

(Dies ist ein Teil des Buchs [Der Begriff der Wirklichkeit.pdf](#))

Heinz Heinzmann

Der Lichtelektrische Effekt

Die experimentellen Fakten zum Lichtelektrischen Effekt:

Wird eine Metallplatte mit UV-Licht bestrahlt, dessen Frequenz ν über einer Grenze ν_{\min} liegt, dann werden ohne messbare Verzögerung Elektronen freigesetzt, deren kinetische Energie nur von der Frequenz ν der Strahlung abhängt.

Das steht in eklatantem Widerspruch zum Wellenbild des Lichts, demzufolge die Energie der Elektronen von der Intensität des Lichts abhängen müsste und ihre Ablösung bei jeder beliebigen Frequenz erfolgen sollte. Überdies wäre eine geradezu enorme Verzögerung (unter realistischen Bedingungen tausende Stunden) bis zur Ablösung des ersten Elektrons zu erwarten, wenn man annimmt, dass die auf eine Fläche der Größenordnung des Elektronenquerschnitts eingestrahlte Lichtenergie sich bis zum erforderlichen Wert summieren müsste.

Einsteins Lösung ist bekanntlich, die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie als *Stossprozess* von Teilchen aufzufassen, und zwar eines Lichtquants mit der Energie $h\nu$ und eines Elektrons, das mit der Energie A gebunden ist. Aus der Energiebilanz ergibt sich dann die Beziehung

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2} \quad (A \dots \text{ Ablösearbeit}) \quad (1)$$

Durch die Gleichung wird der Vorgang auf eine Weise beschrieben, die mit dem Experiment übereinstimmt. Insofern ist es sicher gerechtfertigt, dies als korrekte, erfolgreiche Beschreibung aufzufassen.

Allerdings würde man es doch vorziehen zu wissen, *wie* diese wunderbare Verwandlung einer Welle in ein Teilchen vor sich gegangen ist – immerhin ist eindeutig bewiesen, dass Licht eine Welle ist.

Man stelle sich vergleichsweise folgende Szene vor: ein Zauberer stellt einen leeren Zylinderhut auf einen Tisch, legt eine Trompete hinein und spricht seine Zauberformel. Aus dem Zylinder springt ein

Schwein – und nun weiß man bloß die Geschwindigkeit des Schweins. Trotz des zweifellos vorhandenen praktischen Nutzens – man könnte dem nächsten Schwein wahrscheinlich ausweichen – wäre man damit wohl kaum zufrieden!

In diesem Fall würden wir aber doch keineswegs annehmen, dass eine wirkliche Verwandlung der Trompete in ein Schwein stattgefunden hat. Warum nicht? Ganz einfach: es gibt keine Zauberei.

Warum nehmen wir aber dann die Verwandlung der Welle in ein Teilchen als Tatsache hin?

Der übliche Kommentar – der sich als Erklärung ausgibt – lautet: Unser Denken ist nur für mittlere Größenordnung geeignet. Sehr Kleines entzieht sich unserem Begriff.

Ersetzen wir doch diese haltlose Behauptung, die für sich allein genommen völlig aus der Luft gegriffen ist und bloß dazu dient, Widersprüche zu vernebeln, ganz einfach durch die

No-Nonsense Hypothese: *Es gibt keine Zauberei. Es gibt in der Natur überhaupt keinen Unsinn irgendwelcher Art.*

Mit dieser Hypothese gerüstet wenden wir uns nun wieder dem Lichtelektrischen Effekt zu.

Dass Licht sich wellenartig verhält, ist vollständig gesichert. Also *ist* es eine Welle. Da es keine Zauberei gibt, verwandelt es sich *nicht* in ein Teilchen – somit muss es in die Wechselwirkung als Welle eintreten.

Zugleich ist aber bekannt, wie eingangs festgestellt, dass es nicht möglich ist, den Lichtelektrischen Effekt als Wechselwirkung zwischen Welle und Teilchen darzustellen.

Also gibt es nur eine einzige Möglichkeit: auch das Elektron muss eine Welle sein.

Aber das Elektron ist doch ein Teilchen! Machen wir uns mit der Annahme, es sei nun eine Welle, nicht erst recht wieder des Glaubens an Hexerei schuldig?

