erarbeitet am 03.12.2025
ergänzt am 04.12.2025
korrigiert am 05.12.2025
ergänzt am 06.12.2025

Sind Photonen masselos?

https://de.wikipedia.org/wiki/Impuls

Photonenenergie und -impuls in der Relativitätstheorie

und eine Rezension von Dr. Manfred Pohl

Der Artikel ist vorläufig und wird weiter vervollständigt

Auf die Frage nach dem Impuls findet der KI-Modus von Google einleitend:

In der Newtonschen Physik wird Impuls traditionell als Produkt von Masse und Geschwindigkeit definiert ($p = m \cdot v$),

und führt zur Frage nach der Gültigkeit aus:

Ja, das ist korrekt. In der klassischen Newtonschen Mechanik ist der Impuls ($\vec{p}$) eines Objekts traditionell als das Produkt seiner Masse (m) und seiner Geschwindigkeit ($\vec{v}$) definiert: $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$.

Das ist richtig. Weil die Geschwindigkeit ein Vektor ist, also eine Richtung und einen Betrag hat, die Masse aber eine skalare Größe ist, ist auch der Impuls ein Vektor. Jedoch ist unangebracht hervorzuheben, daß dies nur in der klassischen Newtonschen Mechanik der Fall ist. Auch nach den Gesetzen der Relativitätstheorie ist der Impuls $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$.

Diese Definition beschreibt, wie viel "Bewegungsmenge" ein Objekt besitzt, und sie ist eine grundlegende Größe bei der Beschreibung von Stößen und Kräften (Kraft ist die zeitliche Änderungsrate des Impulses, $\vec{F} = d\vec{p}/dt$).

Weiter gerechnet ist dann $\vec{F} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \frac{d_2\vec{s}}{dt^2}$.

In diesem Rahmen wäre bei Masse Null auch der Impuls Null.

Diese Darstellung ist richtig. Aber auf die Frage: „Gibt es einen Impuls ohne Masse“? antwortet KI:

Ja, es gibt Impuls ohne Masse.
Das bekannteste Beispiel aus der Physik sind **Photonen**, die Elementarteilchen des Lichts:

- **Photonen sind masselos:** Sie besitzen keine Ruhemasse.
- **Photonen haben Impuls:** Trotz ihrer Masselosigkeit tragen Photonen Impuls und können daher Druck ausüben (bekannt als Strahlungsdruck), was zum Beispiel bei Sonnensegeln genutzt wird.

Beide Erklärungen sind nicht richtig. Die erste Erklärung ist ein Widerspruch in sich selbst, indem die Existenz der dynamischen Masse unberücksichtigt bleibt. Die zweite Erklärung ist eine falsche Darstellung des Strahlungsdrucks. Mit diesen Erklärungen wird der Versuch unternommen, einerseits die Existenz von Energie zu begründen, die keine Masse habe, andererseits einen Impuls zu deklarieren, der ohne Masse vorhanden sein könne. Beides aber gibt es nicht, beides widerspricht grundlegenden Zusammenhängen, die in der Physik theoretisch und experimentell nachgewiesen sind.

Ich werde weiter unten zeigen, daß das Postulat eines Impulses ohne Masse ein Irrtum ist. Impuls und Energie sind beide Funktionen der Masse. Nur Masse kann einer Bewegung unterliegen. Haben Photonen in einem ruhenden Inertialsystem keine Masse, so bedeutet das, sie existieren nicht, weil sie in diesem Fall weder eine Energie noch einen Impuls haben können. Bereits an dieser Stelle entsteht die Frage, ob Photonen tatsächlich keine Masse haben. Wenn ihre Ruhemasse null wäre, so wäre auch Ihre bewegte Masse null, weil $m' = m \cdot \gamma$ ist. Ohne bewegte Masse kann das Photon aber keinen Impuls haben. Folglich ist die bewegte Masse größer null und damit kann auch die Ruhemasse nicht null sein. Sie ist jedoch sehr klein, nichtmeßbar klein, sehr nahe null. Ihre bewegte Masse m' erlangt erst bei sehr großen Geschwindigkeiten eine feststellbare Größe, weil durch die Bewegung nahe der Lichtgeschwindigkeit γ, die Lorentztransformation, sehr groß wird. Damit entsteht ein meßbarer Impuls. Andererseits, wenn die Ruhemasse eines Körpers eine feststellbare endliche Größe hat, kann sie sich stets nur mit geringerer Geschwindigkeit bewegen, weil zur Beschleunigung bis in die Nähe der Lichtgeschwindigkeit dann sehr große Kräfte erforderlich werden, die in der Umgebung des Körpers nicht vorhanden sind. Es ist folglich eine falsche Behauptung, in der klassischen Mechanik sei der Impuls $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ von der Masse abhängig, in Systembewegungen nach der Relativitätstheorie könne es aber sein, daß er keine Masse hat.

