen Medium ins Verhältnis gesetzt wird. Wie stark eine elektromagnetische Welle an der Grenzfläche zwischen zwei Stoffen reflektiert beziehungsweise gebrochen wird, hängt vom Verhältnis der Brechzahlen beider Medien zu einander ab, dem jeweiligen relativen Brechungsindex (14).

In der menschlichen Haut finden diese Vorgänge vor allem an den Grenzflächen von interstitieller sowie intrazellulärer Flüssigkeit und den optisch dichteren Bestandteilen wie Kollagen- und

Elastinfasern, Melaningranula und Zellmembranen statt (70; 71).

In den Korneozyten der Epidermis befinden sich osmotisch wirksame Substanzgruppen wie Harnstoff, Salze und organische Säuren, die Wasser in den Zellen festhalten. Die Zellmembran sowie die extrazelluläre Lipidmatrix wirken zudem einer Verdunstung entgegen. Bei Reduktion der Barrierewirksamkeit des Stratum corneum, sei es durch Krankheiten, häufige mechanische Irritation oder den natürlichen Hautalterungsprozess, ist die Haut in ihrer Funktion beeinträchtigt. Schadstoffe und Bakterien können eindringen und Feuchtigkeit nicht mehr suffizient vor Verdunstung geschützt werden. Die Haut trocknet aus und wird empfindlich.

Hautpflegeprodukte können dem in unterschiedlichem Maß entgegenwirken. Cremes und Lotionen sind zwei häufig verwendete Produktgruppen im Rahmen der Hautpflege. Die mehrphasigen Öl-in-Wasser beziehungsweise Wasser-in-Öl-Emulsionen sind je nach Zusammensetzung hydro- oder lipophil, enthalten bis zu 30 % - 50 % beziehungsweise bis zu 70 % reines Wasser, zudem Emulgatoren, Spreitmittel und Konservierungsstoffe sowie eine Reihe variabler Ingredienzien, von denen auch die Gruppe der Antioxidantien von Bedeutung ist. Hautpflegeprodukte können der Haut Feuchtigkeit zuführen, diese durch Bildung eines Fettfilms auf der Hautoberfläche im Stratum corneum halten, durch ihre lipophile Phase rückfettend wirken und aktive Substanzen in die Haut einschleusen. Sie führen durch Feuchtigkeitsanreicherung zu einem Aufquellen des Stratum corneum und damit zu einer zeitweiligen Glättung der Hautoberfläche. Zudem verändern sie die physikalischen Eigenschaften der Epidermis, beispielsweise deren Brechungsindices.

4.1.2 Argumentationsansätze für eine kosmetische Vorbehandlung

a) Besserer Sonnenschutz durch Optimierung der Verteilungseigenschaften von Sonnenschutzmitteln?

Dieser erste Überlegungsansatz ergibt sich, wenn man das Verteilungsverhalten von Sonnenschutzmitteln auf der Haut betrachtet. Bereits 2003 beschrieben Jacobi et al. das laterale Spreiten von UV-Filtern entlang der Hautoberfläche (49). Bei diesem symmetrischen Prozess verteilen sich topisch applizierte Substanzen entlang den Furchen- und Faltenstrukturen auf der Haut. Das laterale Spreiten steht dabei in direkter Konkurrenz zur Substanzpenetration in das Stratum corneum. Insbesondere auf kleinflächig behandelten Arealen kann dadurch die Wirksamkeit der applizierten Substanzen reduziert sein. Großflächig betrachtet führt das Spreiten jedoch zu einer Homogenisierung der Substanzverteilung auf der Hautoberfläche. Durch eine

ausreichend hohe Auftragsmenge kann gleichzeitig dem negativen Einfluss der Penetrationskonkurrenz auf die im Stratum corneum gebundene Filtermenge entgegengewirkt werden (49; 72).

Da die Applikation von Sonnenschutzmitteln großflächig und großzügig erfolgen sollte, kann hierbei von einem Überwiegen der Homogenisierung durch laterales Spreiten gegenüber der Penetrationskonkurrenz ausgegangen werden. Die Ausprägung dieses Effekts wird - bei nur geringer interindividueller Varianz - durch die aufgetragene Emulsion selbst bestimmt (49). Eine kosmetische Vorbehandlung der Haut mit einer Creme oder Lotion könnte demnach die Spreiteigenschaften applizierter Sonnenschutzmittel verstärken und so zu einer Homogenisierung der Filterverteilung und Zunahme des UV-Schutzes führen.

Diese Vermutung konnte in unserer Untersuchung nicht bestätigt werden. Es konnte weder eine Zunahme des Homogenitätsfaktors durch verbesserte Filterverteilung, noch eine Verringerung der Sofortschutzwirkung durch das laterale Spreiten der Sonnenschutzmittel über die Grenzen der 4x5 cm umfassenden Applikationsfelder hinaus festgestellt werden. Als Ursache hierfür kommt eine nahezu vollständige Penetration der verwendeten kosmetischen Produkte nach 30 Minuten in das Stratum corneum in Frage. Verbleibt kein oder nur ein dünner Film Lotion beziehungsweise Creme auf der Hautoberfläche, so wird das Spreitverhalten der später applizierten Sonnenschutzmittel nicht verändert. Andererseits muss in Betracht gezogen werden, dass die Formulierungen der verwendeten Sonnenschutzmittel, die sowohl die Anhaftung der enthaltenen Filtersubstanzen als auch ihre möglichst homogene Filterverteilung gewährleisten sollen, über den kosmetischen Produkten ähnliche Spreiteigenschaften verfügen und insofern nicht zusätzlich von einer Vorbehandlung profitieren.

b) Besserer Sonnenschutz durch Homogenisierung der Hautoberfläche?

Ein weiter Überlegungsansatz ergibt sich unter Berücksichtigung des Einflusses von Kosmetika auf die Morphologie des Stratum corneum. Wie zuvor beschrieben, beeinflusst die Verteilung von Filtersubstanzen in vivo die Schutzwirkung der Produkte (73; 74). Das raue, ungleichmäßige Oberflächenprofil der Haut reduziert die Effektivität und den LSF von Sonnenschutzmitteln um ein Vielfaches (58; 75; 76). Die aktiven Filterbestandteile akkumulieren in den Hautfurchen und -falten und können aufgrund ihrer inhomogenen Verteilung nach Lademann et al. zu einer Verringerung des optimalen produktspezifischen Schutzpotentials um den Faktor 10 führen (48). Dieser Faktor bezeichnet gleichzeitig das maximale Optimierungspotential, welches durch eine Verbesserung der

horizontalen Filterverteilung auf der Haut erzielt werden könnte.

Es ist möglich eine Verbesserung der Verteilungshomogenität durch die Entwicklung und Verwendung geeigneter Formulierungen bereits innerhalb der Sonnenschutzmittel zu erreichen (48). Davon unabhängig können jedoch auch andere häufig topisch angewandte Produkte, wie beispielsweise Kosmetika, das Oberflächenprofil der Haut verändern. Die Vermutung liegt nahe, dass Pflegeprodukte wie Cremes oder Lotionen, die durch Feuchtigkeitseinlagerung zu einem Quellen des Stratum corneum und einer damit verbundenen Homogenisierung der Hautoberfläche führen sollen, die in vivo Wirksamkeit von Sonnenschutzmitteln verbessern können.

Im Rahmen unserer Untersuchungen konnte diese Annahme nicht bestätigt werden. Weder die Verteilungshomogenität der Filtersubstanzen, noch der effektive UV-Schutz der Haut nach Auftrag von Sonnenschutzprodukten veränderte sich durch eine kosmetische Vorbehandlung signifikant. Die von uns verwendete Creme und Lotion verursachten keine im Absorptionsverhalten erkennbare relevante Homogenisierung der Hautoberfläche, obwohl die Auftragsmenge von 1,5 mg/cm² Hautoberfläche dem durchschnittlichen Aufnahmevermögen der Hautfurchen und -falten von etwa 1 - 2 mg/cm² hinreichend entsprach (77). Wir müssen daher davon ausgehen, dass zum Zeitpunkt der Sonnenschutzmittelapplikation bereits ein Großteil der Vorbehandlungssubstanz vom Stratum corneum resorbiert worden war, ohne dabei einen andauernden, wirkungsrelevanten Quelleffekt zu hinterlassen.

Dabei gilt es zu beachten, dass die vorliegende Studie an einem vergleichsweise jungen Probandenkollektiv durchgeführt wurde. Im Rahmen der intrinsischen und extrinsischen Hautalterung nimmt bekanntermaßen die Ausprägung von Furchen und Falten und somit auch der Grad der Hautinhomogenität zu. Die Zellerneuerungsprozesse verlangsamen sich, Kollagen- und Elastinkonzentration nehmen ab, die Talgdrüsenaktivität und die Fähigkeit der Haut zur Feuchtigkeitsbindung sinkt (78). Inwiefern im Speziellen eine ältere Personengruppe daher möglicherweise bezüglich des Sofortschutzes doch von einer kosmetischen Vorbehandlung profitieren kann, bleibt einstweilen unbeantwortet. Gleiches gilt für die Frage ob, im Gegensatz zur einmaligen Anwendung, durch eine regelmäßige kosmetische Hautpflege das Oberflächenprofil der Haut geglättet und hierdurch ein positiver Effekt auf die Wirksamkeit von Sonnenschutzprodukten erzielt werden kann.

c) Besserer Sonnenschutz durch synergistisches Wirken chemischer Produktbestandteile?

In den letzten Jahren konnte für verschiedene Nicht-Filter-Substanzgruppen eine relevante Schutzwirkung vor UV-bedingten Hautschäden nachgewiesen werden. Von besonderer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang vor allem Antioxidantien und DNA-Reparaturstimulantien, die über verschiedene Wirkungsmechanismen der Schädigung zellulärer DNA durch freie Radikale entgegenwirken (2). Für Vitamin C und E, Selenium, Silymarin und Polyphenole aus unfermentiertem grünen Tee konnte ein signifikanter protektiver Effekt nachgewiesen werden. So vermag beispielsweise L-Selenomethionin über Beeinflussung der Glutathion-Peroxidase und Thioredoxin-Reduktase bei topischer Anwendung die minimale erythemauslösende UV-Dosis zu erhöhen (79). Zum Schutz vor lichtbedingter Hautalterung haben viele Kosmetikerhersteller diese Substanzgruppen bereits in ihre Hautpflegeprodukte integriert. Oresajo et al. konnten zeigen, dass sich Sonnenschutzprodukte und Antioxidantien in ihrer Wirkung ergänzen und bei kombinierter Anwendung zu einem verbesserten Schutz vor lichtbedingter Hautschädigung führen (80; 81). Eine kosmetische Vorbehandlung der Haut mit einer antioxidantienreichen Creme oder Lotion könnte so, ähnlich wie es durch die Verwendung von After-Sun-Produkten geschieht, das Schutzpotential der Haut gegenüber schädigenden UV-Einflüssen erhöhen.

Da das unmittelbare Absorptionsverhalten von Haut und applizierten Filtersubstanzen dabei unverändert bleibt, eignet sich die von uns gewählte Studienmethodik jedoch nicht für die Beurteilung dieser Fragestellung.

4.1.1 Argumentationsansätze gegen eine kosmetische Vorbehandlung

a) Verschlechterter Sonnenschutz durch Erhöhung der hauteigenen optischen Durchlässigkeit?

