

Was sind Elementarteilchen und gibt es „virtuelle“ Photonen?

Anmerkungen zur Didaktik der modernen Physik

Oliver Passon
Bergische Universität Wuppertal
Physik und ihre Didaktik

Teilchenphysik in den Lehrplänen



Aus dem
Wahlpflichtbereich:

Sach- und Methodenkompetenz	
Inhalte	Ziele / Hinweise
Elementarteilchenphysik	
	10
<ul style="list-style-type: none"> - Fundamentarteilchen; fundamentale Wechselwirkungen und Austauschteilchen - Standardmodell als Ordnungsschema - experimentelle Befunde; offene Fragen 	<ul style="list-style-type: none"> • Einen Einblick in die Ergebnisse der modernen Grundlagenforschung geben. • Zur Veranschaulichung elementarer Wechselwirkungen bieten sich Feynman-Diagramme an. Informationen und elementarisierte Darstellungen in geeigneten Medien nutzen.



Aus dem Kernlehrplan
für GymGe:

<p>Die Schülerinnen und Schüler:</p> <ul style="list-style-type: none"> • erläutern mithilfe des aktuellen Standardmodells den Aufbau der Kernbausteine und erklären mit ihm Phänomene der Kernphysik. • erklären an einfachen Beispielen Teilchenumwandlungen im Standardmodell . • vergleichen das Modell der Austauschteilchen im Bereich der Elementarteilchen mit dem Modell des Feldes (Vermittlung, Stärke und Reichweite der Wechselwirkungskräfte)
--

Was sind Elementarteilchen

Oliver Passon | FD Kolloquium Wuppertal



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Fragestellung und Methode

- Wie gehen typische Lehrbuchdarstellungen (und andere Unterrichtsmittel) mit der Elementarisierung dieses komplexen Gegenstandes um?
- Gütekriterien für die didaktische Reduktion:
 - Fachgerechtheit
 - Anschlussfähigkeit
- Als Referenzrahmen dienen:
 - fachwissenschaftliche Darstellungen
 - Philosophie der Physik (→ keine Kalkülbeherrschung sondern tragfähiger Begriffe)
- Ergebnis/These: *Es besteht die Gefahr, dass der Unterricht zur Teilchenphysik ungenaue, irreführende und falsche Vorstellungen und Erklärungen vermittelt.*

Inhaltsübersicht

- Elementarteilchen und Quantenfelder
 - Der lichtelektrische Effekt
- Feynman-Graphen und Kraftwirkung durch Teilchenaustausch
 - virtuelle Teilchen
- Mögliche Einwände
- Fazit und Lösungsvorschläge

Materialien des „Netzwerk Teilchenwelt“

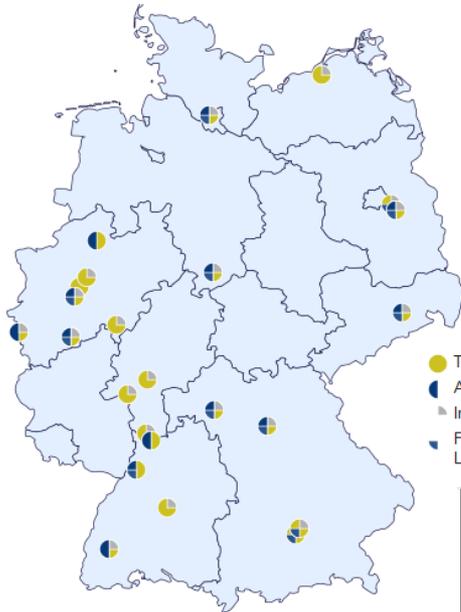


Abb. 6 Bei Protonen-Zusammenstößen im LHC entstehen völlig neue Teilchen, die vorher keine Bestandteile der Protonen waren – das ist so, als ob sich aus Erdbeeren bei einer Kollision ganz andere Früchte herausbilden.