Die klassische Formel für den Impuls, $p = m \cdot v$, gilt nur für Teilchen mit Masse, die sich langsamer als Lichtgeschwindigkeit bewegen.
Das ist insofern richtig, als es ohne Masse keinen Impuls gibt.
In der speziellen Relativitätstheorie wird die Beziehung zwischen Energie (E), Impuls (p) und Masse (m) durch die allgemeinere Formel der Energie-Impuls-Beziehung beschrieben:

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2.$$

Was sagt diese Gleichung aus und wie entsteht sie? KI ermittelt eine Herleitung, in der wie folgt vorgegangen wird:

Im ruhenden System ist

$$E = mc^2. \qquad (1)$$

Im bewegten Inertialsystem ist

$$m' = m \cdot \gamma = m \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}, \quad \gamma - \text{Lorentztransformation.} \qquad (2)$$

Das bedeutet, daß sich die Ruhemasse m um einen Betrag vergrößert, der im bewegten System von seiner Geschwindigkeit abhängt. Bezeichnet man korrekterweise die Ruhemasse mit m_0, so kann die Gesamtmasse m als $m = m_0 + m_{dyn}$ verstanden werden. Die Masse m vergrößert ich um den Betrag der dynamischen (der bewegten) Masse im bewegten Inertialsystem. Diese dynamische Masse ist bei Geschwindigkeiten $v \ll c$ vernachlässigbar klein, bei großen Geschwindigkeiten v nahe der Lichtgeschwindigkeit ist sie verschieden von null: $m_{dyn} > 0$.

Damit ergibt sich für das bewegte System

a) Die Energie:

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

$$E^2 = m^2 \cdot c^4 \cdot \frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}}. \qquad (3)$$

b) Der Impuls:

$$p = m \cdot v \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{und weiter} \qquad (4)$$

$$p^2 = (mv)^2 \cdot \frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

$$(pc)^2 = (mv)^2 \cdot \frac{c^2}{1-\frac{v^2}{c^2}} \qquad (5)$$

Subtrahiert man b) von a), entsteht

$$E^2 - (pc)^2 = (m^2c^4 - m^2v^2c^2) \cdot \frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}} \quad \text{und weiter} \qquad (6)$$

$$E^2 - (pc)^2 = (m^2c^4 - m^2v^2c^2) \cdot \frac{c^2}{c^2-v^2}$$

$$E^2 - p^2c^2 = m^2c^2 \cdot (c^2 - v^2) \cdot \frac{c^2}{c^2-v^2} = m^2c^4.$$

Warum man hier (5) von (3) subtrahiert, wird nicht erklärt. Dieser Ableitungsschritt ist suspekt. Er kann physikalisch nicht gedeutet werden. Schlußendlich entsteht daraus:

$$\boldsymbol{E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2} \qquad (7)$$

Nun selektiert die KI folgende Aussage:

Für masselose Teilchen (Teilchen mit Ruhemasse m = 0) vereinfacht sich diese Formel zu:

