Über die Relativität der Masse und Energie des Lichtquanten

Dr. Sergej Reißig (Entwicklungs- und Forschungsbüro Reissig)

Der Gründer der Relativitätstheorie Albert Einstein hat in seinen bahnbrechenden Arbeiten, deren 100-Jähriges Jubiläum in diesem Jahr gefeiert wird, die Frage nach der Masse und Energie der Lichtstrahlung besonders behandelt. Er ist bekanntlich zum Schluss gekommen, dass die Masse und Energie so zusagen verschmolzen sind. Seine berühmte Gleichung -

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1)$$

zeigt, dass sich die Masse rasch vergrößert, wenn sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum nähert. Jahre später wurde postuliert, dass die Masse eines sogenannten ruhenden Photons gleich null ist. Es stellen sich dabei Fragen, Fragen die schon lange klare Antworten benötigen. Die erste Frage mit der wir uns zu konfrontieren haben, ist die folgende – was ist unter einem ruhenden Photon zu verstehen, in einem welchen Zustand soll es sich dann diesbezüglich befinden. Heute wissen wir, dass sich die Photonen mit der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum fortpflanzen. Und diese Geschwindigkeit ist stets konstant, was wiederum bedeuten sollte, dass ein Lichtteilchen sich ständig bewegt und im wahrsten Sinne des Wortes nicht zur Ruhe kommt. Die zweite Frage, die uns auch beschäftigen sollte, ist die Frage nach der Existenz der Energie des Photons, wenn es sich in einem Zustand, den wir jedoch als „ruhend“ kennzeichnen, befindet. Denn wenn die Gültigkeit der Einstein'schen Formel $E = mc^2$ nicht zu bezweifeln ist, ist die Energie eines Photons, dass sich im „ruhenden“ Zustande befindet, entsprechend der strengen mathematischen Logik, gleich null:

$$E_{rh} = m_{ruhendes\ Photon} \cdot c^2 = 0 \cdot c^2 = 0$$

An der EPS-12 [1] Konferenz wurde ein neues Modell des Photons vorgestellt. Nach diesem Modell, wird ein Photon als ein sich im Kraftfeld drehendes materielles Partikel betrachtet. Durch die Kreis- bzw. orbitale Bewegungen des Lichtquanten in einem Kraftfeld, ließen sich die rätselhaften, dualistischen Eigenschaften des Photons anschaulich aufklären und die deutlich determinierte Verbindung zwischen der Kreisbahnbewegung und der Wellenlänge der Strahlung feststellen. Diese offenbarte Abhängigkeit zwischen der Schwingung bzw. Wellenlänge und der Kreiselbewegung führte zu einer neuartigen Zeittransformation, die es zum ersten Male ermöglichte, die Zeitintervalle mit der Änderung der Wellenlänge zu verbinden.

Dem vorgeschlagenen Modell zufolge, kann die effektive Masse bzw. Impuls des Lichtpartikels unter anderem für den Fall der Sonnenbestrahlung einer unbewegten, schwarzen Oberfläche aufgrund der Äquivalenz der Planck- und Einsteingesetze errechnet werden:

$$hf = mc^2 \text{ oder } m = \frac{h}{\lambda c} \quad (2)$$

Es ist ersichtlich, dass die erfolgreiche Bestimmung der Masse erforderte die Kenntnis der Größe der Wellenlänge. Um diese unbekannte Größe ermitteln zu können, wurde das sogenannte Wien-Verschiebungsgesetz

$$\lambda T = 2{,}8977686 \times 10^{-3} \quad (3)$$

verwendet. Dieses Gesetz wurde weiterhin auch bei der Ableitung des Stefan – Boltzmann Strahlungsgesetzes aus der hergeleiteten Gleichung für die Leistung eines Photons -

$$L = hf^2$$

- [2,3] erfolgreich eingesetzt [4,5]. Um die Wellenlänge in Gl. (3) berechnen zu können, muss noch eine charakteristische, höchstwahrscheinlichste Temperatur des strahlenden Körpers ermittelt werden. Da in diesem Fall die Sonne der strahlende Körper ist, wurde die Sonnentemperatur von 5777 K° zugrunde gelegt. Es ergab sich:

$$\lambda = 2.8977686 \times 10^{-3} / 5777 = 501.6043967 \times 10^{-9} \text{ [m]}$$