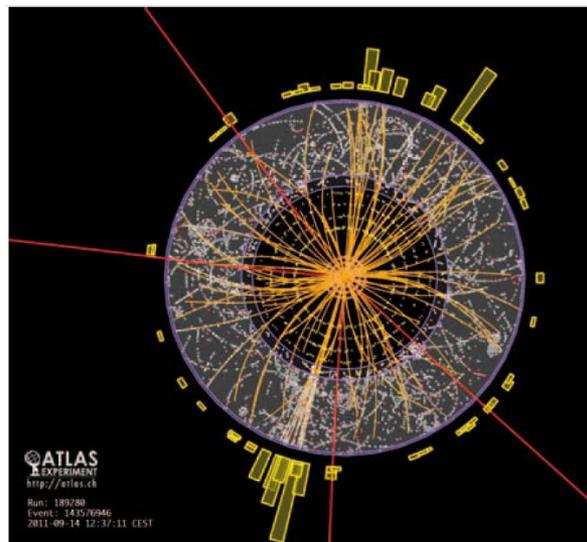
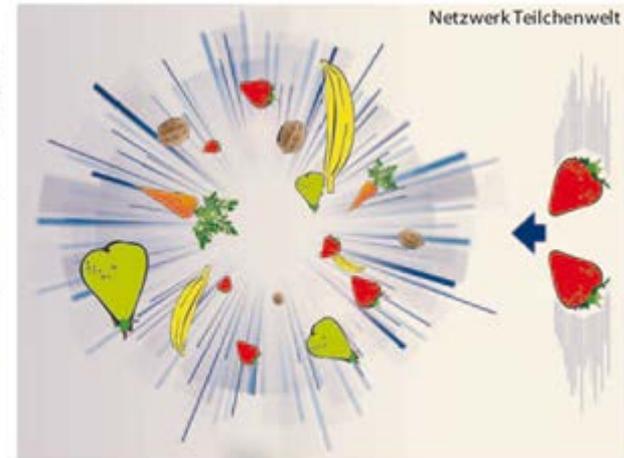


Abb. 7 In dem Querschnitt des ATLAS-Detektors sind Spuren von Teilchen zu sehen, die bei einer Protonen-Kollision entstanden sind. Farblich hervorgehoben sind die Zerfallsprodukte eines Higgs-Bosons: Zwei Myonen und zwei Antimyonen. Das Higgs-Boson zerfiel zunächst in zwei Z-Bosonen, die sich dann jeweils in ein Myon und ein Antimyon umwandelten.

Quelle: Kuhar, M und Trefzger, T. (2013) „Teilchen im Klassensatz“, Physik Journal 12, Nr. 10, 49-52.

Georg-Kerschensteiner-Preis 2014

für Beiträge zur Didaktik und Schulphysik



Prof. Dr. Michael Kobel
Technische Universität Dresden

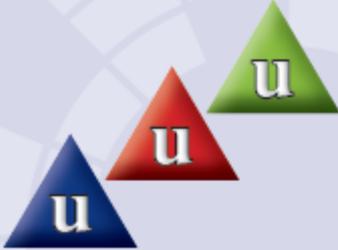
„Für sein langjähriges, aktives Engagement in der Popularisierung der Physik und in der Vermittlung von Teilchenphysik an Jugendliche, insbesondere für die Programme „Netzwerk Teilchenwelt“ und „International Masterclasses“, die sich durch besondere Breitenwirkung auszeichnen und jährlich viele Tausend Jugendliche erreichen.“

Bild: DPG/Socher

Michael Kobel hat zwei Projekte entwickelt, die Schülerinnen und Schülern den Zugang zu der Welt der Elementarteilchen ermöglichen: Im „Netzwerk Teilchenwelt“ und den „International Masterclasses“ lernen die Jugendlichen Experimente am Teilchenbeschleuniger LHC des Kernforschungszentrums CERN in Genf kennen und werten dabei aktuelle Daten von Teilchenkollisionen aus.

Teilchen-Steckbriefe

UP-QUARKS
NACHWEIS: 1969

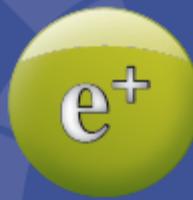


MATERIETEILCHEN

Masse:	2 MeV/c ²
Elektrische Ladung:	+2/3
Starke Ladung:	blau, rot, grün
Schwache Ladung:	+1/2

Mittlere Lebensdauer: unbegrenzt

POSITRON
NACHWEIS: 1932



ANTIMATERIETEILCHEN

Masse:	0,511 MeV/c ²
Elektrische Ladung:	+1
Starke Ladung:	-
Schwache Ladung:	+1/2

