



0.0 Am Anfang

Weißt du, wie Gott ihnen Weisung gibt und wie er das Licht aus seinen Wolken hervorbrechen lässt? ^{[Hi 37,15],[0]}

Über den Aspekt des Lichts wurde schon vor 1200 Jahre geschrieben und ernsthaft philosophiert.

Menschen aller Kulturkreise wurden sich der Bedeutung des Lichts und seiner Eigenschaften bewusst. Nicht nur der wärmenden Kraft der Sonne galt die Aufmerksamkeit vieler Beobachtungen, auch die heilenden Wirkmechanismen, damals allerdings noch unbekannter UV-Strahlung, konnten schon beschrieben werden.

Als Energielieferant ermöglicht das absorbierte Licht erst die Lebensvorgänge auf unserer Erde. Eine Grundlage, die die komplexe Reaktion in den Pflanzenzellen durch die Umwandlung von Kohlendioxid (CO₂) in Kohlenstoff (C) und Sauerstoff (O) durch die Photosynthese unter Lichteinwirkung erst möglich macht. Ohne Sonnenenergie wäre keine Kohle, kein Erdöl oder Erdgas auf unserem Planeten vorhanden.

Optische Technologien lassen sich bis in die Antike (ca. 1900 v.Chr.) zurückverfolgen, einzelne Stücke aus dem alten Ägypten sind Zeitzeugen im Ägyptischen Museum in Kairo ^[1].

Licht breitet sich geradlinig aus, diese Erkenntnis ist nicht neu und war zu der Zeit der griechischen Vordenker genauso bekannt wie auch die heutigen Reflexionsgesetze.

Bedeutende technische Erfindungen des späten Mittelalters wurden nicht nur von Galileo Galilei (1564-1642) der sein Linsenfernrohr nach einem Patent von Hans Lippershey (1587-1619) mit handgeschliffenen Linsen herstellte, sondern auch von Zacharias Janssen (1588-1632) welchem die Konstruktion des Mikroskops zugesprochen wird, gemacht.

Erst die technischen Erfindungen der Optik ermöglichten einen tieferen Blick in das Wesen des Lichts allerdings sorgte die Uneinigkeit derer Vordenker, welche sich mit der Materie des Lichts befassten nicht gerade für sprudelnde Erkenntnisse.

Über Jahrhunderte stritten Gelehrte über und hinsichtlich Ihrer Beobachtungen.

Eine Schulmeinung von den Lehren Sir Isaac Newton (1643-1727) stütze sich auf die Existenz elementarer Lichtpartikel, wohingegen die andere Schulmeinung den Lehren Christiaan Huygens (1629-1695) folgte und die Wellennatur des Lichts postulierte.

So wurde Licht im 17. Jhd. entweder als Teilchenstrom oder als rasche Wellenbewegung in ätherischer Materie (siehe Glossar) dem Äther (siehe Glossar) verstanden.

Einigkeit herrschte derzeit auch nicht über die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts. Die Frage, ob die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes endlich oder unendlich sei, war schon seit Jahrhunderten kontrovers diskutiert worden.

Anhänger des Aristoteles (384-322 v.Chr.), darunter René Descartes (1556-1650), plädierten für unendliche Lichtgeschwindigkeit. Erst Ole Christensen Römer (1644-1710) postulierte über die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit.



James Clerk Maxwell (1831-1897) sollte es vorerst gelingen Einigkeit in die Sichtweise zur Betrachtung des Lichts zu bringen.

Maxwell schrieb 1864 „*This velocity is so nearly that of light, that it seems we have strong reason to conclude that light itself (including radiant heat, and other radiations if any) is an electromagnetic disturbance in the form of waves propagated through the electromagnetic field according to electromagnetic laws.*“ - „*Diese Geschwindigkeit ist so nahe an der Lichtgeschwindigkeit, dass wir einen starken Grund zu der Annahme haben, dass das Licht selbst (einschließlich Wärmestrahlung und anderer Strahlung, falls es sie gibt), eine elektromagnetische Welle ist.*“ ^[2]

Mit der Aussage „Licht sei nichts anderes als eine elektromagnetische Erscheinungen in Form von Wellen“ wird die klassische Zusammenfassung des Erfahrungswissens seiner Zeit mit einem einzigen Satz mathematischer Gleichungen beendet.

