

## UV-Strahlung und ihre vielseitigen Einsatzmöglichkeiten

**Fraunhofer Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung**

**Innovationshub „Smarte UV-Systeme“**

Am Vogelherd 90  
98693 Ilmenau

**Ansprechpartner:**

Thomas Westerhoff  
Telefon +49 3677 461-107  
[suvs@iosb-ast.fraunhofer.de](mailto:suvs@iosb-ast.fraunhofer.de)  
[www.iosb-ast.fraunhofer.de](http://www.iosb-ast.fraunhofer.de)

### Ein Spektrum voller Möglichkeiten

UV-Strahlung ist ein Bereich der elektromagnetischen Strahlung, der sich direkt an den violetten Bereich des sichtbaren Lichts anschließt. Da dieser für den Menschen nicht mehr sichtbar ist, gilt die oft verwendete Bezeichnung „UV-Licht“ als wissenschaftlich nicht korrekt.

Dieser Terminus findet jedoch im allgemeinen Sprachgebrauch Verwendung, da der Begriff „Strahlung“ negativ beladen ist und mit Gefahren assoziiert wird.

UV-Strahlung beschreibt also elektromagnetische Strahlung im optischen Frequenzbereich mit Wellenlängen im Bereich von 400 nm (manche Quellen auch erst ab 390 nm) bis hinunter zu 100 nm und wird in drei Hauptbereiche eingeteilt. Direkt an das sichtbare Licht schließt der UVA-Bereich mit Wellenlängen von 400 nm – 315 nm an. Ihm folgt zwischen 315 nm – 280 nm der UVB-Bereich und unterhalb von 280 nm spricht man von UVC-Strahlung. Bei Wellenlängen < 230 nm hat sich seit kurzem der Begriff Fern-UV (engl. Far-UV) etabliert. Bei Wellenlängen < 120 nm spricht man von Extrem-UV. Mit kleiner werdender Wellenlänge steigt die Energie der Photonen. Extrem-UV hat also eine deutlich höhere Photonenenergie als UVA-Strahlung.

UV-Strahlung ist ein Hauptbestandteil des Sonnenlichtes, von welchem jedoch der kurzwellige Bereich (UVC) durch die Ozonschicht in der Erdatmosphäre herausgefiltert wird und somit nicht bis zum Boden vordringen kann. Das weite Spektrum der UV-Strahlung mit sehr unterschiedlichen Photonenenergien

ermöglicht vielfältigste Anwendungsmöglichkeiten, von denen einige im Folgenden erläutert werden sollen

### Biologische Anwendungen

#### Desinfektion und Virusinaktivierung

Ultraviolette Strahlung, besonders im UVC-Bereich, wird zur Desinfektion von Wasser, Luft und Oberflächen eingesetzt. Aufgrund der Geschwindigkeit der Reaktion – Mikroorganismen werden bei hinreichender Dosis (Fluenz) innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde inaktiviert – kann UVC-Strahlung nicht nur zur Desinfektion von Oberflächen, sondern auch zur Desinfektion von Wasser, Luft oder in Klimakanälen geführten Luftströmen eingesetzt werden. Vor einigen Jahren vor dem heute üblichen und massiven Einsatz von chemischen Desinfektionsmitteln waren daher in Krankenhäusern im Dauerbetrieb arbeitende schwache Ultraviolettstrahler üblich, um die vorhandene Erregerkonzentrationen möglichst gering zu halten. Die zunehmende Antibiotika-Resistenz krankenhausspezifischer Keime dürfte