Keineswegs. Ein Teilchen ist nämlich mit seinen Attributen (Wechselwirkungen) nicht *logisch*, sondern bloß *per definitionem* verbunden, und somit ändert sich seine Definition zugleich mit der Änderung der Beschreibung der Wechselwirkung. Wenn es also gelingt, die Wechselwirkung unter der Voraussetzung zu beschreiben, dass das Elektron eine Welle ist, dann hat sich seine Definition geändert – mit anderen Worten: dann war es auch schon vorher eine Welle.

Hingegen ist eine Welle mit ihren Attributen (Wechselwirkungen) *logisch* verbunden: ihre Attribute folgen aus ihrer eigenen Dynamik. Bei einer Welle besteht daher keine Möglichkeit zu einer anderen Definition. Eine Beschreibung der Wechselwirkung, in die eine Welle nicht als Welle eintritt, sondern als Teilchen – wie das in der Darstellung von Einstein der Fall ist – kann also die Definition der Welle nicht ändern; in diesem Fall bleibt die Annahme der Verwandlung (bzw. des Dualismus) unumgänglich.

Die No-Nonsense Hypothese hat uns also zu der Annahme geführt, dass sowohl Licht als auch Elektron *Wellen* sind.

Wie können Wellen *als Wellen* überhaupt wechselwirken? Am einfachsten durch *Superposition*. Wir werden also die Wechselwirkung als Überlagerung der beiden Wellen darstellen.

Zunächst eine Vorüberlegung: Angenommen, in einem Elektron existiere eine Schwingung mit der Frequenz ν . Was bedeutet dann, dass das Elektron *ruht*? Es bedeutet, dass die Schwingung *gleichphasig* ist, denn bei Gleichphasigkeit gibt es keine Bewegung. Also gilt für ein ruhendes Elektron

$$y = \cos 2\pi t \nu$$

(Das ist die bekannte Schlussfolgerung von de Broglie.) Für ein mit der Geschwindigkeit v bewegtes Elektron ergibt die Lorentz-Transformation

$$y = \cos 2\pi \left(t \nu \frac{1}{k} - x \nu \frac{v}{c^2} \frac{1}{k} \right) \quad \left(k = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)$$

Die Frequenz ν_e eines mit der Geschwindigkeit v bewegten Elektrons verhält sich zur Frequenz ν_{e_0} eines ruhenden Elektrons also wie

$$\frac{\nu_e}{\nu_{e_0}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{k} \quad (2)$$

Für nichtrelativistische Elektronen ist v klein gegen c und daher gilt

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx \frac{1}{1 - \frac{v^2}{2c^2}} \approx 1 + \frac{v^2}{2c^2} \quad (3)$$

Jetzt zur Wechselwirkung. Zunächst betrachten wir die Wechselwirkung zwischen Licht und einem freien Elektron.

Sei also ν_{e_0} die Frequenz eines ruhenden, nicht gebundenen Elektrons vor der Wechselwirkung, ν_e die Frequenz des nach der Wechselwirkung mit der Geschwindigkeit v bewegten Elektrons.

Wir bilden eine Überlagerung aus der das Elektron repräsentierenden¹ gleichphasigen Schwingung

$$y = \cos 2\pi t \nu_{e_0}$$

und einer das Licht repräsentierenden ebenen Welle

$$y = \cos 2\pi \left(t \nu_L - x \frac{1}{\lambda_L} \right)$$

Aus dem Sumpensatz für Winkelfunktionen

$$2 \cos a \cos b = \cos(a + b) + \cos(a - b) \quad (4)$$

folgt, dass wir durch die Überlagerung zwei Wellen mit den Frequenzen

$$\nu_{e_0} \pm \nu_L$$

erhalten (wo ν_L die Frequenz des Lichts ist).

¹ Es kann natürlich nicht behauptet werden, das Elektron *sei* diese Schwingung. Aber aus der Tatsache, dass diese Schwingung auftritt, lassen sich Schlüsse ziehen.

Die höhere Frequenz muss der Frequenz ν_e des durch die Wechselwirkung *beschleunigten* Elektrons entsprechen, also nach (2)

$$\nu_e = \nu_{e_0} + \nu_L = \nu_{e_0} \frac{1}{k} \quad (5)$$

(Die zweite Frequenz diskutieren wir gleich anschließend.)