E = pc oder *p = E/c.*

In dieser Beschreibung ist „masselos“ unkorrekt, richtig ist, die Ruhemasse *m* ist nahe *0* (deshalb entfällt der erste Summand, null ist sie jedoch nicht, sonst gäbe es keine dynamische Masse), aber die dynamische Masse $m_{dyn} > 0$. Deshalb kann nicht gesagt werden, der Impuls habe keine Masse oder entstünde durch bewegte Energie. Was wäre denn „bewegte Energie“? Grundsätzlich kann nur eine Masse Energie und einen Impuls haben, weil $E = m \cdot c^2 \; und \; p = m_{dyn} \cdot v$ ist. Bewegte Energie ist immer auch bewegte Masse, denn jegliche Energie hat eine zu ihr äquivalente Masse. Der Impuls eines Photons entsteht durch die dynamische Masse, die größer null ist: $m_{dyn} > 0$. Erkennbar ist dies auch im Ausdruck *p = E/c.* Hätte der Impuls keine Masse, dann könnte er auch keine Energie haben, denn „Masse ist das Maß für den Energiegehalt eines Körpers“ – Einstein. Und genauso, wie es wegen $E = m \cdot c^2$ keine masselose Energie gibt, kann es auch keinen masselosen Impuls geben, denn $p = m \cdot c$ und mithin $E = p \cdot c$.

Unter der Annahme, daß Gleichung (7) richtig ist, Schreiben wir sie in der Form

$$\sqrt{E^2 - (pc)^2} = mc^2. \qquad (8)$$

Hierin sieht man, daß Energie und Impuls für alle Inertialsysteme invariant sind, und unabhängig vom Inertialsystem sind Energie und Impuls beide Funktionen der Masse. Weiter folgen dann in der KI-Recherche mehrere Erklärungen, die einer Erläuterung bedürfen:

Beispiele für Impuls ohne Masse – einen Impuls ohne Masse kann es, wie wir oben gesehen haben, nicht geben, was auch aus der korrekten Erklärung der folgenden drei Photonenbeschreibungen hervorgeht.
Das prominenteste Beispiel sind **Photonen** (Lichtteilchen).

- **Photonen haben keine Ruhemasse** (*m = 0*). Das ist nicht richtig. Es ist unverzichtbar hervorzuheben, daß die Ruhemasse, wenngleich sie unmeßbar klein ist, nicht null sein kann, anderenfalls könnte keine dynamische Masse $m_{dyn} > 0$ existieren.
- **Photonen haben Energie** ($E = hf$, wobei h das Plancksche Wirkungsquantum und f die Frequenz ist). Diese Wellenbeschreibung des Photons ist richtig. Wenn sie aber Energie haben, müssen sie wegen der Äquivalenz von Masse und Energie auch eine Masse haben.
- **Photonen haben Impuls** ($p = E/c$). Richtig. Wenn sie aber Energie haben, also $E \neq 0$, dann ist auch $p \neq 0$, weil $E = p \cdot c$ ist, denn *c* ist eine Naturkonstante. Wegen der Äquivalenz von Masse und Energie ist dann jedoch auch $m_{dyn} \neq 0$.

Mit der Feststellung der Existenz eines endlichen Impulses eines Photons entsteht die Aussage, daß die Geschwindigkeit in der Impulsgleichung bei Verringerung der dynamischen Masse auf null gegen unendlich ginge. Das aber ist wegen der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nicht möglich.

$$p = m \cdot v \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \,. \qquad (9)$$

Der Ausdruck $v \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ geht bereits gegen unendlich, wenn *v* die Lichtgeschwindigkeit erreicht. Folglich kann m_{dyn} an dieser Stelle nicht null sein, weil sonst $p = 0$ wäre. Damit *p* endlich ist, muß $m_{dyn} > 0$ sein.

Die Tatsache, dass Photonen einen Impuls haben, wird experimentell bestätigt, unter anderem durch den **Strahlungsdruck**: Wenn Licht auf eine Oberfläche trifft, übt es eine messbare Kraft aus, die beispielsweise in der Praxis für Sonnensegel in der Raumfahrt genutzt wird. Dies wäre ohne Impulsübertragung nicht möglich.
Das ist richtig. Und genau deshalb kann der Impuls nicht masselos sein. Der experimentell nachweisbare Strahlungsdruck entsteht durch den Stoß seiner Masse auf die Oberfläche. Dabei wird die dynamische Masse angehalten, wodurch seine kinetische Energie in die Oberfläche überführt wird. Der Impuls ist dann eine Funktion der Ruhemasse, die unmeßbar klein ist. Trivial: Die Oberfläche erwärmt sich oder ändert ihre Geschwindigkeit (oder beides).

Wegen der Unklarheiten in der obigen Ableitung zeichne ich einen anderen Weg, die die Energie-Impuls-Relation unter Berücksichtigung der Relativitätstheorie zu erhalten.