Maxwell formulierte diese Gleichungen 1865 indem er den Zusammenhang von elektrischen und magnetischen Feldern mit elektrischen Ladungen und elektrischem Strom unter für ihn gegebenen Randbedingungen diskutiert.

Nunmehr ist aber die Formalie nicht nur ein eleganter mathematischer Federstrich sondern mit der Interpretation dementsprechender Gleichungen erschließt sich der allgemeine Charakter des Lichts.

Dreißig Jahre nach James Clerk Maxwell Formalien, am 19.10.1900, hielt Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947) vor der Deutschen Physikalischen Gesellschaft einen Vortrag über eine Theorie des Lichts welche auch die submikroskopischen Phänomene berücksichtigt.

Die Quantenmechanik wurde neues Forschungsfeld der Physik und die Phänomenologie des Lichts wurde neu betrachtend diskutiert.

1.0 Prinzipien des Lichts

1.0.1 Kreis der Elektromagnetik

Licht ist Leben; ohne Licht gäbe es auf unserem Planeten weder Fauna noch Flora.

„Licht ist das Gewebe aus dem Leben gewebt wird“ – so berichteten es schon die alten Schriften des Sokrates.

Jedoch brauchte es viele Jahrhunderte diese Kernaussage zu beweisen.

Sichtbares Licht, im trivialen Sinn unser Tageslicht, stellt aber nur einen Bruchteil des gesamten Spektrums an elektromagnetischen Energien dar. In Abhängigkeit von der Wellenlänge definiert sich Licht immer als Energieträger, von hochenergetischer Gammastrahlung (γ -Strahlung) mit $> 120 \text{ keV}$ bis zu den niederfrequenten Strahlungen der ULF-, SLF-, ELF-Bereiche des elektromagnetischen Spektrums mit Energien $> 12 \text{ peV}$.

Geordnet nach zunehmender Frequenz und somit abnehmender Wellenlänge befinden sich am Anfang des Spektrums die Längstwellen, deren Wellenlängen einige tausend Kilometer betragen. Am Ende stehen die sehr kurzwelligenen und damit energiereichen Gammastrahlen, deren Wellenlänge bis in atomare Größenordnungen reicht.

Bei kleinster Wellenlänge in Bereichen von $10^{-12} \text{ m} - 10^{-20} \text{ m}$ trifft man auf die harte Röntgenstrahlung – bis zur Höhenstrahlung. Mit größer werdender Wellenlänge gelangt man über Infrarot(Wärme)wellen bei $\lambda \approx 10^{-4} \text{ m}$ schließlich zu den Fernseh- und Radiowellen bei $\lambda \approx 10^4 \text{ m}$.