Fügt man diesen Wert in die Gleichung (2) ein, so erhält man die Masse (Trägheit) der von der Sonne emittierten und an einer schwarzen Oberfläche absorbierten Photonen:

$$m = \frac{6.62606876 \times 10^{-34}}{501.6043967 \times 10^{-9} \cdot 2.99792458 \times 10^{8}} = 4.40629836 \times 10^{-36} \text{ [kg]}$$

Dieser erhaltene Wert unterscheidet sich wesentlich von dem Wert, den die chinesischen Wissenschaftler in ihren Experimenten [6] gemessen $-\ 1.2 \times 10^{-54}$ [kg] und in 2003 veröffentlicht haben.
Im Laufe meiner weiteren Forschungen, der konsequenten und permanenten Entwicklung der Lichttheorie bin ich der Frage - welches Ergebnis nun korrekt, welches falsch ist, sorgfältig nachgegangen. Das aufmerksame Studieren der originalen Werke von Einstein, Planck, Wien und anderen samt mit den neusten Ergebnissen, die die neue Theorie geliefert hat, führte zu einer Reihe von Schlussfolgerungen, auf die jetzt eingegangen werden muss.

Im Jahre 1905 hat A. Einstein seinen revolutionären und heute weltberühmten Artikel über den photoelektrischen Effekt veröffentlicht. In diesem bahnbrechenden Artikel versuchte er die in den Experimenten beobachteten und von der Theorie abweichenden Ergebnisse zu erklären. Laut der damaligen Wellentheorie des Lichtes, sollte die steigende Intensität des Lichtes die Spannung der metallischen Oberfläche entsprechend vergrößern. Es wurde aber paradoxerweise keine Abhängigkeit von der Intensität, sondern von der Frequenz (Schwingungszahl) einer Strahlquelle festgestellt. Zahlreiche Versuche, dieses ernstzunehmende Phänomen anhand der Wellentheorie der elektromagnetischen Strahlung aufzuklären, sind gescheitert. Einstein griff zur längst vergessenen Hypothese von Isaac Newton. Newton hat damals am Ende des 17en Jahrhundert nach seinen optischen Experimenten und Beobachtungen die sogenannte korpuskulare Theorie des Lichtes vorgeschlagen. Er war der Meinung, dass Licht aus sehr kleinen materiellen Partikeln besteht. Der ähnlichen Meinung war anscheinend auch Einstein, als er erneut, den Lichtquanten die materiellen Eigenschaften zuweist. Ein materielles Teilchen sollte demzufolge Energie und Masse besitzen. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache und des Energieerhaltungsgesetzes ist es Einstein gelungen, die bekannte Formel für die Berechnung der freigesetzten Elektronenenergie herzuleiten, die später experimentell bestätigt wurde.

Trotz all diesen Erfolgen, die die neue Theorie hervorgebracht hat, waren viele Physiker, unter ihnen auch Max Plank, von der Theorie, die Licht als Sammlung der bewegenden massebesitzenden Partikel zugrunde gelegt hat, nicht überzeugt. Die meisten Physiker von damaliger Zeit waren dagegen fester Überzeugung, dass Licht nichts anderes sei, als eine massenlose elektromagnetische Welle.
Erst 1919 wird die korpuskulare Einsteinsche Lichttheorie dank der verblüffenden Übereinstimmung zwischen der von Einstein vorhersagten und berechneten Ablenkung der Lichtstahlen und den während der totalen Sonnenfinsternis beobachteten Verschiebungen der Sternpositionen weltweit anerkannt. Zwei Jahre später wurde Einstein mit der höchsten wissenschaftlichen Auszeichnung – dem Nobelpreis für Physik geehrt.

Wie ist es dem jungen und mutigen Einstein gelungen, so eine bahnbrechende und präzise Errechnung machen zu können? Um dies zu verstehen, widmen wir uns dem Buch „Über spezielle und allgemeine Relativitätstheorie“ [7]. So erklärt Einstein die beobachtete Ablenkung eines Lichtstahls: „ Es sei hinzugefügt, dass diese Ablenkung nach der Theorie zur Hälfte durch das *Newtonsche Anziehungsfeld* der Sonne, zur Hälfte durch die von der Sonne herrührende *geometrische Modifikation („Krümmung“) des Raumes* erzeugt wird.“ Die Anziehungskraft der Sonne können wir jetzt entsprechend der Einsteinschen Erklärung wie folgt bestimmen:

$$F_{SAK} = G\frac{mM_S}{r^2} \tag{4}$$

wobei F_{SAK} - die Anziehungskraft und M_S - die Masse der Sonne, m -Masse des Photons und r - Entfernung von der Sonne sind. Nimmt man jetzt nun an, dass die Photonenmasse gleich 0 wäre, so wäre laut der Formel (4) eine nullte, nicht existierende Anziehungskraft der Sonne zu erhalten. Und diese Schlussfolgerung würde sich im krassen Widerspruch mit der Einsteinschen Theorie befinden, die 1919 triumphal bestätigt worden ist.