Topisch applizierte Substanzen, welche die Hautbarriere durchdringen, können die physikalische UV-Schutzwirkung der menschlichen Haut reduzieren, wenn ihre Brechzahl größer ist als die der umgebenden interstitiellen und intrazellulären Flüssigkeit (69; 82). Dringen solche Substanzen durch Diffusion in die Haut ein, so vermischen sie sich mit der Gewebeflüssigkeit und erhöhen, sofern ihre eigene Brechzahl die des Interstitiums übersteigt, die optische Dichte desselben. Der Brechungsindex zwischen Interstitium und den optisch dichteren Medien sinkt. Unterstützt wird die Angleichung der Brechzahlen durch osmotische Migration von Wasser an die Hautoberfläche und einem damit verbundenen relativen Anstieg der interstitiellen Konzentration organischer Substanzen. Der relative Brechungsindex verkleinert sich, die optische Dichte des Gesamtgewebes sinkt, die Strahlungsdurchlässigkeit der Haut nimmt zu (83; 84).

Tuchin et al. beobachteten eine Zunahme der Transmission um den Faktor 3,8 binnen einer Stunde

nach subkutaner Injektion einer 40-prozentigen Glukoselösung (82). Nach Auftrag einer Öl-in-Wasser-Emulsion auf die Haut dokumentierten Lademann et al. eine Zunahme der UV-Transmission um 20% (69). Handa et al. konnten eine Zunahme von Zelltod, oxidativem Stress, NO-Produktion, Lipidperoxidation und Induktion von Transkriptionsfaktoren in Keratinozyten der HaCaT-Zelllinie durch UVB-Bestrahlung nachweisen, sofern die Haut zuvor mit Methylparaben, einem in der Kosmetikindustrie weit verbreiteten Inhaltsstoff behandelt worden war (68).

Auf Grundlage dieser Ergebnisse musste in Betracht gezogen werden, dass die UV-Eigenschutzkapazität der Haut nach einer kosmetischen Vorbehandlung sinken und sich dadurch die gemessene Effektivität verwendeter Sonnenschutzmittel reduzieren kann.

In der von uns durchgeführten Untersuchung bestätigte sich diese Vermutung nicht. Es ist anzunehmen, dass die Verringerung der hauteigenen Schutzwirkung, sofern sie durch die topische Anwendung von handelsüblicher Creme, Lotion oder der Formulierung des Sonnenschutzmittels selbst ausgelöst wurde, im Verhältnis zum vergleichsweise hohen Schutzpotential der applizierten Sonnenschutzprodukte vernachlässigt werden kann. Bereits ein geringfügiger LSF von etwa 2 – 4 sollte gemäß den in der Literatur beschriebenen Transmissionszunahmen in der Lage sein, die verringerte Eigenschutzkapazität, welche in Folge einer kosmetischen Behandlung mit lipophilen, optisch dichten Formulierungen auftreten kann, zu kompensieren.

b) Verschlechterter Sonnenschutz durch Verringerung der Haftfähigkeit des Sonnenschutzproduktes?

Die Güte eines Sonnenschutzmittels wird bekanntermaßen nicht nur durch seinen Sofortschutz, sondern vor allem auch durch seine Haltbarkeit bestimmt. Die möglichst hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber äußeren Einflüssen wie Wasser, Schweiß oder mechanischem Abrieb ist essentiell für einen verlässlichen UV-Schutz in der alltäglichen Anwendungssituation. Sie wird vor allem durch die Befähigung der Filter, sich am und im Stratum corneum zu binden, bestimmt.

In diesem Zusammenhang muss erwogen werden, dass Kosmetika durch Diffusion in das Stratum corneum das natürliche Aufnahmereservoir der Haut zu sättigen vermögen und durch Bildung einer okklusiven Schicht an der Hautoberfläche nicht nur einer Verdunstung von Feuchtigkeit entgegenwirken, sondern gleichermaßen das Eindringen organischer und die Anhaftung anorganischer Filter beeinträchtigen können, um so mehr, je ähnlicher sich Vorbehandlungs- und Sonnenschutzmittel hinsichtlich der Hydro- beziehungsweise Lipophilie ihrer Formulierungen sind. Dies erklärt sich, wenn man bedenkt, dass die Penetration topisch applizierter Substanzen in

die Haut vorrangig per Diffusion durch das epitheliale Schlussleistennetz entlang der Interzellulärspalte erfolgt. Zwar stehen auch transzelluläre, transglanduläre und transfollikuläre Transportwege zur Verfügung, doch spielen diese für die Aufnahme topisch applizierter Cremes, Lotionen und Sonnenschutzprodukte nur eine untergeordnete Rolle (85).

Entscheidend für die transepitheliale Resorptionsfähigkeit eines Stoffes sind seine Struktur und Größe, Hydro- beziehungsweise Lipophilie sowie gegebenenfalls das Vorhandensein funktioneller Gruppen (86). Die grundlegende Permeabilität des Stratum corneum variiert mit seiner Dicke, Dichte der Zellpackung und intrazellulärer Struktur, Lipidgehalt und molekularer Zusammensetzung, Hydratationszustand, Lebensalter, gegebenenfalls vorliegenden Verletzungen oder pathologischen Hautveränderungen (87).

An der Hautoberfläche kommt es geraume Zeit nach Applikation einer diffusionsfähigen Substanz zur Ausbildung eines Fließgleichgewichts zwischen der extern applizierten Formulierung und dem interstitiellen Raum. Der dem anfänglich hohen transdermalen Gradienten folgende Diffusionsstrom verlangsamt sich und wird auf niedrigem Niveau durch den einsetzenden intradermalen Abbau und Abtransport der aufgenommenen Formulierung aufrecht erhalten. Wird nun ein zweites, der ersten Substanz ähnliches Produkt aufgetragen, so trifft dieses auf ein bereits gesättigtes Hautreservoir, die Aufnahme erfolgt nur langsam und in dem Maß, in welchem das erste Produkt abtransportiert und gegebenenfalls abgebaut wird. Handelt es sich, wie in unserer Untersuchung bei dem zweiten Produkt um ein Sonnenschutzmittel, so führt die reduzierte epitheliale Resorption von Filtern und Formulierung zu einer verringerten Bindung auf und im Stratum corneum und somit zu einer Abnahme der Resistenz gegenüber äußerer Beanspruchung.

Zudem ist denkbar, dass durch die Bildung eines okklusiven Films, wie sie durch eine Vielzahl kosmetischer Produkte hervorgerufen wird, die Anhaftung anorganischer Filter an der Oberfläche des Stratum corneum beeinträchtigt ist. Befinden sich die aufgetragenen Sonnenschutzfilter nun weitgehend lose auf der Hautoberfläche, anstatt suffizient resorbiert und gebunden zu sein, sind sie weitaus weniger resistent gegenüber äußeren Stressoren, ohne dass dabei die unmittelbar nach Auftrag messbare Schutzwirkung beeinträchtigt wäre.

Diese Überlegungen decken sich mit den Ergebnissen unserer Untersuchung. Eine kosmetische Vorbehandlung kann die Wasserfestigkeit von Sonnenschutzprodukten bedeutsam verschlechtern, ohne den unmittelbaren Sofortschutz zu verändern. Ähnliche Auswirkungen lassen sich auch auf die Resistenz gegenüber mechanischem Abrieb, wie er etwa durch Sandeinwirkung am Strand auftritt oder auf die Anhaftfähigkeit des Produktes bei Schweißbildung im Rahmen körperlicher Anstrengungen erwarten.

c) ... Schlechterer Sonnenschutz durch Interaktion chemischer Produktbestandteile?

Es ist zu bedenken, dass einzelne kosmetische Inhaltsstoffe unter Umständen direkt mit den chemischen Bestandteilen der Sonnenschutzfilter und -formulierungen in Wechselwirkung treten und so das ausgewogene Wirkungsvermögen der Produkte stören können.

Ein Beispiel hierfür sind Carbomere. Sie finden sich als emulsionsstabilisierende und viskositätsbildende Bestandteile in vielen Cremes und führen in Gegenwart von Titandioxid oder Zinkoxid zur Bildung „hüttenkäseartiger“ Inhomogenitäten in der Formulierung und schlimmstenfalls zu ihrer Zersetzung, zumindest jedoch zu einer ausgeprägten Viskositätszunahme (88). Bei zeitnaher Applikation carbomerhaltiger Kosmetika und eines Sonnenschutzmittels mit anorganischen Filterbestandteilen ist demnach eine Verschlechterung der Filterverteilungshomogenität und des damit verbundenen UV-Schutzes zu erwarten.

Es ist kein Anliegen der vorliegenden Untersuchung, die Frage nach den Interaktionen einzelner chemischer Bestandteile der verschiedenen Produkte zu beantworten. Auch erscheint ein solches Unterfangen vor dem Hintergrund der marktgegebenen Produktvielfalt und -fluktuation generell fragwürdig, zumal hierfür nicht nur die Wechselwirkung einzelner chemischer Substanzen, sondern die des gesamten Produkts untersucht werden müsste. Technisch ist die Beobachtung und Beschreibung des Zusammenspiels solcher Produktsysteme in Hinblick auf wirkungsrelevante Parameter wie Homogenität, Sofortschutz und Wasserfestigkeit der Sonnenschutzmittel durch die Kombination von Tape-Stripping-Prozedur und Photospektrometrie, wie von uns durchgeführt, durchaus möglich. Realisierbar und sinnvoll erscheint dies jedoch nur innerhalb sehr enger Rahmenbedingungen, wenn zum einen eine Beschränkung der Produktvielfalt, beispielsweise durch Orientierung an den meist verwendeten Sonnenschutz- und Körperpflegeprodukten oder durch Konzentration auf spezielle Personengruppen mit häufigen Produktkombinationen im Rahmen therapeutischer Konzepte wie beispielsweise bei Patienten mit Lupus erythematoses erfolgt und zum anderen die so gewonnen Erkenntnisse in ein sinnvolles Produktzeichnungssystem für die Konsumenten integriert werden.

Zwischen den im Rahmen der vorliegenden Untersuchung verwendeten Sonnenschutzmitteln und den kosmetischen Produkten zur Vorbehandlung zeigten sich keine Interaktionen im Sinne einer Beeinflussung der unmittelbar nach Auftrag bestimmten Schutzeffektivität, ohne dabei einen Anspruch auf Allgemeingültigkeit erheben zu können.

4.1.3 Empfehlungen

Es lässt sich festhalten, dass entsprechend den uns vorliegenden Untersuchungsergebnissen und unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.3. dargestellten Einschränkungen, eine kosmetische Vorbehandlung der Haut weder einen positiven noch einen negativen Effekt auf den unmittelbar nach Applikation und Einwirkungszeit vorhanden UV-Schutz hat. Jedoch kann durch sie die Wasserfestigkeit des Sonnenschutzmittels deutlich herabgesetzt werden.

Daher ist von einer kosmetischen Behandlung der Haut im Vorfeld der Verwendung von Sonnenschutzprodukten abzuraten, insbesondere wenn man bedenkt, dass die verringerte Wasserfestigkeit Anzeichen einer reduzierten Anhaftfähigkeit der Filtersubstanzen am und im Stratum corneum ist und als solches auch eine verringerte Resistenz gegenüber anderen äußeren Einflüssen wie Schweiß oder mechanischem Abrieb wahrscheinlich macht. Unerwünschte chemische Interaktionen zwischen den Bestandteilen verschiedener Produkte können so sicher umgangen werden.

Auf die Verwendung von Cremes und Lotionen vor dem Auftrag von Sonnenschutzmitteln sollte verzichtet werden. Um dabei dennoch nicht auf die protektive Wirkung neuartiger Nicht-Filter-Substanzen wie Antioxidantien und DNA-Reperaturstimulantien verzichten zu müssen, können bereits beim Kauf von Sonnenschutzmitteln Produkte mit einer entsprechenden Zusammensetzung bevorzugt werden. Darüber hinaus ist eine der Sonnenexposition zeitlich nachgeordnete Pflege der Haut mit entsprechenden kosmetischen Produkten und After-Sun-Lotionen zu empfehlen.