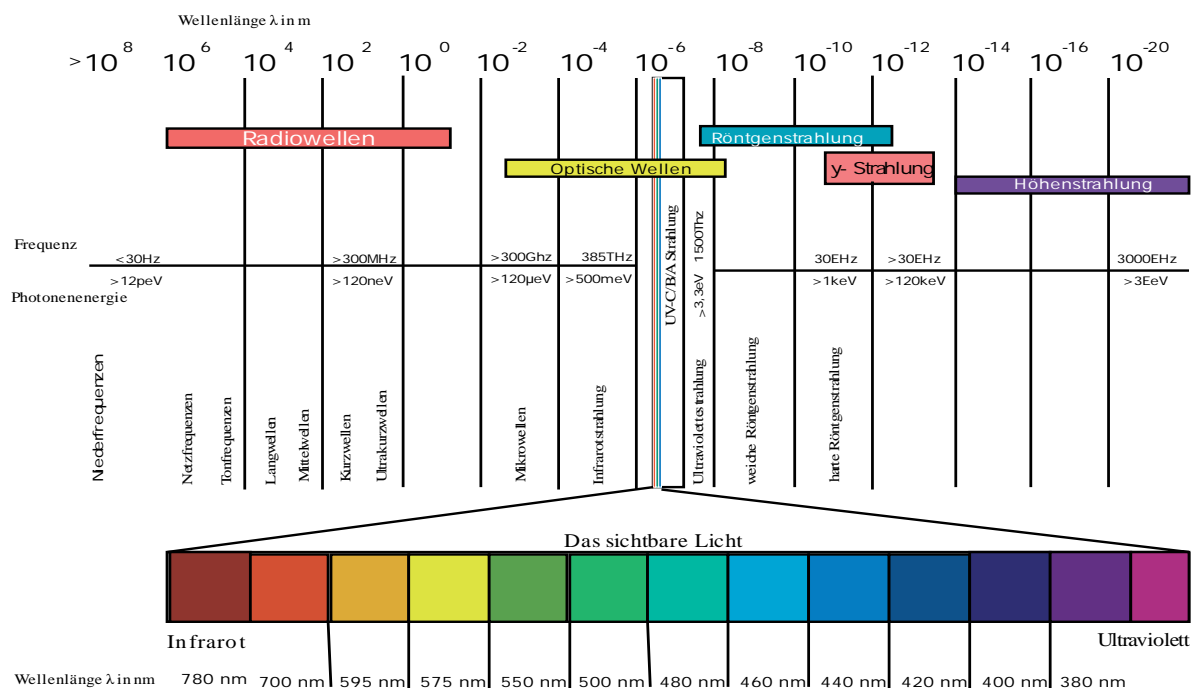


Abb.1 Das elektromagnetische Spektrum



Das schmale Frequenzband des sichtbaren Lichts liegt im gesamten *elektromagnetischen Spektrum* (siehe Glossar) zwischen $3,8 \times 10^{14}$ Hz bis $7,5 \times 10^{14}$ Hz und wird durch langwelliges infrarotes und kurzwelliges ultraviolettes Licht begrenzt.

Der bekannteste natürliche Lichtproduzent, unsere Sonne, emittiert in dementsprechendem Frequenzbereich des sichtbaren Lichts eine natürliche Wärmestrahlung die in den Sommermonaten mit einer Bestrahlungsstärke von 1400 W/m^2 die Atmosphäre durchdringt.

Tageslicht selbst, setzt sich aus vielen Frequenzbereichen (Farben) von Violett über Blau, Grün, Gelb und Orange bis Rot zusammen und entsteht im Allgemeinen durch eine Umordnung der Valenzelektronen (Außenelektronen in den äußersten *Orbitalen*) in Atomen und Molekülen ^[3].

Aber auch künstliche Lichtquellen, wie zum Beispiel Glühlampen, Leuchtstoffröhren, Leuchtdioden, *Laser* (siehe Glossar) und chemische Lichtquellen, sorgen je nach Einsatzbedingungen und Notwendigkeit für wohlige Wärme, Helligkeit oder gewünschte mechanische Effekte.

Isaac Newton schrieb in seinen Arbeiten zur Optik über die Struktur von weißem Licht als ein Gemisch aller Farben des sichtbaren Spektrums ^[4].

Mit Hilfe eines Prismas zerlegte er das sichtbare Licht in die verschiedenen Farben des elektromagnetischen Spektrums. Einfarbiges (monochromes) Licht; welches als Licht einer konkreten Wellenlänge definiert werden kann, so stellte Newton schon fest, lässt sich allerdings nicht mehr mit einem Prisma aufspalten worauf er seine *Korpuskeltheorie* (siehe Glossar) stützte.