Wirkungsquantum, Photon und Energieaustausch

In diesem Teil der Arbeit wird dargelegt, wie die Masse, die bekanntlich die Äquivalenz der Energie darstellt, Impuls und Energie sich entsprechend der Zustände ändern und dementsprechend selbst relativistisch sind. Bevor wir darauf eingehen, müssen wir noch eine wichtige Frage beantworten: was ist unter einem Photon bzw. Wirkungsquantum einerseits und einem ruhenden Photon andererseits zu verstehen?

Betrachten wir nun eine Lichtquelle z. B. Laser, der Photonen in eine bestimmte Richtung emittiert. In einem Gedankenexperiment stellen wir uns auch vor, dass dabei zwei unterschiedliche Fälle möglich sind: im ersten Experimente „bombardieren" die Photonen eine Oberfläche, im zweiten Experiment werden sie von keinem Medium, weder von der Luft noch von den Atomen einer Oberfläche zerstreut – der Laser sendet Photonen in den leeren Raum. Welche Beobachtungen kämen dabei zustande?

Experiment 1. Der Lichtstrahl tritt auf eine ruhende Platte auf, die Stelle der Wechselwirkung leuchtet mit einer entsprechenden Lichtfarbe. Licht wird zerstreut und in der Platte werden Wärme bzw. Elektroenergie erzeugt. Die Photonen sind sichtbar und setzen die Energie frei.

Experiment 2. Der Lichtstrahl wird nicht zerstreut, es findet keine Wechselwirkung und demzufolge kein Energieaustausch statt. Die Photonen sind unsichtbar geworden, sie sind jetzt „Phantome". Sie besitzen zwar Energie, setzen diese aber nicht frei. Diese verborgene, potentielle bzw. latente Energie kann offensichtlich nach Planck'schen Formel so definiert werden:

$$E_{Pot} = hf \tag{5}$$

Die Bewegungs- bzw. Impulsenergie der Lichtquanten – ist die Energie, die nach dem Stoß mit einem schwarzen Objekt freigesetzt wird und kann mit dem Verhältnis von Einstein:

$$E_I = mc^2 \tag{6}$$

ausgedruckt werden.

Wenn die Photonen mit einer Oberfläche kollidieren, wird die latente Energie in die Impulsenergie umgewandelt. Diese Impulsenergie $E_i = pc$, wird dann von uns und unseren Messgeräten als Licht, Wärme – bzw. Elektrodynamische Energie wahrgenommen und genutzt. Dabei ist sie der potentiellen Energie äquivalent, mit anderen Worten gilt:

$$E_I \sim E_{Pot} \qquad pc \sim hf \tag{7}$$

Treten aber die Photonen nicht in Erscheinung, so bedeutet das für einen Beobachter, dass der Energieaustausch nicht stattgefunden hat. Die latente Energie hat sich nicht in die Impulsenergie umwandeln lassen. Also sind die Impulsenergie, Impuls und die Masse gleich null in diesem Falle. Diesen Zustand können wir nun als ein Fall eines „ruhenden", sprich nicht kollidierenden und unsichtbaren Photons bezeichnen. Das Photon ist hierbei kein Wirkungsquantum mehr, im wahrsten sinne des Wortes, denn die Wechselwirkung bzw. zeitliche Energieumwandlung ist nicht passiert. Es besitzt typische Welleneigenschaften, die mit den Wellengleichungen beschrieben werden können. Fällt aber ein Photon auf ein Medium bzw. Körper auf, ändert sich sein Zustand, die potentielle, latente Energie wandelt sich in die Impulsenergie um. Das massenlose Phantom verwandelt sich ins sichtbare, träge Photon, das ab jetzt nun Kraft und Impuls ausübt. Diese zeitlichabhängige Zustands- bzw. Energieänderung kann so schematisch und vereinfacht dargestellt werden:

$$\frac{dE_{Pot}}{dt} \neq 0 \text{ und } F \sim \frac{dE_{Pot}}{dt} \sim c\frac{dm}{dt} \sim c\frac{\Delta m}{\Delta t} \neq 0 \tag{8}$$

Es sei bemerkt, dass die gewonnene Impulsenergie von der latenten Energie eines Photons, von den Eigenschaften und Zuständen der Zerstreuungsoberfläche - bzw. des Mediums abhängig ist.