4.2 Wasserkontakt unter Berücksichtigung unterschiedlichen Trocknungsverhaltens

Eine Vielzahl äußerer Faktoren, beispielsweise Schwimmen, Schwitzen und Abrieb durch Kleidung oder Sand können in vivo die Wirksamkeit von Sonnenschutzmitteln reduzieren. Die Haftfähigkeit der Produkte ist somit hinsichtlich ihrer Wirksamkeit in der echten Anwendungssituation eine der wichtigsten Eigenschaften (89).

4.2.1 Anhaftfähigkeit bei Schwimmen und Lufttrocknung

Wie im vorausgegangenen Abschnitt dargestellt, konnten wir zeigen, dass eine kosmetische Vorbehandlung der Haut mit einem signifikanten Abfall der Wasserfestigkeit und einem damit verbundenen Verlust an UV-Schutzwirkung verbunden ist.

Ursache hierfür ist, dass Lotionen oder Cremes das Hautreservoir sättigen. Hierdurch verringert sich die Resorption und Anhaftfähigkeit von Sonnenschutzfiltern am und im Stratum corneum. Dies wiederum resultiert in einer geringen Resistenz gegenüber äußeren Einflüssen wie Wassereinwirkung und mechanischem Abrieb.

Der Einfluss einer kosmetische Vorbehandlung auf die Wirksamkeit und auf die Wasserfestigkeit von Sonnenschutzprodukten wurde zuvor nicht untersucht. Hingegen finden sich zahlreiche Studien zur Bestimmung der allgemeinen Wasserfestigkeit von Sonnenschutzmitteln auf nicht vorbehandelter Haut.

Nach einer 10-minütigen Schwimmphase konnten Morganti und Fabrizi für verschiedene Sonnenschutzprodukte einen LSF-Verlust von 20 %, nach 15-minütigem Wasseraufenthalt von 30 % nachweisen (90). Dabei gilt gemäß den Empfehlungen der COLIPA, dass ein Sonnenschutzmittel um die Bezeichnung „wasserfest“ oder „sehr wasserfest“ zu führen, nach einer definierten Abwaschperiode von 2 x 20 Minuten bzw. 4 x 20 Minuten noch mehr als die Hälfte seines ursprünglichen Lichtschutzfaktors aufweisen sollte (91). Bodekaer et al. beobachteten einen LSF-Wirkungsverlust von etwa 43 % acht Stunden nach einmaliger Applikation organischer und anorganischer Sonnenschutzmittel an einem Tag mit physischer Aktivität und Schwimmen in warmer Umgebung (92). Ohne Aktivität und UV-Exposition war im gleichen Zeitraum ein Wirkungsverlust von 25 % zu verzeichnen (93). Ex vivo verglichen Stokes et al. mittels photospektrometrischer Untersuchungen an exzidiierter Epidermis die Wasserfestigkeit unterschiedlicher Sonnenschutzprodukte nach zwei je 20-minütigen Tauchphasen. Sie berechneten hierfür unter Gewichtung des Verlaufs der erythemauslösenden Spektrenkurve einen in vitro LSF. Die auf Grundlage dieses LSF bestimmte Wasserfestigkeit variierte produktabhängig zwischen 52 % und 81 % bei guter Korrelation mit den Ergebnissen der parallel durchgeführten in vivo Bestimmungen (64).

Im Vergleich mit diesen Ergebnissen fiel in unseren Messungen eine scheinbar erhöhte Abwaschbarkeit der Sonnenschutzprodukte ohne eine kosmetische Vorbehandlung mit einem

Materialverlust von bis zu 80 % und resultierenden UV-Absorptionseinbußen von etwa 20 % auf. Hauptursache für diesen Unterschied ist, dass speziell im Rahmen unseres Studiendesigns nicht die Gesamtheit der in das Stratum corneum penetrierten Filter zurückgewonnen wurde. Dadurch wird die tatsächlich vorhandene UV-Absorption unterschätzt. Zudem findet eine Überbewertung des prozentualen UV-Schutzverlusts statt, da der gleiche absolute Materialverlust, beispielsweise durch Wasserkontakt, bei einem geringeren Ausgangswert einen höheren prozentualen Anteil desselben ausmacht, als es bei einem höheren Ausgangswert der Fall ist. Durch Erhöhung der Abrisszahl im Rahmen weiterführender Untersuchungen könnte diese Schwierigkeit umgangen werden. Es wäre auch möglich, mithilfe der so gewonnenen Daten den das gesamte UV-Spektrum umfassenden universellen Lichtschutzfaktor (USPF) zu bestimmen.

Darüber hinaus muss beachtet werden, dass im Gegensatz zu den vorausgehend dargestellten Studien, die von uns bestimmte Wasserfestigkeit unmittelbar auf den photospektrometrischen Extinktionsmessungen über den gesamten UVA- und UVB-Bereich (280-400 nm) beruht. Die so gemessene in vivo Extinktion ist gemäß dem Lambert-Beerschen Gesetz direkt mit der Konzentration und dementsprechend mit der tatsächlich am und im Stratum corneum gebundenen Filtermenge verknüpft. Die daraus errechnete Wasserfestigkeit spiegelt also unmittelbar den realen Verlust von Sonnenschutzmittel auf und in der Haut wider - ohne Informationsverlust durch Weglassen oder Gewichtung einzelner Strahlungsbereiche. Dem gegenüber wurden die in der Literatur beschriebenen Wasserfestigkeiten auf Grundlage der abwaschbedingten LSF-Verringerung bestimmt.

Die aus diesen beiden unterschiedlichen Ausgangswerten Extinktion und LSF bestimmten Wasserfestigkeiten können nicht direkt miteinander verglichen werden.

Ein Vorteil der von uns angewendeten extinktionsbasierten Bestimmung der Wasserfestigkeit ist die Mitbeurteilung der im UVA-Bereich wirksamen Filter, die bei der LSF-basierten Methode weitgehend vernachlässigt werden. Ursache hierfür ist, dass das für die LSF-Bestimmung ausschlaggebende Erythem zu 90 % durch UVB- und nur zu 10 % durch UVA-Strahlung ausgelöst wird. Eine LSF-basierte Wasserfestigkeit beurteilt also fast ausschließlich die Anhaftfähigkeit der im UVB-Spektrum wirksamen Sonnenschutzfilter. UVA-Strahlung ist aber, wie in der Einführung ausführlich dargestellt wurde, ein bedeutender Auslöser der durch Lichtexposition bedingten Hautschädigung.

Die die Erdoberfläche erreichende UV-Strahlung entfällt gemäß den zugehörigen Wellenlängen zu 1/3 auf UVB- (280-320 nm) und zu 2/3 (320-400 nm) auf UVA-Strahlung. Während LSF-basierte Berechnungen die Wirksamkeit von Sonnenschutzmitteln mit einem UVB:UVA-Verhältnis von 9:1

gewichten, spiegeln unsere extinktionsbasierten Werte mit einem Verhältnis von 1:2 eher die reale Strahlungsverteilung am Erdboden wider.

4.2.2 Anhaftfähigkeit bei Schwimmen und Handtuchrocknung

Mit Sonnencreme behandelte Haut, die nach dem Schwimmen mit einem Handtuch trockengerieben wird, ist zusätzlichen zum Abwascheffekt des Wassers noch einer mechanischen Belastung ausgesetzt. Hierbei kann durch Abrieb oberflächlicher Lagen des Stratum corneum die ohnehin schon reduzierte Schutzwirkung noch weiter abgeschwächt werden.

Der mittlere UV-Absorptionsverlust durch die Handtuchrocknung in unserer Untersuchung betrug im Mittel 15 %, mit einer weiten Variabilität zwischen den einzelnen Probanden. Eine einfache und naheliegende Möglichkeit, diesen UV-Schutzverlust zu vermeiden, wäre es, nach dem Baden im Freien gänzlich auf das Trockenreiben mit einem Handtuch zu verzichten und die Haut stattdessen unter Sonnenexposition an der Luft trocknen zu lassen. Ein solches Vorgehen ist jedoch möglicherweise mit anderen Nachteilen verknüpft.

In einer orientierenden Umfrage von Egri et al. im Jahr 2009 bejahten 8 von 9 dermatologischen oder kosmetischen Websites die Frage, ob Wassertropfen auf der Haut während des Sonnenbadens einen Sonnenbrand verursachen können (94). Dem zugrunde liegt die Annahme, dass Wassertropfen auf der Hautoberfläche, ähnlich einer Sammellinse, einfallende Strahlen fokussieren und durch die hohe Strahlungsintensität im Brennpunkt zu einer Schädigung der Haut führen können.

Wasser hat zwischen 280 und 405 nm und bei einer Temperatur von 20°C einen Brechungsindex von 1,36 bis 1,34, mit Abnahme bei ansteigender Temperatur und Wellenlänge. Unter Standardbedingungen (25°C, 289 nm) beträgt seine Brechzahl 1,33. Wasser verfügt damit über eine deutlich geringere Brechkraft als Glas, dessen Brechzahl je nach Sorte zwischen 1,45 und 2,14 liegt.

Ob Wassertropfen auf einer Oberfläche unter Sonnenbestrahlung zu Verbrennungen führen können, untersuchten Egri et al. (94) an unterschiedlichen Blattarten. Während Glas die einfallende Sonnenstrahlung auf der Blattoberfläche bündelte und so stets Verbrennungen verursachte, vermochten Wassertropfen dies im Regelfall nicht. Hauptursache hierfür war die zu geringe Brechkraft des Wassers, die durch die Tendenz der Tropfen, auf der Blattoberfläche eine ellipsenförmige, wenig gekrümmte Struktur einzunehmen, noch weiter reduziert wurde. Hierdurch lag der Brennpunkt der einfallenden Strahlen bei einem steilen Einfallswinkel, wie er gemeinhin um

die Mittagszeit vorliegt, stets weit hinter dem Blatt. Die flachen Tropfen wirkten zudem durch die Abgabe von Verdunstungskühle über ihre große Auflagefläche einer hitzevermittelten Schädigung des Blattes entgegen. Bei einem mit den Morgen- und Abendstunden korrelierenden flachen Einfallswinkel wurde die Strahlung zwar auf der Blattoberfläche fokussiert, war jedoch aufgrund der zu diesen Zeiten geringen Strahlungsintensität nicht in der Lage das Blatt zu schädigen.

Große, spheroidale Tropfen, wie sie auf der Oberfläche wasserabweisender Blätter entstehen, konnten hingegen aufgrund ihrer höheren Brechkraft auch bei steilem Einfallswinkeln die Strahlung auf die Blattoberfläche fokussieren und dort Verbrennungen hervorrufen. Diese Tropfen hatten jedoch die ausgeprägte Tendenz, von der Blattoberfläche herunterzurollen, noch ehe eine Schädigung eintreten konnte. Unabhängig von Tropfenform, -größe und Sonnenintensität, führten Wassertropfen auf der Oberfläche von Blättern in der Regel also nicht zu Verbrennungen. Ausgenommen hiervon waren extrem wasserabweisende Blätter mit wachsartigen Härchen, die die Wassertropfen oberhalb der Blattoberfläche festhielten. Hierdurch projizierte sich der Brennpunkt auf das Blatt bei gleichzeitig fehlender Oberflächenkühlung und verursachte deutliche Verbrennungen (94).

Wie weit die von Egri et al. vermutete Analogie zur menschlichen Haut und der Sonnenbrandentstehung reicht und darüber, welcher der drei dargestellten Mechanismen am ehesten auf eine mit Sonnenschutzmittel behandelte, mit feinen Härchen überzogene Haut zutrifft, kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur gemutmaßt werden.