Im Gegensatz zu weißem Licht stellen Spektralfarben an sich kein Gemisch mehr dar und können somit als rein – Monochrom – im Sinne von unzerlegbar verstanden werden.

Licht in seinem gesamten Spektrum; oder die Natur von elektromagnetischen Wellen spielt in unserem Leben eine grundlegende Rolle.

So ist nicht nur das sichtbare Licht, sondern auch die Röntgen- und Gammastrahlung, ein für Flora und Fauna lebenswichtiger Bestandteil des elektromagnetischen Spektrums.



1.0.2 Lichtenergie und Lichtimpuls

Nach der klassischen Theorie von Maxwell entsteht Licht durch die Bewegung von Ladungen.

Elektronen werden angestoßen und geben dabei Licht ab.

Dieser Grundmechanismus der *Photonik* (siehe Glossar) wurde erstmals Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts durch den photoelektrischen Effekt, für dessen Erklärung Albert Einstein (1879-1955) den Nobelpreis erhielt, wissenschaftlich nachgewiesen.

Derartige Effekte ließen sich am besten mit der Idee erklären das Lichtteilchen sich wie winzige Punktteilchen mit spezifischer Energie verhalten, die bei dessen Auftreffen auf ein (Halbleiter-) Material Elektronen aus den Atomhüllen schlagen.

Einstein postulierte 1905 zur Erklärung des Photoeffektes den radikalen Vorschlag das Licht aus einer Ansammlung von Quanten besteht.

Für Einstein waren diese Quanten nichts anderes als Teilchen im Sinne von Energiepaketen.

Jedem dieser Energiepakete oder Photonen, wie sie im weiteren bezeichnet werden sollen, schrieb er eine Energie zu die der Frequenz proportional ist.

$$E = h \cdot \vartheta \quad 1.2.1$$

mit $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js als plancksche Wirkungskonstante

Die entscheidendste Aussage wurde aber von Einstein zur Wechselwirkung zwischen Materie und Photonen formuliert.

Diese Wechselwirkung zwischen Licht und Materie muss so Einstein auch in diskreten Energiepaketen stattfinden. Die sich daraus ergebende Schlussfolgerung ist die Erhöhung der Energie eines Elektrons nach Absorption eines Photons.

$$\Delta E = h \cdot \Delta \vartheta \quad 1.2.2$$

Dieser Prozess zeigt sich allerdings erst nach Überwindung einer inneren Barriere der atomaren Bindungskräfte.

Erst wenn diese kritische Energie überwunden wird lässt sich ein emittiertes Photon nachweisen.

Die vom Elektron absorbierte Energie wird zu einem Teil benötigt um die Bindungsenergie im Atom zu überwinden (hier Übergang auf ein höheres Energieniveau des Elektrons – mit Emission eines Photons) und zum anderen Teil geht die Restenergie in kinetische Energie des emittierten Elektrons über.

Im engeren Sinn ist Licht die feinstofflichst-mechanisch wirkende Form der Materie welche mit den Gesetzen der Quantenmechanik wahrscheinlichkeits-theoretisch erklärt werden kann

– je nach physikalischer Betrachtungsweise und Experiment stellt es sich zum einen als Welle oder als Teilchen dar.

Erwin C. Schrödinger (1887-1961) als Mitbegründer der Quantentheorie postulierte 1933

„In den neuen Vorstellungen ist die Unterscheidung zwischen Wellen und Teilchen verschwunden, da entdeckt wurde, dass alle Teilchen auch Welleneigenschaften besitzen und umgekehrt.

Keines der beiden Konzepte muss aufgegeben werden; vielmehr sind beide zu vereinigen.

Welcher Aspekt hervortritt, hängt nicht vom physikalischen Objekt ab, sondern von dem Messgerät, mit dem man dieses untersuchen will.“^[5]

Nach derzeitigem Kenntnisstand wird Licht mit seiner Teilchenstruktur den Photonen ohne Ruhemasse beschrieben, seine potentielle Energie ist Null was im engeren Sinne bedeutet dass ein Photon nicht in Ruhe vorkommen kann.