Die beschriebenen Zustände eines Photons kann man mit Hilfe der Betrachtung des Verhalten von materiellen Kügelchen in zwei unterschiedlichen Fällen so veranschaulichen:

Fall 1. Ruhende Kugeln. Die Kugeln liegen ruhig auf einer Platte, die auf einer bestimmten Höhe befestigt ist.

Fall 2. Freifallende Kugeln. In einem Augenblick werden die Kugeln zu einem freien Fall gebracht.

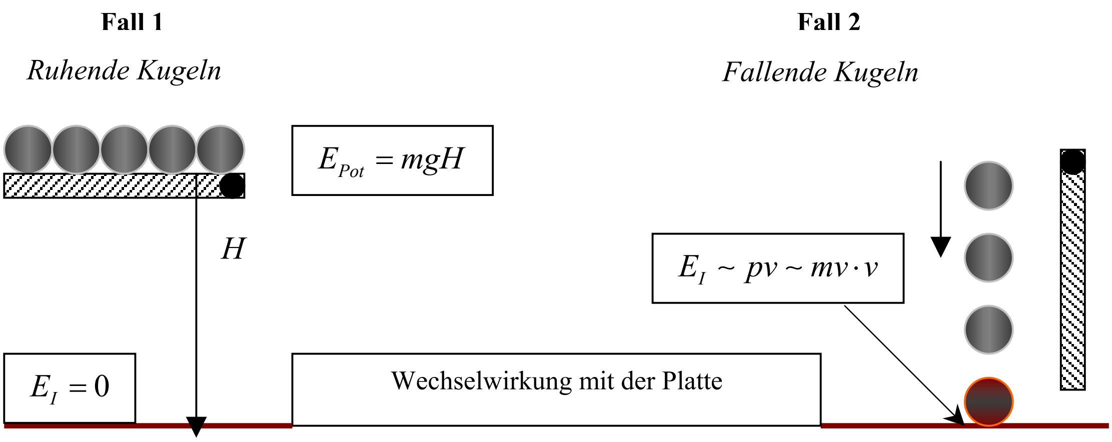

Abb. 1

Zerstreuung und Absorption der Phontonen auf einem schwarzen, bewegenden Körper

Aufgrund der oben durchgeführten Analyse wurde gezeigt, dass die Masse bzw. Impulsenergie einerseits von der latenten bzw. potentiellen Energie der elektromagnetischen Partikeln, andererseits von der Anwesenheit eines Körpers, der die Wechselwirkung ermöglicht und die Wirkungsquanten freisetzen lässt, abhängig ist. Dabei ist man davon ausgegangen, dass der Körper ein schwarzer, sich unbewegender Körper ist. In der Praxis haben wir jedoch öfter mit Objekten, die sich in Bewegung befinden, zu tun. Die Frage nach der Abhängigkeit der Photonenmasse von dem kinematischen Zustand des zu bestrahlenden Objektes wird hierbei behandelt werden. Dafür machen wir eine Annahme, dass sich die Lichtquelle in einem ruhenden Koordinatensystem (X,Y) befindet und die Lichtquanten, die sich wiederum auf einen schwarzen und im System (x',y') bewegenden Körper auffallen, sendet. Das Objekt - Koordinatensystem (x',y') bewegt sich mit einer Geschwindigkeit v parallel der x-Achse.