4.2.3 Homogenität nach Luft- und Handtuchtrocknung

Die Ergebnisse unserer Untersuchung zeigen, dass Verteilungshomogenität von Sonnenschutzmitteln auf der Haut nach Wasserkontakt und Luft-, sowie Handtuchtrocknung zunimmt, während gleichzeitig die auf und in der Haut befindliche Menge Sonnenschutzmittel sinkt. Dieser Effekt ist in Diagramm 21 dargestellt. Die Homogenität hängt also weniger vom Trocknungsverhalten, als vielmehr von der auf der Haut vorhandenen Filtermenge ab. Diese Korrelation spiegelt deutlich das Zusammenwirken von Hautmorphologie und applizierten Sonnenschutzmitteln wider (Abbildung 4, S.56).

Nach dem Auftrag und Einwirken der Sonnenschutzprodukte ist auf und in der Haut folgende Dreischichtung der Filtersubstanzen zu erwarten: zuunterst der Teil der UV-Filter, die vom Stratum

corneum absorbiert wurden und in diesem bis zu einer bestimmten Eindringtiefe annähernd homogen verteilt sind. Darüber befindet sich eine der Hautoberfläche direkt anhaftende zweite UV-Filter-Schicht. Diese folgt annähernd gleichmäßig dem Verlauf der Furchen und Falten im Hautprofil. Darüber lagert die dritte Schicht des applizierten Sonnenschutzmittels. Dieses ist ungebunden und akkumuliert vorrangig in den Furchen und Falten der Haut, so dass nach Auftrag und Einwirkzeit des Sonnenschutzproduktes ein inhomogenes Verteilungsmuster vorliegt (Abbildung 4b).

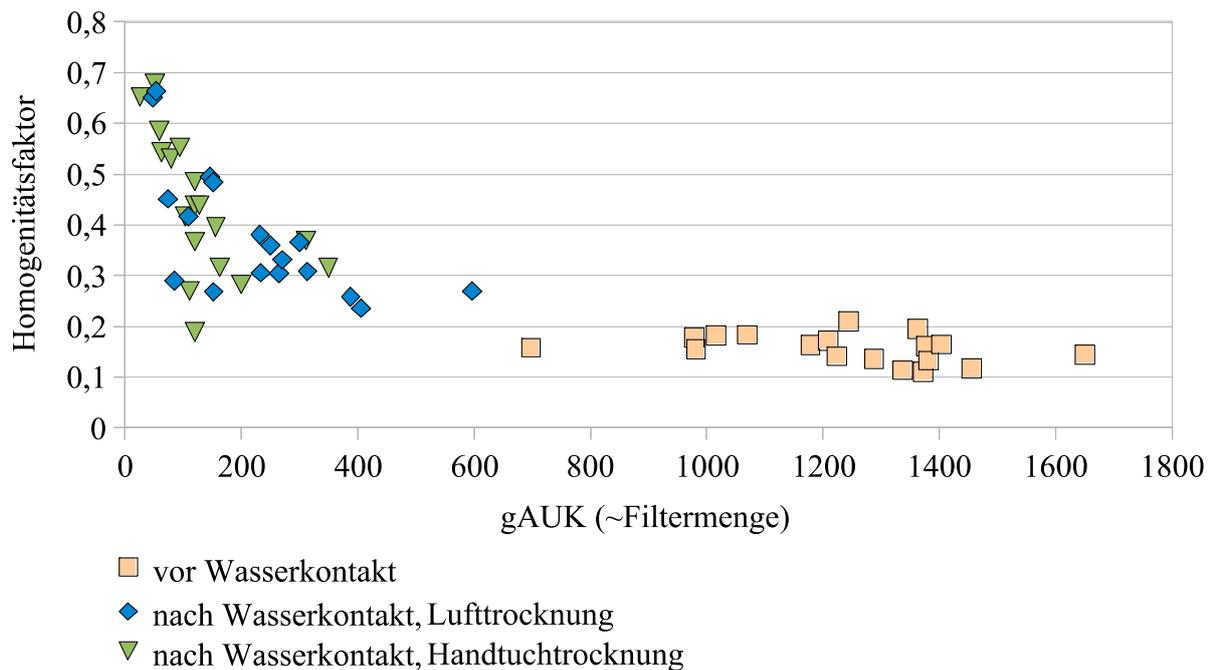


Diagramm 21: Zusammenhang zwischen Verteilungshomogenität und Filtermenge von Sonnenschutzmitteln auf und im Stratum corneum.

Durch Wasser und Strömungsreibung beim Schwimmen werden Filtersubstanzen aus- und abgewaschen. Dies betrifft vor allem die oben aufliegende, am wenigsten gebundene Sonnenschutzmittelschicht, während die im und am Stratum corneum direkt anhaftenden Filter eine vergleichsweise hohe Widerstandsfähigkeit zeigen. Auch aus den Furchen und Falten wird ein Großteil der freien Filter ausgespült, so dass nach dem Schwimmen auf der Hautoberfläche ein zwar ausgedünnter, dafür jedoch vergleichsweise homogener Filterüberzug verbleibt (Abbildung 4c). Durch eine zusätzliche mechanische Belastung, wie sie auch im Rahmen der Handtuchtrocknung auftritt, werden weitere Filter von der Hautoberfläche und, zusammen mit Korneozyten, aus den obersten Lagen des Stratum corneum abgerieben. Es verbleiben die vergleichsweise homogen verteilten Filter im Stratum corneum (Abbildung 4d).

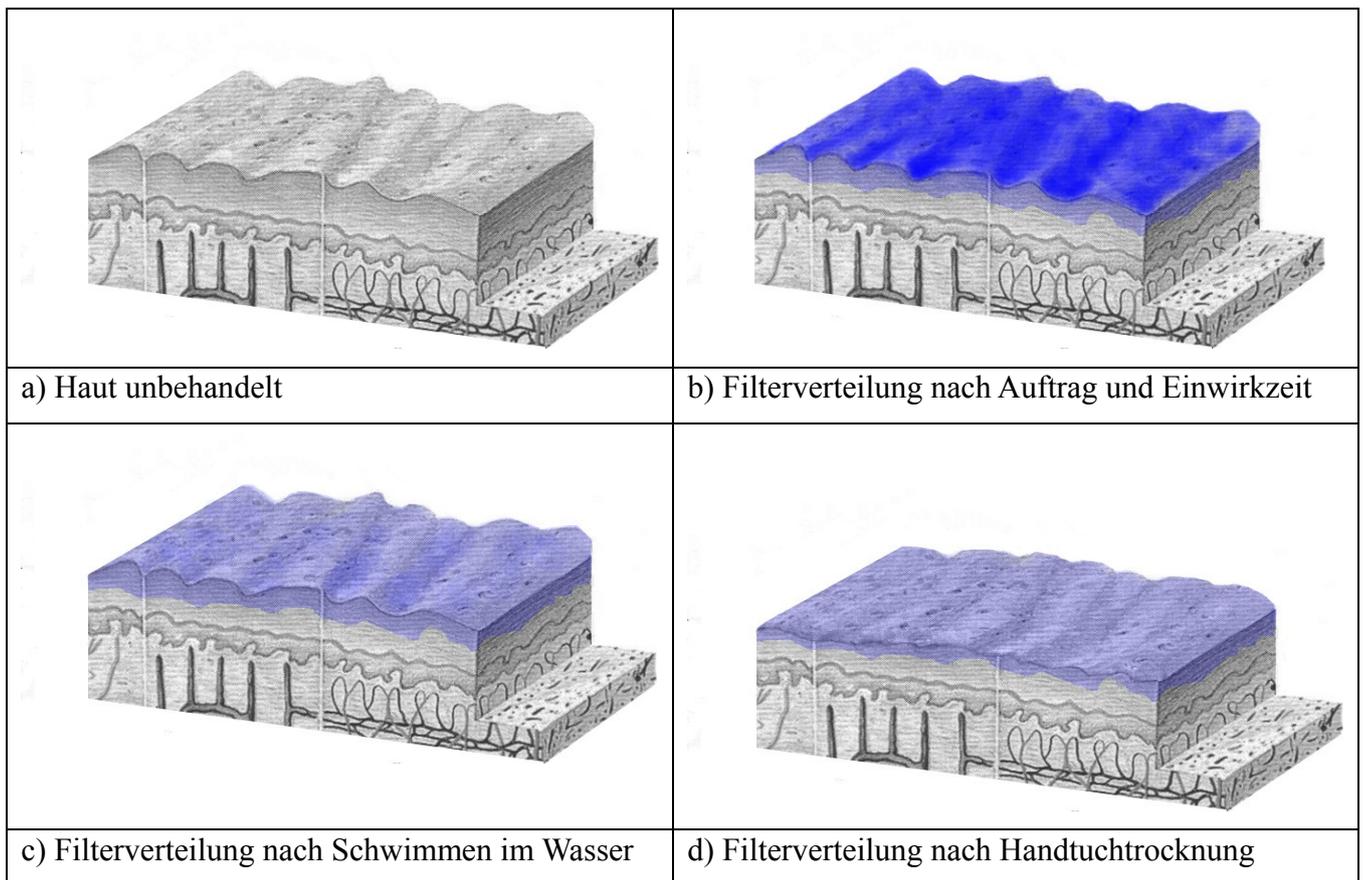


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Sonnenschutzfilterverteilung (blau) auf der Hautoberfläche und in den oberflächlichen Lagen des Stratum corneum (4, bearbeitet).

4.2.4 Empfehlungen

Sonnenschutzmittel und Sonnenschutzwirkung gehen bei Wasserkontakt teilweise verloren. Ein anschließendes Trockenreiben der Haut mit einem Handtuch verursacht einen zusätzlichen mechanischen Abrieb und kann so den verbleibenden UV-Schutz noch einmal deutlich verschlechtern. Die Lufttrocknung der Haut an der Sonne als alternative Trocknungsvariante ohne mechanischen Abrieb kann aufgrund der im vorausgegangenen Abschnitt dargestellten noch offenen Fragen zur Strahlungsfokussierung durch Wassertropfen auf der menschlichen Haut nicht eindeutig empfohlen werden. Durch vorsichtiges Trockentupfen der Haut mit dem Handtuch könnte der mechanische Abrieb bei der Trocknung reduziert werden.

Vor dem Hintergrund des hohen Verlusts an Schutzwirkung beim Schwimmen allerdings kann nur eine schon oft zitierte Empfehlung ausgesprochen werden: Nach dem Baden sollte das verwendete Sonnenschutzmittel - ungeachtet der ausgewiesenen Wasserfestigkeit - erneut aufgetragen werden. Dieses Vorgehen beinhaltet, dass Trocknungsmodalitäten - die Lufttrocknung an der Sonne vorerst noch einmal ausgeklammert - in Art und Intensität nach Belieben selbst bestimmt werden können,

ohne dadurch negative Effekte auf den Sonnenschutz befürchten zu müssen.

4.3 Grenzen der Methodik

In der vorliegenden Studie wurden zwei Einflussgrößen auf die Effektivität von Sonnenschutzmitteln untersucht: die kosmetische Vorbehandlung der Haut und Wasserkontakt im Zusammenspiel mit verschiedenen Trocknungsvarianten.

Es ist zu beachten, dass die Schutzeffektivität der Produkte direkt anhand des jeweiligen Vermögens zur Strahlungsabsorption betrachtet wurde. Dieses spiegelt das physikalische Wirkungsvermögen der Produkte wider und erlaubt technisch sogar die Betrachtung des Filterverhaltens in separaten Wellenlängenbereichen. Es sind jedoch keine unmittelbaren Aussagen bezüglich des zur Produktkennzeichnung verwendeten Sonnenschutzfaktors oder gar einer Dosis-Wirkungs-Relation hinsichtlich zu erwartender Strahlenschäden möglich.