Die Energie eines Körpers mit der Masse *m* ist im ruhenden Inertialsystem

$$E_0 = mc^2.$$

In einem bewegten Inertialsystem mit der Geschwindigkeit *v* vergrößert sich diese Energie um die kinetische Energie der Masse *m*:

$$E_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2} \,.$$

Die Gesamtenergie ist damit

$$E = E_0 + E_{kin} = mc^2 + \frac{m \cdot v^2}{2}. \qquad (10)$$

Setzt man für die Berechnung der kinetischen Energie den Impuls *p* ein, ergibt sich

$$E = E_0 + E_{kin} = mc^2 + \frac{p \cdot v}{2}. \qquad (11)$$

Diese Aussage ist im Bereich geringer Geschwindigkeiten $v \ll c$ gültig. Bewegt sich das Inertialsystem mit Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit *c*, so gilt für die kinetische Energie $E_{kin} = \frac{(m' \cdot v^2)}{2}$ mit (12)

$m' = m \cdot \gamma$ und $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$, Lorentztransformation.

Die Ruheenergie *m* ist invariant für alle Inertialsysteme, sie hängt nicht von *v* ab.
Die kinetische Energie ist von *v* abhängig, also auch der Impuls.
Die Gesamtenergie ist dann

$$\boldsymbol{E = m \cdot c^2 + \frac{p \cdot v}{2 \cdot \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}} \qquad (13)$$

Der Wert für $\gamma = \sqrt{\frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ ist für *v* > *c* imaginär, das heißt, es gibt dafür kein reales Abbild in der Natur, folglich ist zwingend $v \leq c$.

Das folgende Gedankenexperiment möge zur Erklärung der dynamischen Masse dienen.

$E = m \cdot c^2$, $p = m \cdot v \cdot \gamma$, $E = \frac{p}{v \cdot \gamma} \cdot c^2$, *p* ist ein endlicher Impuls. (14)

Dieser Impuls *p* ist um so größer, je größer v ist. Für ein Photon ist ein positiver Impuls $p > 0$ meßbar. Angenommen, es sei ein gemessener Impuls: *p* = *const* gegeben. Dann folgt aus $p = m_{dyn} \cdot v$: Je kleiner m_{dyn}, desto größer ist *v*. Für $m_{dyn} \rightarrow 0$ ginge $v \rightarrow \infty$. Weil aber $v \leq c$ sein muß, also nicht $\rightarrow \infty$ geht, kann m_{dyn} nicht null werden. Schlußfolgerung: $m_{dyn} > 0$. Wie oben gezeigt, kann aber die dynamische Masse nur dann größer null sein, wenn auch die Ruhemasse größer null ist. Sie muß sich um eine Mindestgröße von null unterscheiden, damit im bewegten Inertialsystem eine dynamische Masse und damit eine Energie und ein Impuls vorhanden sein können. Dies bedeutet aber, Masse kann im Bereich kleiner Größen nicht stetig sein.

Zum heutigen Zeitpunkt ist in der Physik ist das Wesen einer Strahlung noch nicht endgültig geklärt. Plausibel jedoch kann man ihre Energie auf zweierlei Weise mit Blick auf den dualen Charakter der Strahlung berechnen:

- als Korpuskulardarstellung mit der Energie $E = p \cdot c$. Die Korpuskulardarstellung ist die Bewegung einer dynamischen (bewegten) Masse. Dabei ist der Impuls $p = m \cdot v$.
- als Wellendarstellung mit der Energie $E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$, mit
  h – Plancksches Wirkungsquantum [*Js*],
  f – die Frequenz [*1/s*],
  λ – Wellenlänge [*m*].

Die Zusammenführung der beiden Ausdrücke führt zu

$$h \cdot f = p \cdot c \quad \rightarrow \quad p = \frac{h \cdot f}{c} \quad \rightarrow \quad p = \frac{h}{\lambda} \qquad (15)$$

Das Plancksche Wirkungsquantum (auch Planck-Konstante genannt) ist
$h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ *Js*.

Es ist begründet durch die Entdeckung Max Plancks aus dem Jahre 1900, daß im Mikrokosmos Energie keine stetige Größe ist, sondern daß sie quantiert in Erscheinung tritt (In der Literatur benutzt man den Begriff „quantisiert“. Ich halte den Begriff „quantiert“ für aussagestärker).