dabei in naher Zukunft zu einer Wiederkehr der Technik führen, da sich bei der UV-Desinfektion keine mutations-bedingten Resistenzen entwickeln können. Zudem werden moderne Strahlungsquellen wie UVC-LEDs immer leistungsfähiger. Eine heute bereits recht verbreitete Methode ist die Trinkwasserdesinfektion mit UVC-Strahlung. Dabei wird die Erregermenge im Wasser zuverlässig und in Abhängigkeit zur Dosis / Fluenz stark reduziert. Eine Zugabe von Chemikalien ist grundsätzlich nicht erforderlich. Gerade chlorresistente Krankheitserreger wie Kryptosporidien können mit UV-Strahlung äußerst effizient inaktiviert werden. Dabei werden Geschmack, Geruch oder der pH-Wert des Mediums durch die Bestrahlung nicht beeinflusst. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zur chemischen Behandlung von Trink- oder Prozesswasser. Im Heimbereich werden entsprechende Geräte auch als „UV-Filter“ bezeichnet, wobei genaugenommen keine Filterung im physikalischen Sinne erfolgt. Zunehmend wird die UV-Desinfektion auch für die Behandlung von gereinigtem Abwasser eingesetzt, etwa aus hygienischen Gründen bei Einleitung in ein Badegewässer als Vorfluter oder für die Wasserwiederverwendung (z. B. als Prozesswasser, Betriebswasser oder für Bewässerung). Aus wirtschaftlichen Gründen zur Erhöhung der Standzeit und des Wirkungsgrads der UV-Strahlungsquellen wird durch eine vorherige weitestgehende Schweb- und Feststoffentfernung die Trübung reduziert. Im Allgemeinen kommen derzeit bei der UVC-Desinfektion wie vor 100 Jahren noch vorwiegend Niederdruck-Quecksilberdampflampen zum Einsatz (ggf. auch Mitteldruckstrahler), welche schmalbandig Strahlung der Wellenlänge 254 nm emittieren. UVC-LEDs. Diese haben gegenüber den klassischen Quecksilberlampen viele entscheidende Vorteile. Die Emissionswellenlänge von UVC-LEDs ist während des Herstellungsprozesses einstellbar und kann so auf verschiedene Wirkmechanismen angepasst werden. Die maximale Schädigung der DNA wird beispielsweise bei einer Wellenlänge um 265 nm erreicht. Proteine wie Tryptophan werden bei etwa 280 nm und im Far-UV-Bereich bei 235 nm

am effizientesten zerstört. Durch Kombination dieser Wellenlängen auf einem LED-Array lässt sich die Desinfektionswirkung im Vergleich zu 254 nm bei Quecksilberstrahlern um ein Vielfaches steigern. Zudem lassen sich UVC-LEDs takten und pulsen, ohne an Lebensdauer einzubüßen. Dies macht den Einsatz in diskontinuierlichen Desinfektionsprozessen möglich und bietet ein enormes Energiesparpotential. Die deutlich höhere mechanische Stabilität von UVC-LEDs und die fehlende Glasbruchgefahr prädestinieren sie für den Einsatz in mobilen Anwendungen oder der Lebensmittelindustrie.

durch die UV-Strahlung der Sonne erzeugt. Dieser Effekt setzt im UVC-Bereich unter 242 nm ein und wird umso stärker je kürzer die Wellenlänge ist. Die UVC-Photonen werden dabei aus dem Spektrum entfernt. Daher ist das Sonnenlicht auf der Erdoberfläche frei von UVC-Strahlung. Die stark oxidierenden Eigenschaften von Ozon werden genutzt, um chemische Verbindungen aufzuspalten und diese zu oxidieren. Ozon wird daher zur Geruchs-beseitigung oder zum Bleichen eingesetzt. Auch Mikroorganismen lassen sich mit Ozon effektiv inaktivieren. Da das Gas die Schleimhäute reizt, gilt es als Reizgas und es existieren strenge Grenzwerte. Es muss daher aus der Luft wieder entfernt werden. Undotierte Quecksilberniederdruckstrahler und alle Far-UV-Strahlungsquellen besonders bei Wellenlängen < 200 nm erzeugen während des Betriebes Ozon. Erstere sind aber auch mit dotierten Gläsern am Markt verfügbar, die für Wellenlängen unter 250 nm intransparent sind, wodurch die Ozonerzeugung verhindert wird. UVC-LEDs, wie sie aktuell schon für Desinfektionszwecke eingesetzt werden, sind hingegen völlig frei von Ozon und daher zur Ozonerzeugung nicht geeignet.



Abb 1: UVC-Wasserdesinfektionsgerät (PURION GmbH)

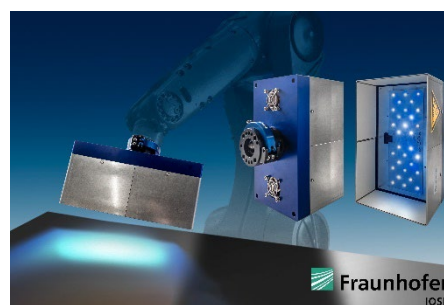


Abb 2: UVC-Oberflächendesinfektionsgerät (IOSB-AST)

Ozon kann auch alle in Wasser befindlichen organischen Stoffe (TOC) zerlegen und wird zur Herstellung hochreinen Wassers benutzt. Das entstehende Ozon stellt auch hier eine Gesundheitsgefahr dar und muss entfernt werden.