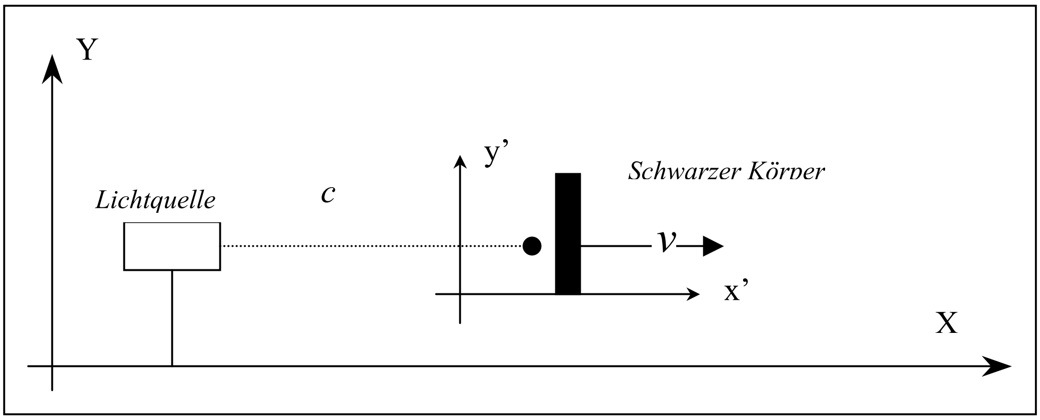

Abb. 2

Im Werk: „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig“ [8] hat Einstein für den betrachteten Fall eine Formel abgeleitet, von der wir im folgenden Gebrauch machen:

$$E = E_0 \frac{1 - \frac{v}{c}\cos\varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \tag{9}$$

wobei E_0 - die Energie der Strahlung bezogen auf System (X,Y), E - die Energie im System (x',y'), φ - Winkel zwischen der Strahlungsrichtung und der X-Achse bedeutet.

In unserem Fall ist der Winkel φ gleich 0 und die Energiemenge E_0 stellt, wie gezeigt wurde, die latente Energie dar, die nach der Planckschen Formel (5) zu finden ist. Die gesuchte Energie E stellt entsprechend der oben erläuteten Bezeichnung die Impulsenergie eines Lichtquanten dar und ist nach der Einsteinschen Gleichung (6) zu berechnen. Für eine absolut schwarze Fläche folgt schließlich:

$$mc^2 = hf \frac{1-\frac{v}{c}}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \tag{10}$$

oder

$$m = hf \frac{1-\frac{v}{c}}{c^2\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \tag{10.1}$$

Die Gleichung 10.1 kann durch die mathematische Prozedur zu einer vereinfachten Darstellung, wie im folgenden gezeigt wird, umgeformt werden:

$$m = \frac{h}{\lambda c} \cdot \sqrt{\frac{1-\frac{v}{c}}{1+\frac{v}{c}}} = \frac{const}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{1-\frac{v}{c}}{1+\frac{v}{c}}} = \frac{2.2102186 \times 10^{-42}}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{1-\frac{v}{c}}{1+\frac{v}{c}}} \text{ [kg]} \tag{10.2}$$

Mit Hilfe der Gl. (10.2) ist es möglich, das Verhalten der Photonenmasse in Abhängigkeit von der Änderung der Geschwindigkeit einer mit Sonnenlicht bestrahlten und sich von der Lichtquelle entfernenden Oberfläche zu gewinnen. Die Ergebnisse dieser Rechnung sind in Bild 3 zu sehen.

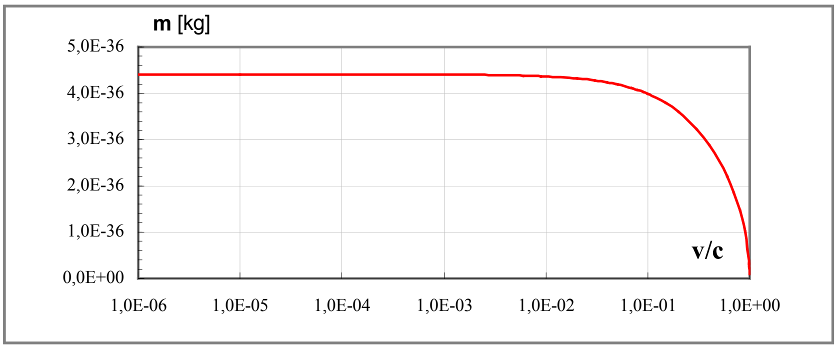

Abb. 3 Masse des Photons m in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des schwarzen Körpers. Wellenlänge λ ist gleich 501.6043967 nm

Da die realen Körper bzw. Körperoberflächen eine gewisse Abspiegelungseigenschaft, die Effizienz der Wechselwirkung verringert, besitzen, ist hierbei damit zu rechnen, dass sich die Masse bzw. freigesetzte Energie um einen Beitrag, der dem Spiegel- bzw. Absorptionsgrad entsprechend äquivalent ist, reduziert.