Die Herleitung der Größe der Planck-Konstanten und ihre experimentelle Bestätigung als kleinstmögliche Energieportion kann an mehreren Stellen im Netz nachgelesen werden. Zur Umgehung umfangreicher Suchaktionen zitiere ich an dieser Stelle eine verkürzte Erklärung des Planckschen Wirkungsquantums aus dem Netz, die meiner Auffassung nach das wesentliche wiedergibt:

Das Plancksche Wirkungsquantum (h) wurde nicht direkt in seiner heutigen Form "hergeleitet", sondern 1900 von Max Planck als **fundamentale Naturkonstante eingeführt**, um eine Formel für die Strahlung eines schwarzen Körpers zu entwickeln, die mit experimentellen Daten übereinstimmte.

Die Herleitung der Planckschen Strahlungsformel und damit die Einführung von h basierte auf folgenden Schritten und Annahmen:

1. **Das Problem der "Ultraviolett-Katastrophe"**: Klassische physikalische Theorien (wie das Rayleigh-Jeans-Gesetz) zur Beschreibung der Schwarzkörperstrahlung führten zu dem widersinnigen Ergebnis, dass die Energiedichte bei hohen Frequenzen unendlich wird, was als "Ultraviolett-Katastrophe" bekannt ist. Diese Gesetze stimmten nur bei niedrigen Frequenzen mit den experimentellen Ergebnissen überein.
2. **Plancks Annahme der Energiequantisierung**: Um dieses Problem zu lösen, nahm Planck eine radikale Hypothese an: Elektrisch geladene Oszillatoren (gedacht als Atome an den Wänden eines Hohlraums, die Strahlung absorbieren und emittieren) können Energie nicht kontinuierlich, sondern nur in diskreten Paketen, den sogenannten **Quanten**, aufnehmen oder abgeben.
3. **Die Energieformel**: Die Energie dieser Quanten ist proportional zur Frequenz (ν) der Strahlung. Planck postulierte die Formel:
   $E = h\nu$
   Dabei ist E die Energie eines Energiepakets und h die neu eingeführte Proportionalitätskonstante, das Plancksche Wirkungsquantum.
4. **Statistische Mechanik**: Planck wandte die statistische Mechanik auf diese quantisierten Oszillatoren an, um die mittlere Energie eines Oszillators bei einer bestimmten Temperatur zu berechnen. Im Gegensatz zur klassischen Annahme, dass jeder Oszillator im Durchschnitt die Energie kT hat, erhielt er einen Ausdruck für die mittlere Energie, der die Quantisierung berücksichtigte:
   $$\langle E \rangle = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1}$$
5. **Die Plancksche Strahlungsformel**: Durch die Kombination dieser mittleren Energie mit der Anzahl der möglichen Schwingungsmodi pro Volumeneinheit im Hohlraum (bestimmt durch Rayleigh und Jeans) leitete Planck die heute nach ihm benannte Strahlungsformel ab, die das gesamte experimentelle Spektrum korrekt beschreibt:
   $$u(\nu)d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1} \cdot d\nu \qquad (16)$$
   Dabei ist $u(\nu)d\nu$ die Energiedichte im Frequenzintervall von ν bis $\nu+d\nu$, c die Lichtgeschwindigkeit und k die Boltzmann-Konstante.

Planck selbst sah die Quantisierung zunächst nur als mathematischen Kunstgriff, um die Formel herzuleiten. Erst Albert Einstein deutete h später als universelle Konstante und die tatsächliche Existenz von Lichtquanten (Photonen) im Rahmen seiner Erklärung des photoelektrischen Effekts.

Aus diesen obigen Darlegungen folgt eine grundsätzliche Feststellung:

Der Ausdruck $p = m_{dyn} \cdot v = \frac{h}{\lambda}$ kann nur sinnvoll erklärt werden, wenn angenommen wird, daß ebenso wie die Energie auch die Masse nicht stetig, sondern eine quantierte Größe ist. Das Photon muß folglich neben der kleinstmöglichen Energie $h \cdot f$ auch eine kleinstmögliche Masse m haben, die zu dieser Energie äquivalent ist, damit eine dynamische Masse m_{dyn} existieren kann, die einen Impuls $p = m_{dyn} \cdot v$ haben kann.