### Photolyse

Unter einer Photolyse oder Photodissoziation versteht man eine durch elektromagnetische Strahlung, besonders von Licht, ausgelöste Spaltung einer chemischen Bindung. Bei der Photolyse führt die Absorption von Licht im sichtbaren, ultravioletten oder noch kurzwelligeren Spektrum zur Bindungsspaltung. Die Photonenenergie des absorbierten Lichts muss hierbei größer sein als die Bindungsenergie. Demzufolge sind kleinere Wellenlängen (UVC) für die Photolyse besser geeignet als größere (UVA). Sofern das Molekül nicht durch

## Photochemische Reaktionen

### Ozonerzeugung

Ozon (O<sub>3</sub>) ist eine spezielle Variante des Sauerstoffs, welche unter UV-Bestrahlung aus dem Sauerstoff der Luft entsteht. In der Ozonschicht der Atmosphäre wird Ozon



andere Bindungen zusammengehalten wird, kommt es in Folge auch zur Dissoziation der Molekülfragmente.

Die weiter oben beschriebene Inaktivierung von Mikroorganismen durch Schädigung der DNA oder der Zerstörung der Proteinstruktur ist eine photolytische Reaktion. Hierbei wird die Wasserstoffbrückenbindung zwischen den Nukleinsäuren Thymin und Cytosin durch UVC-Strahlung bei 265 nm aufgespalten. Auch die Schädigung von Polymeren durch UV-Strahlung ist eine photolytische Reaktion. So wird zum Beispiel aus dem Kunststoff ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol) unter UV-Strahlung aus dem Styrol-Teil des Polymers ein Sauerstoffatom herausgelöst. Hierdurch verfärbt sich der ABS gelblich. Man kennt den Effekt von alten PC-Monitoren, die im Sonnenlicht gelb werden. Durch den Einsatz von Wasserstoffperoxid lässt sich das fehlende Sauerstoffatom jedoch wieder in den Molekülverbund integrieren und die Verfärbung rückgängig machen.

Photopolymerisationen, also das Aushärten von Kunststoffen, lassen sich durch Photolyse geeigneter Photoinitiatoren starten. Zum Einsatz kommen dabei insbesondere aliphatische Azoverbindungen, Hydroxyketone oder (Bis)Acylphosphinoxide. In der organischen Photochemie sind die  $\alpha$ -Spaltung von Ketonen (Norrish-Typ-I-Reaktion), die N2-Eliminierung aus Azoverbindungen und Aziden (Nitrenbildung) und die Barton-Reaktion (Photolyse von Nitriten) präparativ wichtige und mechanistisch gut untersuchte Reaktionen.

### Photokatalyse

Die photochemische Wirkung von UV-Strahlung kann durch den Einsatz von speziellen Photokatalysatoren noch deutlich erhöht werden. Hierbei handelt es sich um Materialien, die unter Bestrahlung eine chemische Reaktion beschleunigen, selbst aber nicht umgewandelt werden. Da die Reaktion nur an der Katalysatoroberfläche stattfindet, spricht man von einer Oberflächenreaktion. Die Reaktionseffizienz ist abhängig von der verwendeten Emissionswellenlänge und der Größe der aktiven Oberfläche. Eine Steigerung der