Mittlere Lebensdauer: unbegrenzt

PHOTON
NACHWEIS: 1905



AUSTAUSCHTEILCHEN

Masse:	0
Elektrische Ladung:	0
Starke Ladung:	-
Schwache Ladung:	0

Mittlere Lebensdauer: unbegrenzt
Reichweite: unbegrenzt

Quelle: <http://www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-lehrkraefte/elementarteilchen-teilchen-steckbriefe/>



NETZWERK
TEILCHENWELT



TEILCHEN-STECKBRIEFE ELEMENTARTEILCHEN UND WECHSELWIRKUNGEN

Die Elementarteilchen-Steckbriefe können verwendet werden, um die Materie-, Antimaterie- und Austauschteilchen des Standardmodells der Teilchenphysik einzuführen und zu systematisieren. In diesem Dokument finden Sie Anregungen zur Verwendung der Steckbriefe, sowie Fragen und Antworten rund um Elementarteilchen und Wechselwirkungen.

IMPRESSUM Herausgeber: Michael Koke, Thomas Trottgen, Alexander Marzahn, Kurtz (verantwortlich), Florian Kuger, Rainer K. Knie, Georg, Michael Koke, Carmen Leuschke, Layke und Gröblke, www.zusf-zusf.de
Projektleitung: Michael Koke, (Gesamprojezt) Michael, Trottgen (1. TD) Kurtz, Trottgen für Koke- und Trottgenprojekte, www.koke-trottgen.de, www.koke-trottgen.de
Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Radcliffestraße, November 2012, Lokale: 800, Nutzung: Creative Commons 2.0-DE-NC-ND (Vollständig überlappende Verantwortung des Inhalts ist die Meinung der Quelle für Lernzwecke ohne Rückfragen gestattet, sofern keine Veränderungen vorgenommen werden. Kommerzielle Nutzung, z. B. zu Werzwecken, ist ohne Rücksprache nicht gestattet. Es gilt das Impressum unter www.koke-trottgen.de bzw. www.zusf-zusf.de.

INITIATOR



SCHIRMHERSCHAFT



PROJEKTLEITUNG



KONTAKTMATERIALIEN



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

HINTERGRUNDINFORMATIONEN

1. Was sind Elementarteilchen?

Als Elementarteilchen bezeichnet man alle Bestandteile des Universums, bei denen man davon ausgeht, dass sie nicht weiter teilbar sind. Dazu gehören die Materie- und Antimaterieteilchen sowie die Austauschteilchen (s. Frage 12).

Elementarteilchen besitzen keine räumliche Ausdehnung – zumindest keine, die sich mit heutigen Messinstrumenten messen ließe. Alle Elementarteilchen derselben Sorte (z.B. alle Elektronen) besitzen die gleiche Masse und gleiche Ladungen (s. Fragen 14-16).

Elementarteilchen folgen den Gesetzen der Quantenmechanik. So kann beispielsweise ihr Ort und Impuls nicht gleichzeitig exakt gemessen oder vorhergesagt werden, sondern nur in Form von Wahrscheinlichkeiten.

Was sind Elementarteilchen

Oliver Passon | FD Kolloquium Wuppertal

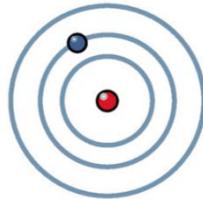


BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

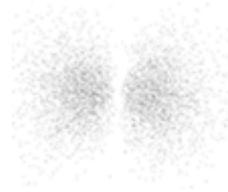
Ort eines „Teilchens“ in der Quantenmechanik:

Verbreitete (und unglückliche) Sprechweise: Elektronen (als Beispiel) verhalten sich manchmal wie „Teilchen“ und manchmal wie „Wellen“ (Stichworte: „Welle-Teilchen Dualismus“ bzw. „Komplementarität“).

Genauer (nach Born, 1926): Die Wahrscheinlichkeit, ein Teilchen zu messen, breitet sich wie eine Welle aus.



Bohrsches Atommodell (1913-1926)



Hantelförmiges p-Orbital des Wasserstoff

Die Bornsche Wahrscheinlichkeitsdeutung der Wellenfunktion

Technisch: Es gibt in der QM einen sog. „Ortsoperator“ (und das gleiche gilt für andere Größen wie Impuls, Energie, Spin...). Ein solcher Operator ist ein „mathematisch ungesättigtes“ Objekt. Ähnlich wie eine (reelle) Funktion jeder Zahl des Wertebereichs eine Zahl zuordnet, ordnet jeder Operator einer Funktion eine Funktion zu.