Der auf einer nicht schwarzen Platte ablaufende Strahlungsvorgang kann anhand der folgenden Gleichungen so repräsentiert werden:

$$E_{Pot} - E_S = E_W \tag{11.1}$$

oder

$$hf - k_S \cdot hf = hf \cdot (1-k_S) = E_W \tag{11.2}$$

wobei E_S - die Teilenergie der Strahlung, die abgespiegelt wird, E_W - die Energie, die nach der Wechselwirkung freigesetzt wird und k_S - der Abspiegelungskoeffizient ist. Nimmt der Abspiegelungskoeffizient den Wert 0 an, so stellt die Wirkungsfläche eine absolut schwarze Oberfläche dar. Würden die Lichtquanten auf einen idealen Spiegel auffallen, wäre der Abspiegelungskoeffizient exakt 1. Dies würde wiederum bedeuten, dass die Photonen durch einen Spiegel praktisch ohne irgendwelche Energieverluste- bzw. Änderungen umgelenkt werden.

Diese neuartige Betrachtung kann uns jetzt helfen, die Ergebnisse der Arbeit [6] zu interpretieren. Entnehmend der Arbeit [6], wurde die Photonenmasse- bzw. Impuls durch die Laserbestrahlung eines, auf der Torsionswaage befestigten Spiegels, bestimmt. Der in den durchgeführten Experimenten gemessene Wert war vernachlässigbar gering, weichte jedoch von einer exakten Null ab. Diese geringfügige Diskrepanz ist auf eine äußert kleine Wirkung (könnte z. B. atomare Reibung, Dissipation sein) der Spiegeloberfläche auf den Photonenlauf zurückzuführen. Der Beitrag der dissipativen Energie, der bei der Bewegung der Photonen im Inneren des Spiegels zustande kommt, lässt sich nun anhand der in [6] gewonnenen Resultate und der Formel (11.2) in folgender Weise errechnen:

$$\Delta E = hf(1-k_s) = c^2\Delta m \tag{12}$$

Der in [6] ermittelte Wert für die Masse beträgt 1.2×10^{-51} g oder 1.2×10^{-54} kg. Im Falle eines idealen Spiegels wäre die Impulsenergie und die Wirkungs- bzw. Impulsmasse noch kleiner, nämlich gleich 0. Nach Gl. (12) ergibt sich die gesuchte, vom Spiegel verursachte Dissipations- bzw. Wirkungsenergie:

$$\Delta E = (2.99792458\times10^{8})^2\cdot(1.2\times10^{-54}-0) = 1.0785062\times10^{-37}\ \text{[J]} \tag{12.1}$$

Ist die Frequenz der Strahlung bekannt, so kann nach Formel (12) und mit dem Resultat (12.1) der Abspiegelungskoeffizient des Spiegels genau bestimmt werden.

Die hergeleiteten Gleichungen (10.1) und (10.2) führen zu einer interessanten Folgerung: bewegt sich die zu bestrahlende Oberfläche mit Lichtgeschwindigkeit, findet keine Übertragung der Energie bzw. Trägheit (Einsteinsche Formulierung [8]) zwischen den emittierenden und absorbierenden Körpern (Lichtquelle - Fläche) statt. Die Photonen bleiben demzufolge unsichtbar und treten nicht in Erscheinung.

References

1. About the dualism of the light, S. Reißig EPS-12, General conference of the European Physical Society, Trends in Physics, P2-92
2. About the calculation of the photon power, S. Reißig, Bulletin of the APS, March Meeting 2004, Part I, Montreal, Vol. 49, No. 1, p. 255
3. About the calculation of the photon power, S. Reißig, Lecture on the APS March Meeting, 2004, http://www.efbr.org/de/publikationen/EFBR%20Publikationen.htm
4. The photon power and Stefan - Boltzmann Radiation Law, S. Reißig, Bulletin of the APS, March Meeting 2004, Part I, Montreal, Vol. 49, No. 1, p. 255
5. The photon power and Stefan - Boltzmann Radiation Law, S. Reißig, Lecture on the APS March Meeting, 2004, http://www.efbr.org/de/publikationen/EFBR%20Publikationen.htm
6. New experimental limit on the photon rest mass with a rotating torsion balance, J. Luo, L Tu, Z Hu, E. Luan, Physical Review letters, 2003, Vol. 90, N 8
7. Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie, A. Einstein, Springer - Verlag, 2001, 112 S
8. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig, A. Einstein, Annalen der Physik, Bd. 18, 1905, S. 639-641

Erlangen, den 6 April 2005