Wirksamkeit photokatalytischer Verfahren erfolgt daher meistens durch Vergrößerung der reaktiven Oberfläche in Form von Keramik- oder Metallschäumen, auf die der Photokatalysator aufgebracht wird. Einsatz findet die Photokatalyse zum Beispiel beim Abbau von Geruchsstoffen (VOCs - Volatile Organic Compounds) zur Verbesserung der Raumluft oder dem Abbau von Spurenstoffen (z.B. Medikamentenrückstände) im Abwasser. Grundsätzlich lassen sich die meisten organischen Stoffe photokatalytisch abbauen und auf diese Weise unschädlich machen. Das bekannteste photokatalytische Material ist Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ) in seinen verschiedenen Kristallmodifikationen (Anatas, Rutil, ...), welche unterschiedlich effizient arbeiten. Meist wird es als Nanostruktur mittels Kontaktschicht auf Oberflächen verwendet. Neben  $\text{TiO}_2$  gibt es auch noch eine größere Anzahl an metallischen Photokatalysatoren. Allen gemeinsam ist die Tatsache, dass es sich um Halbleitermaterialien handelt. Beim Auftreffen ultravioletter Strahlung und teilweise auch im sichtbaren Licht werden aus dem Halbleiterverbund Elektronen herausgeschlagen, und es entstehen „Löcher“. Insbesondere bei der Reaktion mit Wasser entstehen an der Oberfläche durch Reaktion mit den „Löchern“ im Photokatalysator hochreaktive Hydroxylradikale (OH), deren oxidative Wirkung über der von Ozon liegt.

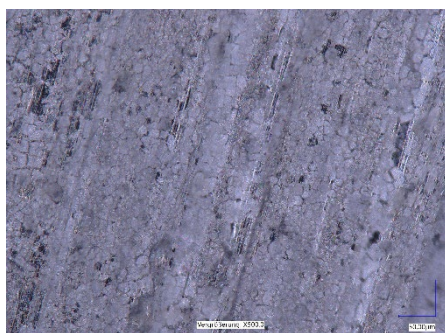


Abb. 3: Photokatalytische  $\text{TiO}_2$ -Partikel auf der Oberfläche eines Luftreinigers (IOSB-AST)



Abb. 4:  $\text{TiO}_2$ -beschichtete Keramikschäume zur Luft und Wasseraufbereitung (IOSB-AST)

Die Photokatalyse mit speziellen Katalysatoren ist daher in der Lage, auch schwer abbaubare Stoffe wie PFAS (Per- und Polyfluorierte Alkylsubstanzen) deutlich besser abzubauen als dies mit Ozonierung oder Plasmaverfahren möglich wäre.

### Materialprüfung/-bearbeitung

UV-Licht kommt in der Materialprüfung bei der Inspektion von Glas zum Einsatz. Anhand von Fluoreszenz an Störungen kann man Sprünge oder Fehler in Glasoberflächen erkennen. Es können Qualitätsprüfungen ausgeführt werden wie beispielsweise die Qualitätsprüfung von Ölschläuchen. Aufgrund der unterschiedlichen spektralen Kennlinien von Wasser und Öl im UV-Bereich kann Öl von Wasser unterschieden werden. Dies kann beispielsweise zum Aufspüren defekter Ölschläuche verwendet werden. Gemäß dem gleichen Prinzip lässt sich Öl in Wasser detektieren. Die Bahn benutzt UV-Strahlung zur Inspektion von Oberleitungs- und Hochspannungsanlagen, da es bei defekten Isolatoren oder angerissenen Kabeln zu sogenannten Koronaentladungen kommt. Dabei wird an den defekten hochspannungsführenden Komponenten UV-Strahlung emittiert. Diese kann von Spezialkameras erfasst werden.



Abb. 5: UV-Kamera am IOSB-AST

Viele Materialien sind einer beständigen UV-Belastung ausgesetzt. Mithilfe moderner Testsysteme ist es möglich, die natürliche UV-Einstrahlung so zu verstärken, dass innerhalb von 12 Monaten 63 Jahre natürlicher UV-Einstrahlung simuliert werden. Bei der Prüfung von dünnen Metallen (zum Beispiel im Flugzeugbau) werden diese mit UV-Licht durchleuchtet; mit Hilfe spezieller UV-empfindlicher Filme wird dabei überprüft, ob Haarrisse im Metall vorhanden sind.

### Aushärtung (Vernetzung) von Polymeren

Intensive UV-Strahlung wird in der Industrie für die Aushärtung spezieller Materialien verwendet. Zu nennen sind hier spezielle, lösemittelfreie, UV-empfindliche Druckfarben, vor allem beim Offsetdruck. Es gibt UV-härtbare Materialien wie Lacke, strahlenhärtende Klebstoffe, Aushärtung von Brillengläsern, lichterhärtende Kunststoffe für das Modellieren künstlicher Fingernägel und UV-härtbare Materialien für die Zahnheilkunde. Ein weiterer Einsatz ist die Scheibenreparatur des Verbundglases bei Automobilen.