Diese Vermutung läßt sich auch aus der Äquivalenz von Masse und Energie ableiten. Wenn in der Gleichung $E = m \cdot c^2$ kleine Energien betrachtet werden, gelangt man an eine Größe, an der die Energie nicht mehr kleiner werden kann, wenn sie das Plancksche Wirkungsquantum erreicht. Die Gültigkeit der Gleichung der Masse-Energie-Äquivalenz kann nur dann weiter bestehen, wenn auch die zu dieser kleinsten Energieportion äquivalente Masse nicht kleiner werden kann. Das heißt, die Masse muß quantiert sein.

Setzt man die Energie nach der Korpuskulardarstellung $E = m \cdot c^2$ der Energie in der Wellendarstellung $E = h \cdot f$ gleich, so ergibt sich

$$\frac{m}{f} = \frac{h}{c^2} = const$$

$$\frac{h}{c^2} = 7{,}37249732 \cdot 10^{-51} kg \cdot s = const$$

Daraus folgt zwingend $m > 0$. Das heißt, für einen beliebigen Energiebetrag kann die Masse m nicht null werden. Daraus folgt einerseits, **Energie ohne Masse gibt es nicht**. Andererseits hat ein Energiequant eine von null verschiedene Masse. Deshalb ist Masse eine quantierte Größe.

Analysiert man die Maßeinheiten, findet man nun auch die Bestätigung für die Feststellung, daß es keinen Impuls ohne Masse geben kann.

Die Maßeinheit Joule [J] für die Energie im SI-System ist [$kg \cdot m^2/s^2$]. Die Maßeinheit für p ist folglich aus $E = p \cdot c$

$$[J \cdot s/m] = [kg \cdot m^2/s^2 \cdot s/m] = [kg \cdot m/s]. \qquad (17)$$

Sie zeigt, daß der Impuls durch eine Masse entsteht. Das ist die dynamische Masse des Photons. Wäre sie null, gäbe es den Impuls nicht. Daraus folgt: **Einen Impuls ohne Masse gibt es nicht.**

Die Zusammenfassung dieser KI-Recherche lautet:

Zusammenfassung

Impuls ist eine fundamentale Eigenschaft von Energie in Bewegung, nicht nur von Materie. Auch ohne Masse im Ruhezustand kann eine Wesenheit (wie ein Photon) einen Impuls besitzen, solange sie Energie hat und sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt.

Diese Erklärung ist unverständlich und fehlerhaft. Mit der Formulierung „Energie in Bewegung, nicht nur von Materie“ wird ausgesagt, Energie sei etwas anderes als Materie. Das ist falsch. Bewegte Energie ist wegen der Äquivalenz zur Masse immer auch bewegte Masse. Energie ist Materie und hat deshalb immer eine zu ihr äquivalente

Masse. Das heißt, **der Impuls ist keine Wesenheit, die frei von Masse ist**. Auch wenn seine Ruhemasse fast null ist, gibt es wegen der Geschwindigkeit nahe *c* eine dynamische Masse, die im bewegten Inertialsystem – und nur im bewegten Inertialsystem – einen meßbaren Impuls hat.

Richtig ist, daß das Photon nur als bewegtes Teilchen existieren kann, denn seine Ruhemasse ist fast null. Ohne Bewegung wäre auch seine dynamische Masse null, Das Photon hätte dann weder kinetische Energie noch einen Impuls, was gleichbedeutend damit ist, daß es nicht existiert.

Einige weiterführende Recherchen

Zur Äquivalenz von Masse und Energie findet man bei Wikipedia in neuerer Zeit einen Eintrag, dessen Inhalt bis vor kurzem noch bestritten wurde. Dieser Inhalt wird daselbst an anderen Stellen aber immer noch falsch dargestellt. Es geht um die Unmöglichkeit der Umwandlung von Masse in Energie und vice versa:

https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%84quivalenz_von_Masse_und_Energie#:

Insbesondere im Zusammenhang mit Kernspaltung und -fusion wird manchmal von „Umwandlung von Masse in Energie“ gesprochen, was aber in die Irre führt. Die **Energie bleibt insgesamt erhalten** und damit auch die Masse. Wenn ein System Energie an die Umgebung abgibt (z. B. durch Stöße von Spaltprodukten an die umgebende Materie oder als Strahlung), verringert sich seine verbleibende Energie und daher auch seine Masse. **Es findet keine „Umwandlung“ statt**.

