5.1.3 Photon

Im gleichen Jahr 1905, in dem Einstein die Photonen postulierte, veröffentlichte er auch seine spezielle Relativitätstheorie. Sie enthält die berühmte Gleichung
$W = m \cdot c^2$.

Demnach ist die Masse eines Systems mit dessen Gesamtenergie verknüpft, und mit obiger Gleichung lässt sich auch jedem Quant die ihm äquivalente Masse m_{Ph} zuschreiben:
$W = m_{Ph} \cdot c^2 = h \cdot f \Leftrightarrow m_{Ph} = \frac{W}{c^2} = \frac{h \cdot f}{c^2} = \frac{h}{c \cdot \lambda}$
Dabei wird in der letzten Umformung die Gleichung
$c = \lambda \cdot f \Leftrightarrow \frac{c}{f} = \lambda \Leftrightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{f}{c}$
verwendet.

Diese Masse hat die Energieportion Photon natürlich nur "im Flug", denn anders als mit der Geschwindigkeit c kann es nicht existieren; es gibt also keine ruhenden Photonen.

Die Ruhemasse m_0 eines Teilchens lässt sich aus der allgemeingültigen relativistischen Energie-Impuls-Beziehung herleiten:
Für Licht gilt (vgl. SRT) die Beziehung
$W = p \cdot c$,
so dass aus der Energie-Impuls-Beziehung
$W^2 = p^2 \cdot c^2 + (m_0 \cdot c^2)^2$
$p^2 \cdot c^2 = p^2 \cdot c^2 + (m_0 \cdot c^2)^2$ bzw.
$(m_0 \cdot c^2)^2 = 0 \Rightarrow m_0 = 0$
folgt.

Alternative: Nach Einstein gilt für die Masse m_v eines sich mit der Geschwindigkeit v bewegenden Teilchens die Gleichung
$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Leftrightarrow m_0 = m(v) \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.
Für ein Photon gilt $v_{Ph} = c$,
so dass für die Ruhemasse
$m_0 = 0$
folgt.

Anmerkung:
Für jede endliche Ruhemasse würde die Masse des bewegten Photons und damit die Energie unendlich groß werden!

Einem Photon lässt sich nicht nur eine Masse m_{Ph}, sondern auch ein Impuls p zuordnen. Für diesen gilt
$p = m_{Ph} \cdot v_{Ph} = m_{Ph} \cdot c \frac{W}{c^2} \cdot c = \frac{W}{c} = \frac{h \cdot f}{c} = \frac{h}{\lambda}$.

Auswirkungen:

1. Lichtquanten erfahren wegen ihrer Masse auch eine Gewichtskraft
   $F_G = m \cdot g = \frac{h \cdot f \cdot g}{c^2}$.
   Steigt ein Quant im Gravitationsfeld um ΔH nach oben, so nimmt seine potentielle Energie (bei konstantem Ortsfaktor g) um
   $\Delta W_{pot} = m \cdot g \cdot \Delta H = \frac{h \cdot f \cdot g \cdot \Delta H}{c^2}$
   zu. Im Gegensatz etwa zu einem hochgeworfenen Ball kann ein Photon seine Geschwindigkeit nicht vermindern. Die Abnahme seiner kinetischen Energie kann daher nur zu einer Verminderung seiner Frequenz f um Δf führen:
   $h \cdot \Delta f = \frac{h \cdot f \cdot g \cdot \Delta H}{c^2}$.
   Für die relative Frequenzänderung $\frac{\Delta f}{f}$ folgt daraus
   $\frac{\Delta f}{f} = \frac{g \cdot \Delta H}{c^2}$.
   Diese Frequenzerniedrigung macht sich zum Beispiel beim Licht, das das Gravitationsfeld der Sonne verlassen hat, in einer Verschiebung zu längeren Wellenlängen (Rotverschiebung) bemerkbar.
2. Wenn ein Stern mit mehr als zehn Sonnenmassen erkaltet ist, quetscht ihn die Gravitationskraft nicht nur fast auf einen Punkt zusammen; sie hindert sogar die Lichtquanten, den "Stern" zu verlassen. Von ihm ist nichts mehr zu sehen, wenngleich sein Gravitationsfeld existiert und z. B. sichtbare Sterne um ihn kreisen können. Ein solcher Stern heißt "schwarzes Loch".
3. Der Impuls von Photonen wirkt sich in einem Rückstoß auf getroffene Teilchen aus. So ist der Schweif eines Kometen immerzu von der Sonne abgewandt, da das Sonnenlicht auf die Staubteilchen eines Kometenschweifs einen Lichtdruck ausübt, der von der Sonne weg weist.