Abb. 6: UV-härtender Klebstoff

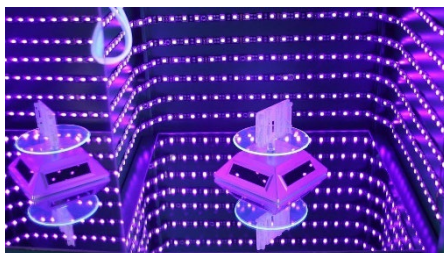


Abb. 7: UV-Aushärtung von 3D-Druckteilen

### Elektronische Bauteile

In der Elektronik wird UV-Strahlung vor allem bei der Herstellung von mikroelektronischen Bauelementen und Schaltkreisen eingesetzt. So erfolgt beispielsweise die Herstellung von Leiterbahnen auf Leiterplatten durch eine Belichtung einer lichtempfindlichen Schicht auf den Leiterplatten mit UV. Dabei wird durch die UV-Strahlung eine fotochemische Reaktion im Fotolack ausgelöst. Das gleiche Prinzip wird auch bei der Herstellung integrierter Schaltkreise (Waferbelichtung) angewendet, vgl. Fotolithografie (Halbleitertechnik). Hierbei kamen früher ebenfalls Quecksilberdampflampen – vor allem die g-Linie (434 nm) und die i-Linie (365 nm) – zum Einsatz. Später KrF- und ArF-Excimerlaser (248 nm und 193 nm). Der Trend, immer kürzere Wellenlängen zu nutzen, ist dabei der fortwährenden Skalierung der Transistorstrukturen geschuldet.

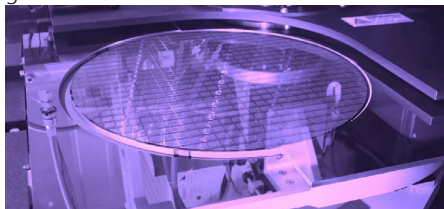


Abb. 8: UV-Photolithografieanlage für Wafer (Primelight GmbH)

Neben dem Einsatz in der Herstellung wurde in der Elektronik UV-Strahlung auch für weitere Anwendungen genutzt. Ein Beispiel war das Löschen von EPROM-Speicher mit einer Quecksilberdampflampe (253,7 nm). Hierbei bewirkt die UV-Strahlung eine Freisetzung von Ladungsträgern im Floating-Gate aus

Polysilizium; die freiwerdenden Elektronen haben genug Energie, um die Potentialbarriere des Siliziumdioxid-Dielektrikums zu überwinden und abzufließen. Heutzutage sind EPROMS jedoch in der Regel elektrisch löschbar (EEPROMS).

### Fluoreszenz

#### Optische Aufhellung

Den natürlichen UV-Anteil des Tageslichts macht man sich bei Waschmittel zunutze, indem ihm optische Aufheller hinzugefügt werden. Diese lassen durch Kalkablagerungen vergraute oder vergilbte Textilien „weißer als weiß“ erscheinen, weil sie das UV-Licht in sichtbares blaues Licht umwandeln, das als Mischfarbe mit der Vergilbung der Textilien Weiß ergibt. Zusätzlich wird mehr sichtbares Licht ausgesendet als bei einem normal reflektierenden Objekt.

#### Weißlichterzeugung

Ultraviolett ist die primäre Emission in Leuchtstofflampen, effizienten weißen Lichtquellen, in denen die Ultraviolett-Emission einer Gasentladung von Quecksilberdampf zur Anregung von im sichtbaren Spektralbereich fluoreszierenden Leuchtstoffen genutzt wird. Auch andere Gasentladungslampen enthalten manchmal Leuchtstoffe, um die Farbwiedergabe zu verbessern, indem diese mit dem Ultraviolett-Strahlungsanteil der Entladung angeregt werden. Von sog. Tageslichtlampen und Vollspektrumröhren (u. ä. Bezeichnungen, herstellerabhängig) wird ein dem Sonnenlicht möglichst ähnliches Lichtspektrum inkl. UV und Infrarot abgegeben, um eine natürliche Beleuchtung zu ermöglichen (insbes. in Innenräumen, siehe auch Ergonomie). Hierbei ist die Menge der UV-Emission gesundheitlich unbedenklich. Leuchtdioden (LED), die für den Menschen weiß erscheinendes Licht abstrahlen, benutzen eine blau strahlende Leuchtdiode im Inneren, bestehend aus Materialien wie Indiumgalliumnitrid oder Galliumnitrid. Leuchtdioden, welche UV-Strahlung



abgeben, bestehen aus Aluminiumnitrid oder Aluminiumgalliumnitrid und werden ohne Leuchtstoffbeschichtung als direkte UV-Strahlungsquelle eingesetzt. UV-LEDs sind bis zu Wellenlängen knapp unter 240 nm realisierbar.