Am Ende der Einwirkungszeit konnten mit der von uns gewählten Abrissanzahl, nach Ausschluss eines Ausreißers, im Mittel je 4/5 der aufgetragenen Filtermenge von der Hautoberfläche und aus den oberen Schichten des Stratum corneum zurückgewonnen werden. Tiefer penetrierte und gebundene Filtersubstanzen, die bereits aufgrund ihrer Lage eine höhere Resistenz gegenüber äußerem mechanischen Abrieb und Auswaschung haben, wurde bei fehlender Relevanz für unsere Fragestellung nicht zurückgewonnen und betrachtet. Die Nichtberücksichtigung dieser in den tieferen Hautschichten gebundenen Sonnenschutzfilter führt schon auf der kosmetisch nicht vorbehandelten Haut zu einem scheinbar überhöhten Verlust an Schutzwirkung durch Wasserkontakt.

Kumulativ wichen unsere Versuchsbedingungen mit Testung der Wasserfestigkeit in einem warmen, mit Desinfektionsmittel versetzten Schwimmbecken bei mittlerer bis intensiver körperlicher Aktivität der Probanden deutlich von anderen in der Literatur beschriebenen Untersuchungen ab. Wir wählten dieses Vorgehen um vor dem Hintergrund des geringen Stichprobenumfangs auftretende Effekte in ihrer Maximalausprägung zu erfassen und somit möglichst deutlich von den interindividuellen Unterschieden abgrenzen zu können.

Sollen im Rahmen weiterer Untersuchungen kleine Unterschiede zur Darstellung gebracht werden,

oder ist zusätzlich die Bestimmung des USPF (Universal Sun Protection Factor) erwünscht, so kann durch Erhöhung der Abrisszahl die gesamte Filtermenge aus dem Stratum corneum zurückgewonnen und durch Einschluss eines größeren Untersuchungskollektivs der Einfluss probandenspezifischer Unterschiede reduziert werden. Die im Rahmen der Grundlagenuntersuchung gewählte, vergleichsweise geringe Stichprobengröße ist bei der Bewertung der Ergebnisse grundsätzlich kritisch im Blick zu behalten. Aufgrund dieser kommen interindividuelle Unterschiede und Ausreißer, beispielsweise Unterschiede in der mit 3 Abrissen erfassten Hauttiefe, deutlich stärker zum Tragen, als es bei Betrachtung des Gesamtkollektivs zu erwarten wäre. Gleichzeitig jedoch sind Ergebnisse mit einer deutlichen Tendenz, die sich trotz dieser interindividuellen Fehler darstellen, mit hoher Wahrscheinlichkeit auch von übergeordneter Bedeutung im Gesamtkollektiv.

Um dem Umstand der hohen Varianz gerecht zu werden, war es notwendig, bei Betrachtung der effektiven UV-Schutzwirkung eine gruppenspezifische Normierung durchzuführen. Das bereits etablierte Verfahren, die Abrisstiefe beim Tape-Stripping anhand der Korneozytenpseudoabsorption einzuordnen und daraus einen Korrekturfaktor zu errechnen (95), stieß bei unserer Untersuchung an seine Grenzen. Ursache hierfür war ein Aufquellen der Korneozyten durch den Wasserkontakt, das mit einer Erhöhung der Korneozytenpseudoabsorption einherging. Die von uns durchgeführte Einordnung der Abrisse in das Hautprofil erfolgte daher wie unter 2.8 beschrieben auf Grundlage der Lösungsmessungen. Während die Korneozytenpseudoabsorption Informationen über die Lage im Stratum corneum und den Quellzustand der Korneozyten liefert, enthält der gAUK Informationen über die Position der Abrisse im Stratum corneum und die darauf vorhandene Filtermenge. Insbesondere nach Wasserkontakt, wenn die Korneozytenpseudoabsorption nicht herangezogen werden kann, stellt die Berechnung eines gruppenspezifischen Normierungsfaktors auf Grundlage des mittleren AUK der Lösungsmessungen eine alternative Möglichkeit zur Einordnung von beim Tape-Stripping gewonnenen Abrissen in das Hautprofil dar.

Soll eine vergleichbare Untersuchung an einem großen Kollektiv durchgeführt werden, kann gegebenenfalls auf diese Normierung verzichtet werden.

In Untersuchungen mit kleiner Probandenzahl ist es darüber hinaus empfehlenswert, interindividuelle Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen durch Mehrfachmessung ein und desselben Probanden unter möglichst standardisierten Bedingungen zu minimieren. Bezogen auf unsere Untersuchung zum Einfluss der kosmetischen Vorbehandlung auf die Wirksamkeit von Sonnenschutzprodukten hätte dies bedeutet, die Probanden je einmal ohne sowie nach

Vorbehandlung mit Lotion und Creme zu untersuchen. Hautbedingte Unterschiede zwischen den einzelnen Probanden, beispielsweise in Abriss- und Resorptionsmenge, hätten sich so gleichmäßig über die drei Vorbehandlungsgruppen verteilt. Bei der Untersuchung der unterschiedlichen Trocknungsvarianten konnten wir dieses Vorgehen zwar umsetzen, die interindividuellen Unterschiede wurden hierbei jedoch nicht durch hautbedingte Einflüsse, sondern das stark unterschiedliche Abtrocknungsverhalten der Probanden dominiert.

4.4 Ausblick

4.4.1 Eine Aufgabe

„All Ding' sind Gift und nichts ohn' Gift; allein die Dosis macht, dass ein Ding kein Gift ist.“

- Paracelsus, dritte defensio, 1538 -

Nämliches gilt auch für die Wirkung von Sonnenstrahlung. Während kurze, moderate Dosen das geistige und körperliche Wohlbefinden steigern und die Vitamin-D-Synthese im Körper unterstützen, führt eine intensive oder lang andauernde Strahlungseinwirkung zu akuter und chronischer Schädigung der Gesundheit. Die effektivste, sicherste, kostengünstigste und einfachste Methode sich hiervor zu schützen war, ist und bleibt die Expositionsvermeidung. Wer daran denkt,

- zwischen 10 und 14 Uhr schattige, anstatt sonnengeflutete Plätze aufzusuchen,
- bei hohem Sonnenstand eine entsprechende Kopfbedeckung, eine Sonnenbrille und schützende Bekleidung zu tragen,
- exponierte Hautareale großzügig mit Sonnencreme hohen Schutzfaktors einzucremen,
- auf intensives Sonnenbaden sowie den Besuch von Sonnenbanken zu verzichten,
- auch auf der Arbeit und bei Freizeitaktivitäten wie Gartenarbeit oder Wintersport den Sonnenstand und -schutz nicht aus den Augen zu verlieren,

reduziert die eigene Sonnenexposition und damit das Risiko Licht- und UV-induzierter Folgeschäden. Erst durch die Kombination mehrerer, voneinander verschiedener Maßnahmen, entsteht eine sinnhafte und wirkungsvolle Schutzstrategie.

Sonnenschutz ist nicht nur eine individuelle Aufgabe. Vor dem Entschluss, Verhaltensweisen zu

verändern, steht die Schaffung eines Bewusstseins für die gesundheitlichen Risiken und Gefahren der Sonnenstrahlung. Hier besteht aus Sicht der Autorin nach wie vor Aufklärungsbedarf. Bereits in Kindergärten und Schulen können Kinder und Jugendliche sowie deren Eltern altersgerecht für das Thema sensibilisiert werden. Massenzugängliche Medien wie Zeitungen, Radio oder Fernsehen sowie Plakate und Informationsbildschirme im öffentlichen Raum bieten ebenfalls etablierte Informations- und Diskussionsplattformen. Zudem können insbesondere mittels spezifischer Aktionen, beispielsweise an Badestränden, auf dem Bau, in Sport- und Gartengeschäften oder Sonnenstudios, einzelne Risikogruppen gezielt angesprochen werden. Die Bedeutung solcher risikogruppenadaptierter Präventionsprogramme wurde jüngst hervorgehoben (96).

Dem Entschluss zur Verhaltensänderung schließt sich die Frage nach der praktischen Umsetzbarkeit an. Dies betrifft sowohl Aspekte der Stadtarchitektur und Arbeitsplatzgestaltung, beispielsweise die ausreichende Verfügbarkeit schattiger Plätze im öffentlichen Raum oder die Bereitstellung von Sonnenschutzmitteln für vorrangig im Freien tätige Arbeitnehmer als auch den einfachen Zugang zu Sonnenschutz und Informationen. Der durch den deutschen Wetterdienst täglich veröffentlichte UV-Index bietet eine gute Orientierung bezüglich der zu erwartenden maximalen UV-Intensität und kann von jedem Einzelnen zur Risikoeinschätzung und gegebenenfalls zur Wahl einer geeigneten Sonnenschutzstrategie herangezogen werden (97).

4.4.2 Test- und Kennzeichnungssystem

Noch verbesserungsfähig ist das aktuelle Test- und Kennzeichnungssystem für handelsübliche Sonnenschutzmittel. Der LSF in seiner derzeitigen Verwendung als universeller Schutzfaktor hat verschiedene Schwächen. Hierzu zählen

- UV-Belastung der Probanden im Rahmen der LSF-Testung,
- ungenügende Informationen zum UVA-Schutz,
- fälschlich hohe LSF durch den Zusatz erythemunterdrückender Additiva.

In Übereinstimmung mit den Vorgaben der COLIPA zur Wirksamkeitstestung von Sonnenschutzmitteln werden Probanden vor und nach dem Auftrag von Sonnenschutzmitteln sowie nach unterschiedlich langen Abwaschprozeduren mit einer erythemauslösenden UV-Dosis bestrahlt. Die Ausbildung eines Erythems als akuter Strahlungsschaden der Haut wird dabei nicht nur in Kauf genommen, sondern ist als Grundlage der LSF-Bestimmung ein primäres Endziel. Die dem

einzelnen Probanden im Rahmen der Untersuchung gesetzten Schäden erschienen bislang tolerabel verglichen mit seiner Lebenszeitexposition und dem Nutzen für die Gesamtbevölkerung – jedoch gilt dies nur, solange keine weniger invasive Methode von vergleichbarer Aussagekraft zur Verfügung steht.

Auf die unzulängliche Abbildung des UVA-Schutzes und des Gesamtlichtschutzes durch den LSF wurde im vorausgegangenen Kapitel bereits hingewiesen. Erst seit 2006 wird den Anwendern europäischer Sonnenschutzprodukte ein minimaler Schutz von 1/3 des gekennzeichneten LSF garantiert (98). Da die Wasserfestigkeit dieser Produkte anhand des LSF-Abfalls nach einer standardisierten Abwaschprozedur bestimmt wird (91), lassen sich hieraus keine Informationen über die Wasserfestigkeit der UVA-Filter ableiten.

Durch die Verwendung verschiedener Additiva in den Formulierungen von Sonnenschutzmitteln ist es möglich, die Ausbildung eines Erythems zu unterdrücken (99). Hierbei muss zwischen verschiedenen Arten von Zusatzstoffen unterschieden werden. Während die Verwendung von Antioxidantien durch den Schutz vor radikalvermittelter Hautschädigung die Wirksamkeit eines Sonnenschutzmittels zu verbessern vermag (80; 81; 100), unterdrücken antiinflammatorische Zusatzstoffe zwar das Symptom der Hautrötung, nicht jedoch die Schädigung selbst (101). Ungeachtet ihres genauen Wirkungsmechanismus führen beide Additivgruppen durch eine verzögerte Erythementstehung zu einer Erhöhung des getesteten und ausgewiesenen LSF.

Mit Hilfe des auf photospektrometrischen Messungen basierenden USPF könnte das Bewertungs- und Kennzeichnungssystem von Sonnenschutzmitteln realitätsnäher und transparenter gestaltet werden. Die Kombination von Tape-Stripping und Photospektrometrie, wie sie auch im Rahmen dieser Untersuchung angewendet wurde, ist ein nichtinvasives Verfahren, das die in vivo Gegebenheiten auf und in der Haut realitätsgetreu abbildet. Es eignet sich sowohl zur primären Wirksamkeitsbeurteilung von Sonnenschutzmitteln im gesamten ultravioletten Spektrum als auch zur Beurteilung ihrer Wasserfestigkeit. Dabei werden die Probanden, anderes als bei der LSF-Bestimmung, keiner Strahlung ausgesetzt.