Teilchen ohne Ruhemasse (wie das Photon) bewegen sich ausschließlich immer mit Lichtgeschwindigkeit.

In der Bewegungsbetrachtung übertragen Photonen einen Impuls in Abhängigkeit zur Ladungsenergie nach dementsprechender Wellenlänge. (siehe Abb.2 Energie E pro Photon in eV)

In der speziellen Relativitätstheorie wurde durch Einstein der Begriff der bewegten Massen eingeführt. Masse wird hier so definiert, dass der Impuls weiterhin durch

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v} \quad 1.2.3$$

also als Produkt von Masse und Geschwindigkeit, definiert ist.

Diese relativistische Masse nimmt mit der kinetischen Energie zu und ist über die Formel

$$E = m \cdot c^2 \quad 1.2.4$$

mit der Gesamtenergie gekoppelt.

Damit ist die relativistische Masse allerdings nur eine andere Maßeinheit für Energie.

Nach Newtons klassischer Mechanik definiert sich der Impuls \vec{p} eines Körpers auch als Produkt aus seiner Masse m und seiner Geschwindigkeit \vec{v} .

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v} \quad 1.2.5$$

Da die Masse ein Skalar ist, sind Impuls und Geschwindigkeit Vektoren mit gleicher Richtung.

Es definiert sich eine Beziehung zwischen Energie E , Impuls \vec{p} und Masse m .

In der *hamiltonschen Mechanik* wird der Bewegungszustand eines Massepunktes nicht durch seine Geschwindigkeit, sondern durch seinen Impuls \vec{p} ausgedrückt.



In diesem Fall gilt:

$$E_{\text{kin}} = \frac{\vec{p}^2}{2m} \quad 1.2.6$$

Um die Geschwindigkeit eines Körpers zu ändern, muss ein Impuls übertragen werden.

Der pro Zeit übertragene Impuls \vec{p} ist die Kraft \vec{F} .

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} \quad 1.2.7$$

In der relativistischen Physik hängt der Impuls eines Körpers mit seiner Geschwindigkeit nicht linear zusammen (c ist die Lichtgeschwindigkeit):

$$\vec{p} = \frac{m \cdot \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, v^2 < c^2 \quad 1.2.8$$

Mit der Masse und der Energie

$$E = \frac{m \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad 1.2.9$$

besteht die Energie-Impuls-Beziehung

$$E^2 - \vec{p}^2 \cdot c^2 = m^2 \cdot c^4 \quad 1.2.10$$

$$E = \sqrt{m^2 \cdot c^4 + |\vec{p}|^2 \cdot c^2} \quad 1.2.11$$

Unter der Annahme einer Ruhemasse $m = 0$ für dementsprechendes Photon erhält man

$$E = |\vec{p}| \cdot c \quad 1.2.12$$

Demzufolge ist die Energie eines Lichtquants gleich seinem Impuls multipliziert mit der Lichtgeschwindigkeit.

Während in der klassischen Physik jeder Körper eine von Null verschiedene Masse hat, gilt die relativistische Energie-Impuls-Beziehung auch für masselose Teilchen des Photons.

Sie bewegen sich stets mit Lichtgeschwindigkeit.

Beim Photon hängt der Betrag des Impulses $|\vec{p}|$ von seiner Wellenlänge λ ab:

$$|\vec{p}_{\text{Photon}}| = \frac{h}{\lambda} \quad 1.2.13$$

wobei h das plancksche Wirkungsquantum ist.