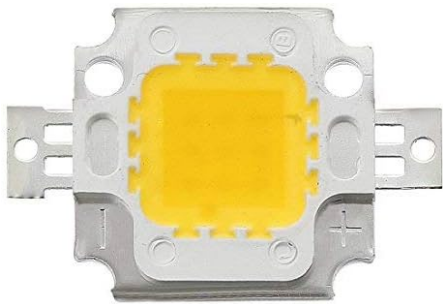


Abb. 9: Weißlicht LED mit UV-LEDs und gelber Leuchtstoffbeschichtung



Abb. 10: Korallenriff unter UV-Licht-Bestrahlung



Abb. 11: Wand mit Schimmelbefall unter UV-Licht



Abb. 12: Showroom mit UVA-Licht

### Biologische Analysen

Einige Farbstoffe, wie das in den Biowissenschaften verwendete DAPI, werden von UV-Strahlung angeregt und emittieren ein längerwelliges, meist sichtbares Licht. Fluoreszierende Stoffe finden damit unter anderem Anwendung beim Markieren von biologischen Molekülen (z. B. die DNS), um ihr Verhalten in biologischen Systemen zu beobachten. In der Forensik wird die Fluoreszenz von Blut und Sperma zur Sichtbarmachung von Opfer- oder Täterspuren eingesetzt. Diese Methode wird bei der Aufklärung von Kriminalfällen eingesetzt, wenn biologische Spuren (Blut, Sperma, Speichel) an Wänden, auf Böden/Mobiliar oder in Textilien nachgewiesen werden sollen. In der Medizin wird die Fluoreszenz von organischen Stoffen ebenfalls genutzt. So können Pigmentstörungen der Haut mit Hilfe von UV-Strahlern („Wood-Lampe“) besser sichtbar gemacht werden. Auch bestimmte Hautkeime (*Corynebacterium minutissimum*) werden mittels dieser Diagnoseleuchten durch die Auslösung einer rötlichen Fluoreszenz (Porphyrinbildung) sichtbar.

Ebenso kann mit UV-Strahlung über Fluoreszenz Schimmelbefall im Baubestand nachgewiesen werden, selbst wenn dieser noch nicht mit dem bloßen Auge sichtbar ist.

Eine andere Anwendung ist die Herkunftsanalyse von Hühnereiern. Dabei wird ausgenutzt, dass das Abrollen charakteristische Spuren auf der Hühnereierschale hinterlässt, die sich mithilfe von Fluoreszenz nachweisen lassen. Auf diese Weise kann geprüft werden, ob es sich um Eier aus Bodenhaltung oder aus Legebatterien handelt.

### Urindetektion in der Haustierhaltung

Im Tierhandel erhältlich sind Taschenlampen mit nahem UVA-Licht (Schwarzlicht), die als sogenannte Urin-Detektoren angeboten werden, um Urinflecke im Wohnbereich aufzuspüren.

### Unterhaltungsindustrie

UV-Licht im UVA-Bereich wird oft für Showeffekte in abgedunkelten Räumen wie Diskotheken, bei Zauberveranstaltungen oder auch für Schwarzlichttheater eingesetzt. Die Strahlung regt fluoreszierende Stoffe zum Leuchten an und, da helles Licht vermieden wird, wirken sich die Leuchteffekte besonders aus, wie dies bei Textilien, Papieren, künstlichen Zähnen und anderen Materialien mit optischen Aufhellern auffällt.

Das Sichtbarmachen von Sicherheitsmerkmalen auf Dokumenten, wie Ausweispapieren oder Fahrscheinen, die Echtheitsprüfung von Zahlungsmitteln und die „Neon-Stempel“ am Handrücken als „Eintrittskarte“ in ein Konzert oder als Eigentümermarkierung auf einem Kunstobjekt (gegen Diebstahl) sind weitere Anwendungen für UV-Strahlung.