Um Informationen über die Photostabilität von Sonnenschutzprodukten zu erhalten, könnten die Abrisse in einem separaten Schritt ex vivo bestrahlt werden.

In beiden Punkten – Informationen zu UVA-Absorption und Vermeidung von Strahlungsbelastung – ist die USPF-Methode der Bestimmung des LSF überlegen. Jedoch wird der Einfluss antioxidativer Zusatzstoffe auf die Wirksamkeit von Sonnenschutzprodukten durch den USPF nicht erfasst. Für

eine vollständige Beurteilung sollte daher mithilfe von Elektronenspinresonanz immer auch die antioxidative Kapazität der Produkte in Form des Radikalschutzfaktors (RPF) bestimmt werden.

Neuere Untersuchungen weisen auf die Bildung freier Radikale auch durch Strahlung im visuellen und infraroten Bereich des terrestrischen Spektrums hin (102; 103). Mittels Tape-Stripping und Photospektrometrie könnte die Schutzwirkung einzelner Substanzgruppen auch in diesen Bereichen des Spektrums untersucht und so ein wichtiger Beitrag zu Entwicklung und Evaluierung neuer Schutzstrategien geleistet werden.

5. Zusammenfassung

Seit den 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts hat die UV-Strahlungsintensität am Erdboden im Mittel zugenommen (35). Vor dem Hintergrund eines veränderten Lebens- und Freizeitstils sowie einer gestiegenen Lebenserwartung wird dies ursächlich mit einer anhaltenden Zunahme der Hautkrebsinzidenz in Verbindung gebracht (20; 25; 96). Sonnenschutzmittel sind ein wichtiger Pfeiler der multimodalen Schutzstrategie vor den Kurz- und Langzeitfolgen intermittierender und kontinuierlicher UV-Exposition. Ihre Wirksamkeit ist abhängig von den verwendeten Filtern selbst sowie der Menge, Verteilungshomogenität und Anhaftfähigkeit der Filter auf und im Stratum corneum (48; 52; 53). Bislang unbeantworteter Bestandteil des aktuellen wissenschaftlichen Diskurses und Anlass für diese Studie war die Frage nach dem möglichen Einfluss einer kosmetischen Vorbehandlung auf die in vivo Wirksamkeit von Sonnenschutzprodukten unter Berücksichtigung von Abwascheinflüssen beim Schwimmen und mechanischem Abrieb durch unterschiedliche Trocknungsvarianten der Haut.

Zur Bestimmung von Verteilungshomogenität, Anhaftfähigkeit der Filter und effektivem UV-Schutz von Sonnenschutzmitteln nach einer kosmetischen Vorbehandlung mit Creme oder Lotion wurden 18 Probanden vor und nach dem Schwimmen sowie nach Luft- und Handtuch Trocknung mit der etablierten Kombination aus Tape-Stripping-Verfahren und Photospektrometrie untersucht. Diese minimalinvasive Methode hat sich in einer Vielzahl von Untersuchungen für die Wirksamkeitsbeurteilung von Sonnenschutzmitteln als geeignet erwiesen.(48; 62–66)

Es zeigte sich, dass eine kosmetische Vorbehandlung der Haut keinen Einfluss auf die Filterverteilungshomogenität und den unmittelbar nach Auftrag und Einwirkzeit vorliegenden effektiven UV-Schutz hat. Sie verursachte jedoch eine starke Abnahme der Wasserfestigkeit, mit zusätzlichen Einbußen im UV-Absorptionsgrad von bis zu 15 Prozentpunkten. Wasserkontakt allein reduzierte das Absorptionsvermögen der applizierten Sonnenschutzmittel um etwa 20 Prozentpunkte, maßgeblich durch Verringerung der Filtermenge auf der Oberfläche und in den oberflächennahen Schichten des Stratum corneum.

Es ist anzunehmen, dass eine kosmetische Vorbehandlung das Reservoir des Stratum corneum aufsättigt und somit die suffiziente Anhaftung von Sonnenschutzfiltern auf und in der Haut verhindert. Als Folge sind die Filter weniger resistent gegenüber äußeren Einflussfaktoren wie Abwaschung und Abrieb. Von einem Auftrag von Cremes und Lotionen vor der Verwendung von

Sonnenschutzmitteln muss daher abgeraten werden.

Chemische Interaktionen zwischen den Formulierungen unterschiedlicher Produkte können so zudem vermieden werden. Eine Alternative zur Optimierung der Hautschutzwirkung stellt die Benutzung antioxidantienreicher Sonnencremes und After-Sun-Produkte dar (80; 81).

Das Trockenreiben der Haut mit einem Handtuch verursacht einen zusätzlichen Verlust an UV-Schutzwirkung. In unserer Untersuchung verringerte die probandenspezifische Abtrocknung der Haut mit einem Handtuch die vertikal gebundene Filtermenge und UV-Absorption hoch signifikant im Vergleich zu Lufttrocknung. Das jeweilige Ausmaß des mechanischen Filterabriebs und die damit verbundene Verringerung der UV-Schutzwirkung variierte aufgrund interindividuell unterschiedlichen Abtrocknungsverhaltens jedoch stark. Aufgrund bislang noch ungeklärter Fragen zur Strahlungsfokussierung durch Wassertropfen auf der Hautoberfläche kann die Lufttrocknung nicht als alternative Trocknungsvariante empfohlen werden.

Zum Erhalt einer suffizienten Sonnenschutzwirkung ist unbedingt die zeitnahe, großzügige Reapplikation der verwendeten Sonnenschutzprodukte anzuraten.

Sonnenschutz ist unter gesundheitlichen Gesichtspunkten stets als eine multimodale Gesamtstrategie zu verstehen. Erst durch die Kombination von verschiedenen expositionsminimierenden Verhaltensweisen entsteht ein wirksamer Schutz vor den Folgen akuter und chronischer UV-Einwirkung. In diesem Sinne gilt es primär eine übermäßige Sonnenexposition zu vermeiden. Ist dies nicht möglich sollten Sonnenschutzprodukte möglichst hoher Schutzintensität in reichhaltiger Dosierung direkt auf die nicht vorbehandelte Haut aufgetragen und regelmäßig erneuert werden.

Im Umgang mit dem Thema Sonne und Sonnenschutz stehen wir nicht nur vor eine individuellen, sondern aufgrund der hohen gesundheitlicher Relevanz vor eine gesamtgesellschaftlichen Verantwortung, die sich in breitenwirksamer Aufklärung und Transparenz der Test- und Kennzeichnungssysteme ebenso äußern sollte wie in stadtplanerischen und geopolitischen Interventionen.

6. Literaturverzeichnis

1. Lautenschlager S, Wulf HC, Pittelkow MR. Photoprotection. *Lancet* 2007 Aug;370(9586):528-537.
2. Wang SQ, Balagula Y, Osterwalder U. Photoprotection: a review of the current and future technologies. *Dermatol Ther* 2010 Jan;23(1):31-47.
3. Degreen, Quilbert. Sonne Strahlungsintensitaet.svg . Wikipedia 2007;[zitiert 2011 Okt 4] Available from:
http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Sonne_Strahlungsintensitaet.svg&filetimestamp=20100509202305
4. mit freundlicher Genehmigung nach Paulsen F, Waschke J. Abbildung 55 Haut. In: Sobotta Atlas der Anatomie des Menschen. München: Elsevier GmbH, Urban & Fischer, 2010 p. 31.
5. MesserWoland. DNA structure and bases.svg . 2006;[zitiert 2011 Okt 4] Available from:
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:DNA_structure_and_bases.svg?uselang=de
6. Golder W. Hippokrates: Die Schriften. In: Hippokrates und das Corpus Hippocraticum: eine Einführung für Philologen und Mediziner. Würzburg: Königshausen & Neumann; 2007 p. 27-105.
7. Navarini AA, Trüeb RM. Psoriasis. *Ther Umsch* 2010 Apr;67(4):153-165.
8. Schmid-Grendelmeier P, Ballmer-Weber BK. Atopic dermatitis - current insights into path physiology and management. *Ther Umsch* 2010 Apr;67(4):175-185.
9. Khaled A, Zeglaoui F, Ezzine N, El Fekih N, Fazaa B, Kamoun MR. What is new in the treatment of vitiligo. *Tunis Med* 2008 Apr;86(4):307-311.
10. Lambert GW, Reid C, Kaye DM, Jennings GL, Esler MD. Effect of sunlight and season on serotonin turnover in the brain. *Lancet* 2002 Dez;360(9348):1840-1842.
11. Walch JM, Rabin BS, Day R, Williams JN, Choi K, Kang JD. The effect of sunlight on postoperative analgesic medication use: a prospective study of patients undergoing spinal surgery. *Psychosom Med* 2005 Feb;67(1):156-163.

12. Howland RH. An overview of seasonal affective disorder and its treatment options. *Phys Sportsmed* 2009 Dez;37(4):104-115.
13. Genuis SJ. Keeping your sunny side up. How sunlight affects health and well-being. *Can Fam Physician* 2006 Apr;52:422-423, 429-431.
14. Alonso M, Finn EJ. Wechselwirkung Elektro-magnetischer Strahlung mit Materie. In: *Physik*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag; 2000 p. 582-611.
15. Peak JG, Peak MJ. Ultraviolet light induces double-strand breaks in DNA of cultured human P3 cells as measured by neutral filter elution. *Photochem. Photobiol* 1990 Aug;52(2):387-393.
16. Boudaïffa B, Cloutier P, Hunting D, Huels MA, Sanche L. Cross sections for low-energy (10-50 eV) electron damage to DNA. *Radiat. Res* 2002 März;157(3):227-234.
17. Boudaïffa B, Cloutier P, Hunting D, Huels MA, Sanche L. Resonant formation of DNA strand breaks by low-energy (3 to 20 eV) electrons. *Science* 2000 März;287(5458):1658-1660.
18. Panajotovic R, Martin F, Cloutier P, Hunting D, Sanche L. Effective cross sections for production of single-strand breaks in plasmid DNA by 0.1 to 4.7 eV electrons. *Radiat. Res* 2006 Apr;165(4):452-459.
19. El Ghissassi F, Baan R, Straif K, Grosse Y, Secretan B, Bouvard V, Benbrahim-Tallaa L, Guha N, Freeman C, Galichet L, Cogliano V. A review of human carcinogens-Part D: radiation. *The Lancet Oncology* 2009 Aug;10(8):751-752.
20. Council on Environmental Health and Section on Dermatology. Ultraviolet Radiation: A Hazard to Children and Adolescents. *Pediatrics* 2011 März;127(3):588-597.
21. Rigel DS. Cutaneous ultraviolet exposure and its relationship to the development of skin cancer. *J. Am. Acad. Dermatol* 2008 Mai;58(5 Suppl 2):S129-132.
22. Gilchrest BA, Eller MS, Geller AC, Yaar M. The pathogenesis of melanoma induced by ultraviolet radiation. *N. Engl. J. Med* 1999 Apr;340(17):1341-1348.
23. Scharffetter-Kochanek K, Wlaschek M, Brenneisen P, Schauen M, Blandschun R, Wenk J. UV-induced reactive oxygen species in photocarcinogenesis and photoaging. *Biol. Chem* 1997 Nov;378(11):1247-1257.
24. Herzog B, Wehrle M, Quass K. Photostability of UV absorber systems in sunscreens.

Photochem. Photobiol 2009 Aug;85(4):869-878.