Das ist korrekt. Es geht auch aus der Masse als Erhaltungsgröße hervor. Masse kann ebenso wie Energie weder entstehen noch verschwinden. Damit läßt sich die Unmöglichkeit der Umwandlung von Masse in Energie und zurück zeigen:
http://hauptplatz.unipohl.de/Wissenschaft/MasseEnergieFehler1.htm
http://hauptplatz.unipohl.de/Wissenschaft/Masse_in_Energie.pdf
http://hauptplatz.unipohl.de/Wissenschaft/MasseEnergieUmwandlung.pdf

Stellt man aber KI die Frage „Kann man Masse in Energie umwandeln“, so erhält man die Antwort:
Ja, **Masse kann in Energie umgewandelt werden** und umgekehrt, Energie in Masse. Dieses Prinzip ist bekannt als die **Masse-Energie-Äquivalenz**, die durch Albert Einsteins berühmte Formel $E=mc^2$ beschrieben wird.

Der Fehler ist also noch nicht behoben. Er ist in den meisten Quellen noch unverändert präsent.

Der bei Kernreaktionen auftretende sogenannte Massendefekt wird in den meisten Quellen falsch erklärt. Mit der Bestätigung der Unmöglichkeit der Umwandlung von Masse in Energie und vice versa kann auch für den „Massendefekt“ festgestellt werden, daß ein „Defekt“, heißt, ein Verschwinden oder Entstehen von Masse, nicht vorliegt. Sowohl die Masse als auch die Energie sind nach der Reaktion vorhanden, haben aber ihren Bewegungsstatus und ihre Raumposition geändert.

Aus dem gleichen Grund ist auch der Begriff „Annihilation“ irreführend, der ein vermeintliches Verschwinden von Masse bei der Vereinigung eines Elektrons mit einem Positron erklären soll (man sagt, die Teilchen „zerstrahlen“ in Energie), aus der zwei Gamma-Quanten hervorgehen. Auch hierbei sind nach der Reaktion Masse und Energie unverändert vorhanden.

Unklar ist die Formulierung „…an die umgebende Materie oder als Strahlung“. Erneut ist der oben schon genannte Fehler präsent, Energie sei keine Materie.

Richtig ist, Strahlung ist Energie, und Energie ist Materie. Würde man sie nicht als Materie sehen, könnte sie nicht zur Masse äquivalent sein.

Die Fehlauffassung entsteht durch eine fehlerhafte Materiedefinition, in der die Energie nicht als Materie angesehen wird. Das ist der Ausgangspunkt für zahlreiche weitere theoretische Fehler. Deshalb habe ich zum Wesen der Materie eine spezielle Arbeit verfaßt, die unter
http://hauptplatz.unipohl.de/Wissenschaft/WesenMaterie.pdf
erreichbar ist.

Richtig ist: Masse und Energie sind zwei Darstellungsformen der Materie, die zueinander äquivalent sind. Das heißt, es gibt die eine Form nicht ohne die andere. Die Größen beider Formen sind zueinander proportional. Ihr Verhältnis ist konstant. Der Proportionalitätsfaktor ist das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit: $E/m = c^2$.

Die Energieerhaltung wird bei Wikipedia unter
https://de.wikipedia.org/wiki/Energieerhaltungssatz
mit Einschränkungen korrekt beschrieben:

Eine Textpassage hierin ist jedoch substantiell falsch. Der Energieerhaltungssatz wird darin mit unsinnigen, wissenschaftsfernen Pseudoargumenten in Zweifel gezogen:

Die Betrachtung des Universums mit Mitteln der allgemeinen Relativitätstheorie zeigt, dass der Energieerhaltungssatz auf das Universum als Ganzes nicht anwendbar ist. Insbesondere kann die Gravitationsenergie nicht immer eindeutig in einer Weise definiert werden, die für das Universum als Ganzes gilt. Die Gesamtenergie des Weltalls bleibt demnach weder erhalten noch geht sie verloren – sie ist nicht definierbar.