Abb. 13: Fluoreszierendes Sicherheitsmerkmal auf Geldscheinen

### Schulungen

UV-Strahlung wird in Schulungen zur Visualisierung von mit Fluoreszenzfarbstoffen markierten Substanzen eingesetzt. So werden zur Visualisierung bei der Händehygiene-schulung (Waschkontrolle und Applikation von Handdesinfektionsmittel) spezielle mit UV-fluoreszierenden Substanzen versetzte Desinfektionsmittel vergeben, die aufzeigen, an welchen Stellen keine ausreichende Desinfektion erfolgte.

### Medizin

#### Lichttherapie

Im medizinischen Bereich wird UV-Strahlung vornehmlich im UVB-Bereich zur Behandlung von Hautkrankheiten eingesetzt. So lässt sich Schuppenflechte



(Psoriasis) recht guten mit einer milden UVB-Bestrahlung behandeln.



Abb. 14: Schuppenflechtebehandlung mit UVB-Strahlung

Weiterhin lässt sich durch Bestrahlung mit UV die Vitamin-D Produktion in der Haut anregen und hierdurch ein Vitamin-D-Mangel, insbesondere in den Wintermonaten, ohne orale Gabe von Vitamin-D-Präparaten behandeln. Hierbei ist jedoch auf die Bestrahlungsdosis zu achten, die je nach Hauttyp unterschiedlich ist. Als Faustregel gilt, dass pro Behandlung maximal die Hälfte der Dosis eingesetzt wird, die beim entsprechenden Hauttyp zu einem beginnenden Sonnenbrand führen würde.

Neben der Desinfektion von unbelebten Oberflächen im klinischen Umfeld zur Reduktion von Krankenhauskeimen gewinnt auch die Desinfektion von Haut und Wunden im Operationsumfeld an Bedeutung. Hier kommen vor allem Wellenlängen im Far-UV-Bereich zum Einsatz, da hier die Eindringtiefe in die Haut gering genug ist, so dass keine lebenden Zellen geschädigt werden. Wie sich Far-UV-Strahlung auf die Augen auswirkt und ob es hier zu Schädigungen kommt, ist derzeit noch Gegenstand der Forschung. Gleiches gilt für die Entwicklung von Far-UV-Strahlungsquellen, da die hierfür verwendeten Excimer-Lampen sehr geringe Effizienzen bei sehr hohem Preis aufweisen.

## Analytik

Da es sich bei UV-Licht um eine elektromagnetische Welle handelt, kann für dieses Licht auch eine optische Spektroskopie durchgeführt werden. Zu nennen wären hier die UV/VIS-Spektroskopie und die Ultraviolett-photoelektronenspektroskopie (UPS). Eine weitere Anwendung sind Chromatogramme in der Dünnschichtchromatographie. UV-Licht kann zur Gas-Analyse eingesetzt werden zum Beispiel für die Gase NO, NO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>. In der Molekularbiologie wird UV-Licht verwendet, um Nukleinsäuren mit Hilfe von Ethidiumbromid sichtbar zu machen. Spezielle Anwendung ist die Bestimmung der Fettschichtdicke. Mit Hilfe von UV-Strahlung lässt sich die Dicke einer Fettschicht auf den Objekten bestimmen. Weiterhin kann die Zinnseite von Floatglas, welches in der Photovoltaik bei Dünnschicht-Solarzellen eingesetzt wird, ermittelt werden.

## Landwirtschaft und Lebensmittel

### Pflanzenzucht

Auch in der Landwirtschaft kommt UV-Strahlung zunehmend zum Einsatz. So wird insbesondere in den Geschlossenen Systemen des Indoor-Farmings das zur Bewässerung nötige Wasser im Kreislauf gehalten und mit UV-Strahlung desinfiziert. So kann die Ausbreitung von Pflanzenkrankheiten in der Farm eingedämmt werden. Aber auch die Pflanzen selbst werden mit UV bestrahlt. Hierzu kommen spezielle LED-Leuchtsysteme zum Einsatz, die Vornehmlich rote und blaue LEDs enthalten, wodurch die Photosynthese in der Indoor-Farm überhaupt erst stattfinden kann. Da auch im natürlichen Sonnenspektrum UV-Anteile vorhanden sind, werden diese dem Licht künstlich durch UV-LEDs zugesetzt. Durch diesen UV-Anteil lässt sich zudem die Produktion bestimmter sekundärer Pflanzenstoffe erhöhen und so eine Art „Functional Food“ z.B. mit höherem Vitaminanteil erzeugen.