Die Energie eines Photons ist bis auf den Faktor der Lichtgeschwindigkeit gleich dem Betrag seines Impulses:

$$E_{\text{Photon}} = |\vec{p}_{\text{Photon}}| \cdot c \quad 1.2.14$$

Die Schlussfolgerung dass der Betrag des Impuls $|\vec{p}|$, also die Energie eines Photons in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ zu suchen ist definiert für weitere Betrachtungen der Lichtwirkung auf den menschlichen Organismus einen entscheidenden Grundgedanken und erlaubt es eine Gesamtbetrachtung der Energien hinsichtlich der Farbwirkungen anzustellen.

Wie in Abb.3 kann jeder konkreten Wellenlänge λ auch eine Farbe mit dementsprechender kinetischer Energie der Photonen in Elektronenvolt zugeschrieben werden.

1.0.3 Überlagerung und Ausbreitung von Licht

1.0.3.1 Interferenzen

Eigenschaften des Lichts wie Absorption, Reflexion, Remission, Streuung, Brechung, sind hinreichend beschrieben. Lediglich die Interferenz und die Dispersion sollen noch einmal mit Beispielen charakterisiert werden.

Für die Interferenzerscheinungen des Lichts gibt es in der Natur vielfältige Beobachtungen.

Sie entsteht durch die Überlagerung von zwei oder mehreren Wellen nach dem *Superpositionsprinzip* (siehe Glossar) – also die Addition ihrer Amplituden (nicht der Intensitäten) während ihrer Durchdringung des Mediums.

Ein Beispiel für die Interferenz von Licht ist das vielfältige Farbspiel eines Ölfilms auf Wasser.



Abb.2 Interferenz von Licht

Obwohl das Phänomen der Interferenz aus der Wellentheorie der elektromagnetischen Natur des Lichts heraus betrachtet und erklärt werden kann so bietet doch die quantenelektrodynamische Betrachtung hier sinnvolle Einblicke.

Mit dem klassischen Interferenzversuch, bei dem ein einfallender Lichtstrahl durch ein optisches Element in zwei oder mehrere Teilstrahlen zerlegt wird, die, nach dem sie unterschiedliche Lichtwege zurückgelegt haben, wieder zusammengeführt werden und ihre typischen Überlagerungen darstellen, bereitet die Beschreibung der Interferenz keine Schwierigkeiten.

Problematisch wird die Erklärung aber wenn das einfallende Licht als räumlich lokalisiertes Lichtteilchen diskutiert wird.

Was geschieht mit dem Photon bei seinem Auftreffen auf einem Strahlenteiler ?

Teilt es sich ebenfalls oder erhält es seine Anfangsstruktur?

Tatsächlich gibt es kaum einen Zweifel daran, dass Photonen – im Sinne von Energiequanten – unteilbar sind.

Betrachtet man die logischen Folgen die sich aus der Teilung von Photonen ergeben würden müsste man in der Natur Energiequanten mit Energien von



$E = \frac{1}{2} h \cdot \nu$ 1.3.1.1 vorfinden.

Dieses Energieprodukt könnte aber auf keinen Fall – wollte man nicht das Bohrsche Atommodell in Frage stellen – absorbiert werden da die Energie eines halben Photons dem Atom nicht reicht um den Übergang in andere Energieniveaus ausführen zu können.

Sicherlich gibt es auch bei Photonen Interferenzerscheinungen aber immer nur in der Menge der in Betracht kommenden Überlagerung von Lichtquanten.

Entscheidend bei der Spezifizierung von Licht ist seine Wellenlänge λ . Nach dem Superpositionsprinzip überlagern sich nur Bedingungen gleicher physikalischer Größe was im Umkehrschluss bedeutet das sich auch nur Licht gleicher Wellenlänge überlagern und verstärken kann.

Das diese Behauptung stimmig ist kommt in der Abb. 2 deutlich zum Ausdruck.

Hinreichende Theorien der Quantenelektrodynamik (QED) umfassen die gesamt beschriebene Skala und bilden die moderne Grundlage einer Beschreibung materiell energetischer Zusammenhänge, inklusive der des Lichtes.