25. World Health Organization. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Volume 55: Solar and Ultraviolet Radiation . 2007;[zitiert 2011 März 31] Available from: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol55/volume55.pdf>
26. de Gruijl FR. Action spectrum for photocarcinogenesis. *Recent Results Cancer Res* 1995;139:21-30.
27. Burke KE. Photoaging: the role of oxidative stress. *G Ital Dermatol Venereol* 2010 Aug;145(4):445-459.
28. Wenk J, Brenneisen P, Meewes C, Wlaschek M, Peters T, Blaudschun R, Ma W, Kuhr L, Schneider L, Scharffetter-Kochanek K. UV-induced oxidative stress and photoaging. *Curr. Probl. Dermatol* 2001;29:83-94.
29. Cooper KD, Oberhelman L, Hamilton TA, Baadsgaard O, Terhune M, LeVee G, Anderson T, Koren H. UV exposure reduces immunization rates and promotes tolerance to epicutaneous antigens in humans: relationship to dose, CD1a-DR+ epidermal macrophage induction, and Langerhans cell depletion. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A* 1992 Sep;89(18):8497-8501.
30. Shreedhar VK, Pride MW, Sun Y, Kripke ML, Strickland FM. Origin and characteristics of ultraviolet-B radiation-induced suppressor T lymphocytes. *J. Immunol* 1998 Aug;161(3):1327-1335.
31. Lavker RM, Gerberick GF, Veres D, Irwin CJ, Kaidbey KH. Cumulative effects from repeated exposures to suberythemal doses of UVB and UVA in human skin. *J. Am. Acad. Dermatol* 1995 Jan;32(1):53-62.
32. Zrenner E. Light-induced damage to the eye. *Fortschr Ophthalmol* 1990;87 Suppl:S41-51.
33. Glickman RD. Phototoxicity to the retina: mechanisms of damage. *Int. J. Toxicol* 2002 Dez;21(6):473-490.
34. Norval M, Lucas RM, Cullen AP, de Gruijl FR, Longstreth J, Takizawa Y, van der Leun JC. The human health effects of ozone depletion and interactions with climate change. *Photochem. Photobiol. Sci* 2011 Feb;10(2):199-225.
35. Köpke P, Reuder J, Schween J. UV-Strahlung - gestern, heute und morgen. In: *Erhöhte UV-*

- Strahlung: Folgen und Maßnahmen. München: Verlag Dr. F. Pfeil; 2004 p. 19-28.
36. Winkler P, Trepte S. Einfluss veränderter Bewölkung auf die UV-Strahlung. In: Erhöhte UV-Strahlung: Folgen und Maßnahmen. München: Verlag Dr. F. Pfeil; 2004 p. 31-38.
 37. Cokkinides V, Weinstock M, Glanz K, Albano J, Ward E, Thun M. Trends in sunburns, sun protection practices, and attitudes toward sun exposure protection and tanning among US adolescents, 1998-2004. *Pediatrics* 2006 Sep;118(3):853-864.
 38. Hall HI, May DS, Lew RA, Koh HK, Nadel M. Sun protection behaviors of the U.S. white population. *Prev Med* 1997 Aug;26(4):401-407.
 39. Furter S, Jasch K. Aufbau und Funktionen der Haut. In: *Crashkurs Dermatologie*. München: Elsevier GmbH, Urban & Fischer; 2007 p. 1-9.
 40. Terhorst D. Grundlagen. In: *Basics Dermatologie*. München: Elsevier, Urban&FischerVerlag; 2005 p. 2-11.
 41. Tyrrell RM. Ultraviolet radiation and free radical damage to skin. *Biochem. Soc. Symp* 1995;61:47-53.
 42. Knuschke P, Unverricht I, Thiele A, Janßen M, Ott G, Aschoff R, Koch E, Krüger A, Cuevas M. Untersuchung des Eigenschutzes der Haut gegen solare UV-Strahlung bei Arbeitnehmern im Freien. 1. Aufl. Dortmund/Berlin/Dresden: Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin - BAuA; 2010.
 43. Wolf P. UV Filters. State of the art. *Hautarzt* 2009 Apr;60(4):285-293.
 44. Forestier S. Rationale for sunscreen development. *J. Am. Acad. Dermatol* 2008 Mai;58(5 Suppl 2):S133-138.
 45. Zhao J, Bowman L, Zhang X, Vallyathan V, Young S-H, Castranova V, Ding M. Titanium dioxide (TiO₂) nanoparticles induce JB6 cell apoptosis through activation of the caspase-8/Bid and mitochondrial pathways. *J. Toxicol. Environ. Health Part A* 2009;72(19):1141-1149.
 46. Lademann J, Schanzer S, Jacobi U, Schaefer H, Pflücker F, Driller H, Beck J, Meinke M, Roggan A, Sterry W. Synergy effects between organic and inorganic UV filters in sunscreens. *J Biomed Opt* 2005 Feb;10(1):14008.
 47. COLIPA. International sun protection factor (SPF) test method . 2006;[zitiert 2011 Apr 13]

Available from: <http://www.colipa.eu/downloads/86.html>

48. Lademann J, Rudolph A, Jacobi U, Weigmann H-J, Schaefer H, Sterry W, Meinke M. Influence of nonhomogeneous distribution of topically applied UV filters on sun protection factors. *J Biomed Opt* 2004 Dez;9(6):1358-1362.
49. Jacobi U, Weigmann H-J, Baumann M, Reiche A-I, Sterry W, Lademann J. Lateral spreading of topically applied UV filter substances investigated by tape stripping. *Skin Pharmacol Physiol* 2004 Feb;17(1):17-22.
50. Diffey B. Sunscreens: expectation and realization. *Photodermatol Photoimmunol Photomed* 2009 Okt;25(5):233-236.
51. Diffey BL. Sunscreens and UVA protection: a major issue of minor importance. *Photochem. Photobiol* 2001 Juli;74(1):61-63.
52. Bimczok R, Gers-Barlag H, Mundt C, Klette E, Bielfeldt S, Rudolph T, Pflucker F, Heinrich U, Tronnier H, Johncock W, Klebon B, Westenfelder H, Flosser-Muller H, Jenni K, Kockott D, Lademann J, Herzog B, Rohr M. Influence of applied quantity of sunscreen products on the sun protection factor--a multicenter study organized by the DGK Task Force Sun Protection. *Skin Pharmacol Physiol* 2007;20(1):57-64.
53. Faurschou A, Wulf HC. The relation between sun protection factor and amount of sunscreen applied in vivo. *Br. J. Dermatol* 2007 Apr;156(4):716-719.
54. Teichmann A, Pissavini M, Ferrero L, Dehais A, Zastrow L, Richter H, Lademann J. Investigation of the homogeneity of the distribution of sunscreen formulations on the human skin: characterization and comparison of two different methods. *J Biomed Opt* 2006 Dez;11(6):064005.
55. Rhodes L, Diffey B. Quantitative assessment of sunscreen application technique by in vivo fluorescence spectroscopy. *Journal of the Society of Cosmetic Chemists* 1996;47(2):109-115.
56. Diffey BL. Chapter 27 Sunscreens: use and misuse . In: *Sun Protection in Man*. Elsevier; 2001 p. 521-534. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B8G5F-4NMTGVM-13/2/5d56f0f27e9d128350a42765c048b6fb>
57. Wright MW, Wright ST, Wagner RF. Mechanisms of sunscreen failure. *J. Am. Acad. Dermatol* 2001 Mai;44(5):781-784.

58. Weigmann H-J, Jacobi U, Antoniou C, Tsirikas GN, Wendel V, Rapp C, Gers-Barlag H, Sterry W, Lademann J. Determination of penetration profiles of topically applied substances by means of tape stripping and optical spectroscopy: UV filter substance in sunscreens. *J Biomed Opt* 2005 Feb;10(1):14009.
59. Lewinski. Ueber die Furchen und Falten der Haut. *Archiv f. pathol. Anat.* 1883 Apr;92(1):135-151.
60. Fitzpatrick TB. The validity and practicality of sun-reactive skin types I through VI. *Arch Dermatol* 1988 Juni;124(6):869-871.
61. Weltärztebund. Ethische Grundsätze für die medizinische Forschung am Menschen, Deklaration von Helsinki. In: *Handbuch der Deklarationen, Erklärungen und Entschliessungen*. Köln: Deutscher-Ärzte-Verlag; 2008 p. 151-157. Available from: <http://www.bundesaerztekammer.de/downloads/handbuchwma.pdf>
62. Cambon M, Issachar N, Castelli D, Robert C. An in vivo method to assess the photostability of UV filters in a sunscreen. *J Cosmet Sci* 2001 Feb;52(1):1-11.
63. Stokes RP, Diffey BL. A novel ex vivo technique to assess the sand/rub resistance of sunscreen products. *Int J Cosmet Sci* 2000 Okt;22(5):329-334.
64. Stokes RP, Diffey BL, Dawson LC, Barton SP. A novel in vitro technique for measuring the water resistance of sunscreens. *Int J Cosmet Sci* 1998 Aug;20(4):235-240.
65. Weigmann H-J, Schanzer S, Teichmann A, Durat F, Antoniou C, Schaefer H, Sterry W, Lademann J. Ex-vivo spectroscopic quantification of sunscreen efficacy: proposal of a universal sun protection factor. *J Biomed Opt* 2007 Aug;12(4):044013.
66. Golmohammadzadeh S, Jaafarixx MR, Khalili N. Evaluation of liposomal and conventional formulations of octyl methoxycinnamate on human percutaneous absorption using the stripping method. *J Cosmet Sci* 2008 Okt;59(5):385-398.
67. Lademann J, Jacobi U, Surber C, Weigmann H-J, Fluhr JW. The tape stripping procedure--evaluation of some critical parameters. *Eur J Pharm Biopharm* 2009 Juni;72(2):317-323.
68. Handa O, Kokura S, Adachi S, Takagi T, Naito Y, Tanigawa T, Yoshida N, Yoshikawa T. Methylparaben potentiates UV-induced damage of skin keratinocytes. *Toxicology* 2006 Okt;227(1-2):62-72.

69. Lademann J, Jacobi U, Richter H, Otberg N, Weigmann H, Meffert H, Schaefer H, Blume-Peytavi U, Sterry W. In vivo Determination of UV-Photons Entering into Human Skin. *Laser Physics* 2004;14(2):234-237.
70. Tuchin V. Light Scattering Methods and Instruments for Medical Diagnosis. In: *Tissue Optics*. Bellingham: SPIE Publications; 2000 p. 449-488.
71. Mourant JR, Fuselier T, Boyer J, Johnson TM, Bigio IJ. Predictions and measurements of scattering and absorption over broad wavelength ranges in tissue phantoms. *Appl. Opt.* 1997 Feb;36(4):949-957.
72. Jacobi U, Schanzer S, Weigmann H-J, Patzelt A, Vergou T, Sterry W, Lademann J. Pathways of Lateral Spreading. *Skin Pharmacol Physiol* 2011 März;24(5):231-237.
73. Brown M. The sun protection factor: Test methods and legal aspects. *SÖFW-journal* 2002;128(6):10-18.
74. Sayre RM, Agin PP, LeVee GJ, Marlowe E. A comparison of in vivo and in vitro testing of sunscreens. *Photochem. Photobiol* 1979 März;29(3):559-566.
75. Schulz J, Hohenberg H, Pflücker F, Gärtner E, Will T, Pfeiffer S, Wepf R, Wendel V, Gers-Barlag H, Wittern K-P. Distribution of sunscreens on skin. *Adv. Drug Deliv. Rev* 2002 Nov;54 Suppl 1:S157-163.
76. Ferrero L, Pissavini M, Marguerie S, Zastrow L. Efficiency of a continuous height distribution model of sunscreen film geometry to predict a realistic sun protection factor. *J Cosmet Sci* 2003 Okt;54(5):463-481.
77. Schalka S, dos Reis VMS, Cucé LC. The influence of the amount of sunscreen applied and its sun protection factor (SPF): evaluation of two sunscreens including the same ingredients at different concentrations. *Photodermatol Photoimmunol Photomed* 2009 Aug;25(4):175-180.
78. Glogau RG. Aesthetic and anatomic analysis of the aging skin. *Semin Cutan Med Surg* 1996 Sep;15(3):134-138.
79. Burke KE, Burford RG, Combs GF Jr, French IW, Skeffington DR. The effect of topical L-selenomethionine on minimal erythema dose of ultraviolet irradiation in humans. *Photodermatol Photoimmunol Photomed* 1992 Apr;9(2):52-57.