Dann ist $\nu_L = \nu_{e_0} \left(\frac{1}{k} - 1 \right)$ und nach (3)

$$\nu_L = \nu_{e_0} \frac{v^2}{2c^2} \quad (6)$$

Das Quadrat der Geschwindigkeit des Elektrons nach der Wechselwirkung ist also auch hier proportional zur Frequenz des Lichts.

(Für die zweite Frequenz müssten wir setzen

$$\nu_e = \nu_{e_0} - \nu_L = \nu_{e_0} k \quad (5')$$

Nach (3) ist aber $k \approx 1 - \frac{v^2}{2c^2}$

und wir erhalten wieder $\nu_L = \nu_{e_0} \frac{v^2}{2c^2}$

Die Frequenz der zweiten Welle entspräche also der Frequenz eines Elektrons, dessen Geschwindigkeit infolge der Wechselwirkung um v *vermindert* ist. Da wir aber von einem ruhenden Elektron ausgegangen sind, so dass ν_{e_0} nicht weiter verkleinert werden kann, entfällt dieser Teil.)

Bisher haben wir bloß einfache Wellenmathematik angewendet. Um in die Welt der physikalischen Modellbildungen zurückzukehren, multiplizieren wir (6) mit h :

(Hier ist aber die Tatsache, dass h eine fundamentale *Einheit* darstellt, ohne Bedeutung – die Multiplikation ist nur aus Dimensionsgründen erforderlich, um auf die "mechanische" Beschreibung überwechseln zu können. Wir werden diesen Schritt anschließend ausführlicher besprechen.)

$$h\nu_L = h\nu_{e_0} \frac{v^2}{2c^2} = m_e c^2 \frac{v^2}{2c^2} \quad (6)$$

Wir erhalten
$$h\nu_L = \frac{m_e v^2}{2} \quad (7)$$

Um dieses Verfahren auf die Wechselwirkung von Licht mit einem gebundenen Elektron zu übertragen, müssen wir nur in (5) den Frequenzunterschied δ_ν zwischen einem gebundenen und einem freien Elektron einfügen

$$\nu_e = \nu_{e_0} + \nu_L - \delta_\nu = \nu_{e_0} \frac{1}{k} \quad (8)$$

und dieses δ_ν mitlaufen lassen, also

$$h\nu_L - h\delta_\nu = h\nu_{e_0} \frac{v^2}{2c^2} = m_e c^2 \frac{v^2}{2c^2} \quad (8')$$

So gelangen wir schließlich zu
$$h\nu_L = \frac{m_e v^2}{2} + h\delta_\nu \quad (9)$$

und das ist identisch mit (1).

Vergleichen wir nun die beiden Modelle – das übliche, einem mechanischen Stoß analoge Modell und das hier vorgeschlagene Wellenüberlagerungsmodell.

Die Tatsache, dass die Geschwindigkeit bzw. die Energie der Elektronen nach der Wechselwirkung nur von der Frequenz des Lichts abhängt, lässt sich im mechanischen Stoßmodell nur so erklären, dass immer gleiche, unteilbare, durch ihre Frequenz definierte Lichtteilchen mit den Elektronen in

Wechselwirkung treten. (Gäbe es auch andere oder geteilte Lichtteilchen, dann wären nach dem Stoß auch Elektronen mit anderen Geschwindigkeiten zu erwarten.)

Im Wellenmodell hingegen ist diese Tatsache selbstverständlich: Hier verlassen die "Elektronen" die Metallplatte in einem stetigen Prozess, *als Wellen*, deren Frequenz aus der Überlagerung von Licht- und Elektronenwellen folgt. Gemäß Gleichung (4) sind daher nach der Wechselwirkung keine anderen Frequenzen und damit auch keine anderen Energien und Geschwindigkeiten möglich – Wellenüberlagerungen lassen keine anderen Resultate zu. In diesem Modell ist somit klar ersichtlich, warum die Amplitude bzw. die Intensität des Lichts gleichgültig ist, und ebenso, warum keine Verzögerung bis zur ersten Messung auftritt: der Überlagerungsprozess setzt augenblicklich ein. Die Annahme unteilbarer Lichtteilchen ist im Wellenmodell also überflüssig.

Der wichtigste Punkt ist aber der folgende, denn hier wird zum ersten mal der Kern der neuen Interpretation erkennbar:

Die Gleichung
$$\nu_L = \nu_{e_0} \frac{v^2}{2c^2} \tag{6}$$

enthält bereits das wesentliche Ergebnis: das Quadrat der Geschwindigkeit eines freien Elektrons nach der Wechselwirkung mit Licht ist nur von der Frequenz des Lichts abhängig (– für ein gebundenes Elektron muss links noch der Term $-\delta_\nu$ eingefügt werden).