Ein „ganzes“ Universum ist nicht beschreibbar und kann nicht definiert werden. Es gibt aus zwei einfachen Gründen kein „ganzes“ Universum,

- weil es unbegrenzt in alle Richtungen ausgedehnt ist – ein „ganzes“ Universum widerspricht dem Axiom, daß eine ganze Entität ist immer eine endliche Entität ist, und
- weil Naturgesetze immer gelten – es gibt keine Naturgesetze, die nur manchmal gelten.

So gilt die Erhaltung der Energie auch im Universum ohne Einschränkung, sofern man einen begrenzten Bereich als geschlossenes System interpretiert. Definiert man mehrere Bereiche, zwischen denen ein Energieaustausch stattfinden kann, bleibt die Gesamtenergie der Bereiche konstant, zwischen ihnen kann eine Energiebilanz ermittelt werden. Die Gesamtenergie des Universums ist unendlich wie das Universum selbst, sie kann nicht als Wert ermittelt werden.

Die Formulierung „…bleibt demnach weder erhalten noch geht sie verloren“ hat keinen physikalischen Sinn. Sie ist konfus und logikwidrig.

Der Bezug auf die Relativitätstheorie in dieser Textpassage ist wegen der Invarianz der Energieerhaltung gegenstandslos.

Der Begriff „Gravitationsenergie“ ist irreführend, er ist falsch. Er widerspricht sich selbst und hat keinen physikalischen Inhalt. Gravitation ist eine Kraft, sie ist keine Energie. Erst dann, wenn die Gravitationskraft eine Masse entlang eines Weges beschleunigt, wird Arbeit geleistet, das ist die zugrundeliegende Energie. Kräfte wirken immer auf Massen, der grundsätzliche Zusammenhang lautet Kraft gleich Masse mal Beschleunigung: $F = m \cdot b$. Die in der Relativitätstheorie eingeführte Erklärung der Gravitation als Krümmung der Raumzeit ist eine mathematische Abstraktion, in der mit Hilfe von Geodäten die Bewegungen der kosmischen Objekte linearisiert werden. Damit werden

Berechnungsverfahren begründet, mit denen die Gesamtheit der Gravitationsfelder zwischen einer Vielzahl betrachteter kosmischer Objekte mathematisch beherrschbar werden. Die Krümmung des Raumes bzw. der vierdimensionalen Raumzeit hat in der Natur kein real existierendes Abbild. Sie hierzu auch
http://hauptplatz.unipohl.de/Wissenschaft/Raumkruemmung.pdf.
Die Bestrebungen, eine Raumkrümmung als real existierende Entität erklären zu wollen, führen unvermeidbar auf Irrwege, die kein wissenschaftliches Ergebnis hervorbringen können. Die Gravitation ist in solchen Abstraktionen als Kraft nicht abgeschafft, wie oft behauptet wird. Andererseits ist Raum kein materielles Objekt, dem man diese und andere Bewegungsvorgänge zuordnen kann. Die grundlegenden Zusammenhänge der Kraft und der Energie,

$F = m \cdot \frac{d^2s}{dt^2}$ und $E = \frac{m}{2} \cdot \left(\frac{ds}{dt}\right)^2$, wobei s der Weg der Masse m ist,

sind für die Gravitation uneingeschränkt gültig. Alle Versuche, mathematische Abstraktionen zu materialisieren, ihnen eine autarke Existenz zuordnen zu wollen, Raum und Zeit als materielle Objekte, als Gegenstände zu interpretieren, sind stets der Ausgangspunkt für unbeweisbare Spekulationen, unhaltbare Phantasiegebilde und wissenschaftsferne Pseudotheorien, mit denen die Ergebnisse von Naturbeobachtungen fehlinterpretiert werden und die Physik in die Irre geleitet wird. Fehlentwicklungen dieser Art sind nur vermeidbar, wenn die Physik auf die konsequente Anerkennung des dialektisch-materialistischen Materiebegriffs zurückgeführt wird, der in den letzten Jahrzehnten bis zur Unkenntlichkeit demontiert worden ist. Auf diese Weise können die meisten der heute bestehenden Irrlehren in der Physik und vor allem in der Kosmologie aufgehoben und durch wissenschaftlich tragfähige Ansätze ersetzt werden. Auch die Bemühungen der Forschung zum Auffinden einer theoretischen Vereinigung der Quantenphysik mit der Makrowelt können nur auf diesem Wege vorankommen.