Abb. 15: Vollspektrum Pflanzenlampe



Auch die Bestrahlung von Saatgut ist möglich. Hier ist von Vorteil, dass UV-Strahlung nicht tief in das Saatgut eindringt und nur oberflächlich wirkt. So werden Schimmelpilze auf der Oberfläche inaktiviert, der Keimling aber nicht geschädigt.

### Lebensmittelbestrahlung

Die Bestrahlung von Lebensmitteln ist ein Bereich der aktuell erst in der Entwicklung und derzeit noch sehr stark von regulatorischen Beschränkungen betroffen ist. In Deutschland dürfen Trinkwasser, Oberflächen von Obst und Gemüse und Hartkäse während der Lagerung zur Entkeimung mit UV-Strahlung behandelt werden. Aufgrund von Ausnahmeregelungen ist dies auch bei Schaleneiern (u.a. Hühnereier) erlaubt. Dies dient in erster Linie der Inaktivierung von Schimmelpilzsporen. Es gibt jedoch Untersuchungen, die belegen, dass eine kontinuierliche schwache UV-Bestrahlung von Lebensmitteln den Verderbnisprozess verlangsamen und damit die Haltbarkeit von Lebensmitteln deutlich verlängern kann. Belgien, Frankreich, Italien, die Niederlande, Tschechien, Polen und Großbritannien haben eine Strahlenbehandlung auch für weitere Lebensmittel erlaubt.

### Lockmittel

Pflanzen nutzen bestimmte Blütenteile (UV-Male), um Insekten anzulocken, die, wie Bienen und Hummeln, UV-Strahlung wahrnehmen können. Die UV-Male der Blüten entstehen durch unterschiedliche Reflektivität für ultraviolettes Licht bestimmter Blütenteile, beispielsweise der Innen- und Außenseite. Dadurch finden Bienen auch bei im sichtbaren Bereich einfarbig aussehenden Blüten das Zentrum. Bei komplizierteren Blütenformen oder schwerer auszubeutenden Blüten kann der Weg zur Nahrungsquelle durch UV-Licht absorbierende Saftmale markiert sein.

Straßenlampen verwenden oft Leuchtmittel mit hohem Blau- und Ultraviolettanteil

(Quecksilberdampflampen). Diese, wie auch weiße LEDs, locken viele Insekten an und beeinflussen das biologische Gleichgewicht negativ. Eine Verringerung der Biodiversität ist hierdurch die Folge. Die Beeinflussung des Verhaltens durch UV-Licht wird auch in Lichtfallen für den Insektenfang ausgenutzt, in denen UV-reiche Lichtquellen eingesetzt werden. Sie werden zur Schädlingsbekämpfung und zur Zählung/Artbestimmung in der Forschung eingesetzt.

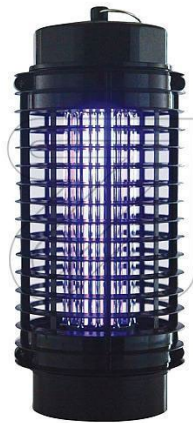


Abb. 16: UV-Insektenfalle

### Fazit

UV-Strahlung bietet über das gesamte Spektrum hinweg vielfältigste bekannte, aber sicher auch noch unbekanntere Einsatzmöglichkeiten. Viele der bekannten werden allerdings aufgrund der Einschränkungen und des schlechten Handlings klassischer UV-Strahlungsquellen nur sehr begrenzt genutzt. Insbesondere die Entwicklungen im Bereich der UV-LED-Technologie der vergangenen Jahre lassen hier jedoch auf Verbesserungen hoffen. Gleichwohl ist in vielen Bereichen - insbesondere der photochemischen und medizinischen Anwendungen - noch ein größerer Forschungsbedarf vonnöten. Diesem Forschungsaufwand steht jedoch ein enormes zu erwartendes technologisches Potential gegenüber.