Für die Ableitung dieser Gleichung werden nur zwei Voraussetzungen benötigt:

1. Sowohl Licht als auch Elektron sind *Wellen*.
2. Die Lorentz-Transformation gilt.

Ansonsten gehen *keine physikalischen Voraussetzungen* in die Ableitung ein.

Erst nach der Multiplikation von (6) mit h , also für den Schritt von (6') auf (7):

$$h\nu_L = h\nu_{e_0} \frac{v^2}{2c^2} = m_e c^2 \frac{v^2}{2c^2} \tag{6'}$$

$$h\nu_L = \frac{m_e v^2}{2} \quad (7)$$

– und für die physikalische Interpretation von (7) werden die Begriffe *Energie* und *Masse* gebraucht sowie die zwischen diesen Begriffen und der Frequenz geltende Beziehung

$$h\nu = mc^2 = E$$

Mit anderen Worten: Für die Beschreibung der Wechselwirkung zwischen Licht und Elektron beim Lichtelektrischen Effekt ist die Annahme ausreichend, dass beide Partner Wellen sind. Nicht nur die Annahme von Lichtquanten ist überflüssig – es kann auf *alle* physikalischen Begriffe und Zusammenhänge verzichtet werden. Erst beim Übergang zu einer mechanischen Beschreibung der gewohnten Art treten die Begriffe auf, die sonst die notwendige Basis der Beschreibung bilden: Masse, kinetische Energie, Gesamtenergie.

Hier stehen also die Beschreibungen durch Wellen und durch Teilchen nicht nebeneinander, sondern es besteht eine hierarchische Beziehung zwischen beiden: Die Wellenbeschreibung kommt zuerst – sie ist *fundamental*; die Teilchenbeschreibung ist ihr nachgeordnet – sie ist *abgeleitet*.

Die Gleichungen $E = h\nu$ und $p = h/\lambda$ sind daher in diesem Fall kein Beweis für den Welle-Teilchen-Dualismus; sie sind **Definitionsgleichungen** für die Größen Energie und Impuls.

Der Begriff *Energie* wird auf den Begriff *Frequenz zurückgeführt*, und der Begriff *Impuls* auf den Begriff *Wellenlänge*.²

Es ist klar: Wenn diese Interpretation, die sich beim Lichtelektrischen Effekt auf ganz natürliche Weise ergibt, tragfähig ist, dann ändert sich formal *nichts* – begrifflich und konzeptionell ändert sich aber *alles*.

Ich fasse zusammen. Wie zu sehen ist, lässt sich der Lichtelektrische Effekt auf zwei Arten darstellen:

1. Nach dem mechanischen Stoßmodell. Beide Partner werden als Teilchen aufgefasst.

² Vollständig wird diese Rückführung allerdings erst, wenn die Einheit der Masse als selbständiges Konzept beseitigt ist, so dass h seine Rolle als Bindeglied zwischen Wellen und Teilchen verliert. Das kann aber erst im zweiten Teil durchgeführt werden. (In 6. Ein Universum ohne Masse.)

Dann muss entweder eine *objektiv dualistische* Position eingenommen werden (Quanten, die die gesamte Energie tragen, sind in die Wellen eingebettet – dies war Einsteins, de Broglies und später Bohms Standpunkt) oder es muss *Komplementarität* angenommen werden (dies ist die Kopenhagener Interpretation).

Die dualistische Position führt zur expliziten Nichtlokalität, die Kopenhagener Interpretation führt zum Verzicht auf jede Art von Verständnis.

2. Durch Wellenüberlagerung. Beide Partner werden als Wellen aufgefasst.

Dann entfallen die Interpretationsschwierigkeiten, die mit den unter 1. erwähnten Positionen verbunden sind. Weder Dualismus noch Komplementarität sind erforderlich.

Das alles gilt vorläufig nur für den Lichtelektrischen Effekt. Der nächste Schritt, den wir auf unserer Abzweigung vom historischen Gang der Physik unternehmen müssen, ist die Erprobung der Modellannahmen an der Streuung von hochfrequentem Licht (Röntgenstrahlen) an Elektronen.