80. Oresajo C, Yatskayer M, Galdi A, Foltis P, Pillai S. Complementary effects of antioxidants and sunscreens in reducing UV-induced skin damage as demonstrated by skin biomarker expression. *J Cosmet Laser Ther* 2010 Juni;12(3):157-162.
81. Matsui MS, Hsia A, Miller JD, Hanneman K, Scull H, Cooper KD, Baron E. Non-sunscreen photoprotection: antioxidants add value to a sunscreen. *J. Investig. Dermatol. Symp. Proc* 2009 Aug;14(1):56-59.
82. Tuchin VV, Bashkatov AN, Genina é. A, Sinichkin YP, Lakodina NA. In vivo investigation of the immersion-liquid-induced human skin clearing dynamics. *Tech. Phys. Lett.* 2001 Juni;27(6):489-490.
83. Meglinskii IV, Bashkatov AN, Genina EA, Churmakov DY, Tuchin VV. Study of the possibility of increasing the probing depth by the method of reflection confocal microscopy upon immersion clearing of near-surface human skin layers. *Quantum Electron.* 2002 Okt;32(10):875-882.
84. Wang R, Tuchin V. Enhance light penetration in tissue for high resolution optical imaging techniques by the use of biocompatible chemical agents. *Journal of X-Ray Science and Technology* 2002;10(3-4):167-176.
85. Schaefer H, Redelmeier TE. Relationship between the Structure of Compounds and Their Diffusion across Membranes. In: *Skin Barrier: Principles of Percutaneous Absorption*. Basel: Karger; 1996 p. 87-117.
86. Loth H. Grundlagen des intra- und transdermalen Transports von Arzneistoffen II. *Acta Pharm. Technol.* 1987;33(1):3-14.
87. Loth H. Grundlagen des intra- und transdermalen Transports von Arzneistoffen I. *Acta Pharm. Technol.* 1986;32(3):108-114.
88. Fairhurst D, Mitchnick MA. Particulate Sun Blocks: General Principles. In: *Sunscreens: Development, Evaluation and Regulatory Aspects*. New York: Marcel Dekker Inc; 1997 p. 313-352.
89. COLIPA. Empfehlung Nr. 16: Angabe der Wasserfestigkeit von Sonnenschutzmitteln . 2006;[zitiert 2011 März 31] Available from: <http://www.ikw.org/pdf/broschueren/34b.pdf>
90. Morganti P, Fabrizi G. New data on skin photoprotection. *Int J Cosmet Sci* 2000

Aug;22(4):305-312.

91. COLIPA-Empfehlung Nr.16. Angabe der Wasserfestigkeit von Sonnenschutzmitteln (2006) . [zitiert 2011 März 31] Available from: <http://www.ikw.org/pdf/broschueren/34b.pdf>
92. Bodekaer M, Faurschou A, Philipsen PA, Wulf HC. Sun protection factor persistence during a day with physical activity and bathing. *Photodermatol Photoimmunol Photomed* 2008 Dez;24(6):296-300.
93. Beyer DM, Faurschou A, Philipsen PA, Haedersdal M, Wulf HC. Sun protection factor persistence on human skin during a day without physical activity or ultraviolet exposure. *Photodermatol Photoimmunol Photomed* 2010 Feb;26(1):22-27.
94. Egri Á, Horváth Á, Kriska G, Horváth G. Optics of sunlit water drops on leaves: conditions under which sunburn is possible. *New Phytologist* 2010 März;185(4):979-987.
95. Jacobi U, Weigmann H-J, Ulrich J, Sterry W, Lademann J. Estimation of the relative stratum corneum amount removed by tape stripping. *Skin Res Technol* 2005 Mai;11(2):91-96.
96. Maier H, Schmalwieser AW. Sunscreens and occupation: the Austrian experience. *Photochem. Photobiol. Sci.* 2010;9(4):510-515.
97. Deutscher Wetterdienst. Wetter und Klima: UV-Index Vorhersage . [zitiert 2011 Apr 1] Available from:
http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_windowLabel=T14602749251144839541923&_urlType=action&_pageLabel=_dwdwww_wetter_warnungen_biowetter
98. Kommission der Europäischen Gemeinschaften. Empfehlung der Kommission vom 22. September 2006 über die Wirksamkeit von Sonnenschutzmitteln und diesbezügliche Herstellerangaben . 2006;[zitiert 2011 Juni 5] Available from: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:265:0039:0043:DE:PDF>
99. Weigmann H-J, Schanzer S, Antoniou C, Sterry W, Lademann J. Influence of the absorption behavior of sunscreens in the short-wavelength UV range (UVB) and the long-wavelength UV range (UVA) on the relation of the UVB absorption to sun protection factor. *J Biomed Opt* 2010 Okt;15(5):055008.
100. Wu Y, Matsui MS, Chen JZS, Jin X, Shu C-M, Jin G-Y, Dong G-H, Wang Y-K, Gao X-H,

Chen H-D, Li Y-H. Antioxidants add protection to a broad-spectrum sunscreen. *Clin. Exp. Dermatol* 2011 März;36(2):178-187.

101. Kemeny L, Koreck A, Kis K, Kenderessy-Szabo A, Bodai L, Cimpean A, Paunescu V, Raica M, Ghyczy M. Endogenous phospholipid metabolite containing topical product inhibits ultraviolet light-induced inflammation and DNA damage in human skin. *Skin Pharmacol Physiol* 2007;20(3):155-161.
102. Zastrow L, Groth N, Klein F, Kockott D, Lademann J, Renneberg R, Ferrero L. The missing link - light-induced (280-1,600 nm) free radical formation in human skin. *Skin Pharmacol Physiol* 2009;22(1):31-44.
103. Darvin ME, Haag S, Meinke M, Zastrow L, Sterry W, Lademann J. Radical production by infrared A irradiation in human tissue. *Skin Pharmacol Physiol* 2010;23(1):40-46.

Danksagung

Als ich vor beinahe zwei Jahren zum ersten mal an die Sekretariatstür der Hautphysiologie klopfte, um mich für eine Doktorarbeit in der Forschungsgruppe vorzustellen, wusste ich nicht mehr über Lichtschutz als die meisten anderen Studenten. Ich verwendete Sonnenschutzmittel gelegentlich, vor allem dann, wenn ich in den Urlaub fuhr und fühlte mich durch die Angaben auf der Verpackung ausreichend vor den gesundheitlichen Gefahren der Sonnenstrahlung geschützt. Insbesondere, da ich mich mit meinen LSF 20-Präparaten im Badeurlaub ohnehin schon gegen stetige Bemerkungen wie „aber damit wirst du ja nie richtig braun“ zu behaupteten hatte.

Zwischen damals und dem heutigen Tag, an dem ich die vorliegende Arbeit abschließe, liegen unzählige Stunden der Auseinandersetzung, Literaturrecherche, der Untersuchungen, Erfahrungen und Diskussionen. Viele Menschen haben auf unterschiedliche und einzigartige Weise ihren Anteil hieran und ihnen Allen gilt mein aufrichtiger Dank.

Jede Antwort beginnt mit einer Frage.

Zuallererst möchte ich natürlich Ihnen ganz herzlich danken, Herr Professor Lademann. Sie haben mir zuerst den Blick für das wichtige und interessante Themengebiet des Lichtschutzes geöffnet und mir den Raum gelassen, eigene Wege zu gehen. Ohne Ihre Unterstützung, Ihren Rat, Ihre Kritik, Ihre Geduld und Ihren Ansporn wäre diese Arbeit nie zu dem geworden, was sie heute ist.

Auch ohne das langjährige persönliche Engagement von Herrn Dr. Weigmann sowie seine methodischen und inhaltlichen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Sonnenschutzes wäre diese Studie nicht möglich gewesen. Herr Dr. Weigmann, haben Sie vielen Dank für die fachlichen Diskussionen und Anregungen.

Jedes Experiment beginnt mit einer Messung.

Ich erinnere mich an den ersten Tag im Labor, an das Surren der Rechner und der Messgeräte und an Sabine Schanzer, die mir schneller als der Stift übers Papier schnellen kann, alle wichtigen Abläufe und Techniken erklärte und mir auch später noch oft mit gutem Rat zu Seite stand. An dich und an die ganze Arbeitsgruppe: danke für euren Zuspruch, eure konstruktive Kritik und die aufmunternde Unterstützung im Kampf gegen die Tücken der Technik (S. Schanzer) und die Regeln

der Kommasetzung (S. Grenz). Vieles wäre frustrierender gewesen ohne euch.

Keine Messung ohne Probanden. An dieser Stelle möchte ich daher den 18 Freunden, Verwandten und Bekannten danken, die sich ohne Zögern bereit erklärt haben, an dieser Studie teilzunehmen – obwohl die beworbene Schwimmphase mit 15 Minuten Dauer nur einen sehr kleinen Teil der umfangreichen Experimente ausmachte. In eurer Gesellschaft vergingen die Stunden wie im Flug.

Jeder Text beginnt mit einem Wort.

Aus einem Wort wurden Sätze, Absätze, Kapitel und am Ende eine ganze Arbeit. Viele Seiten die geschrieben und auch gelesen sein wollen. Ich danke meinen Eltern dafür, dass sie mir während ich die Ergebnisse der Untersuchungen zu Papier zu bringen suchte, den Rücken frei von anderen Belastungen hielten, und meinen Freunden, die dafür Sorge trugen, dass ich nicht gänzlich hinter dem Rechner verschwand. Björn, dir danke ich für den Statistikcrashkurs zwischen vielen Gläsern heißer Schokolade und dafür, dass du es mir nicht übel genommen hast, dass ich dich nachts um halb elf mit Fragen zu Gebundenheit von Stichproben aus dem Schlaf geklingelt habe. Ein besonderes Dankeschön gilt auch all meinen Korrekturlesern, die mit ihren hilfreichen Kommentaren den Schaffensprozess dieser Arbeit bereicherten. Für ihre fachliche Auseinandersetzung gebührt dieser Dank vor allem Herrn Professor Lademann, Herrn Dr. Weigmann und Frau Dr. Meinke. Steffen, von allen Lesern hast du, dicht gefolgt von Sabine Grenz, zu wohl die meisten Fassungen meiner Arbeit zu Gesicht bekommen, danke dass du es dennoch nicht müde geworden bist, mir und meinen Texten mit wachem Auge und interessiertem Geist gegenüber zu treten. Ich wünsche dieser Arbeit Leser wie dich.

Zuletzt möchte ich allen Menschen in meinem Umfeld danken, die geduldig und mit einem Lächeln meine bisweilen missionarischen Versuche, sie zum konsequenten Sonnenschutz zu bekehren, ertragen. Ihr wisst, ich will nur euer Bestes.

Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

Erklärung

Ich, Franziska Kluschke erkläre,

dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „UV-Schutz im Fokus - über den Einfluss von kosmetischer Vorbehandlung und Trocknungsverhalten auf die Effektivität von Sonnenschutzprodukten“ selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe.

Datum

Unterschrift