In speziellen Fällen gilt: $\hat{A} \cdot \Psi_1 = a_1 \cdot \Psi_1$ (mit a_1 einer reellen Zahl). D.h. die Funktion ist ein „Eigenzustand“ des Operators und die Messung der Größe, der der Operator entspricht, ergibt mit Sicherheit den Wert a_1 („Eigenwert“ des Zustandes).

Im Allgemeinen ist jeder Zustand aber eine Überlagerung von verschiedenen Eigenzuständen:

$$\Psi = c_1 \Psi_1 + c_2 \Psi_2 + \dots \quad \text{mit } c_i \in \mathbb{C}$$

Dann folgt aus der Bornschen-Regel, dass die Wahrscheinlichkeit, den Eigenwert a_i zu messen, gerade $|c_i|^2$ beträgt.

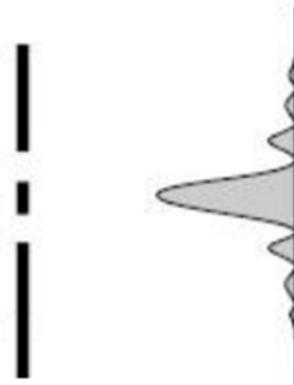
Ort eines „Teilchens“ in der Quantenmechanik II:

In der QM haben Objekte die Eigenschaft Ort (d.h. es **gibt** einen Ortsoperator).

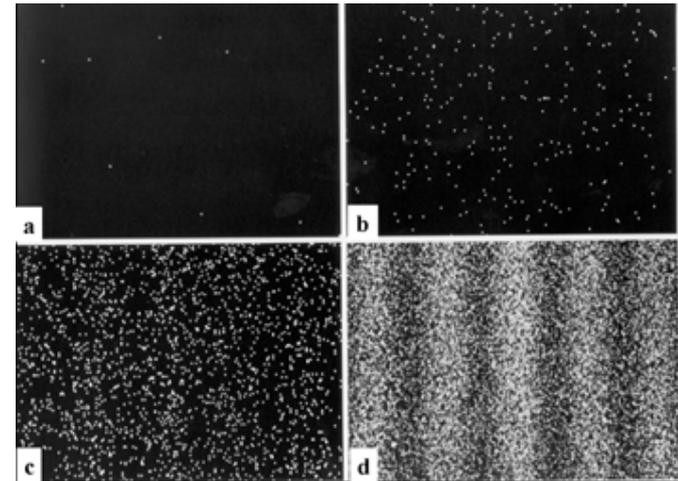
Diese hat jedoch nicht jederzeit einen festen Wert! (im Jargon: „nicht alle Zustände sind Eigenzustände des Ortsoperators“). In diesem Sinne gibt es auch keine kontinuierlichen Bahnen, auf denen sich diese Objekte bewegen.

Beispiel: Doppelspalt

$$\psi = \psi_1(x) + \psi_2(x)$$



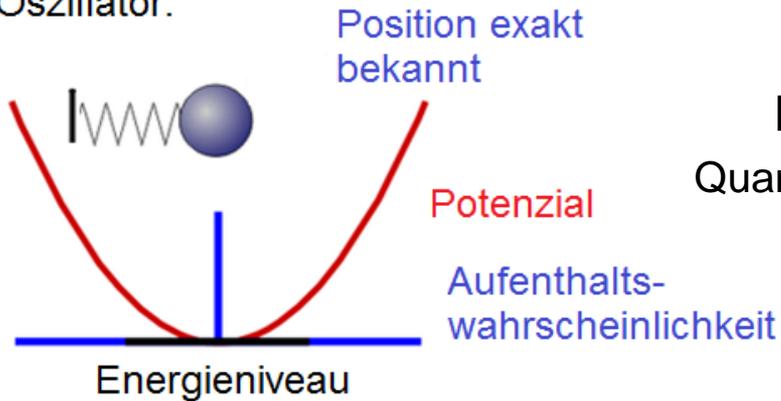
$$P(x) = |\psi_1(x) + \psi_2(x)|^2 \\ \neq |\psi_1(x)|^2 + |\psi_2(x)|^2$$



In einer Linearkombination können die einzelnen Terme nicht realistisch gedeutet werden!

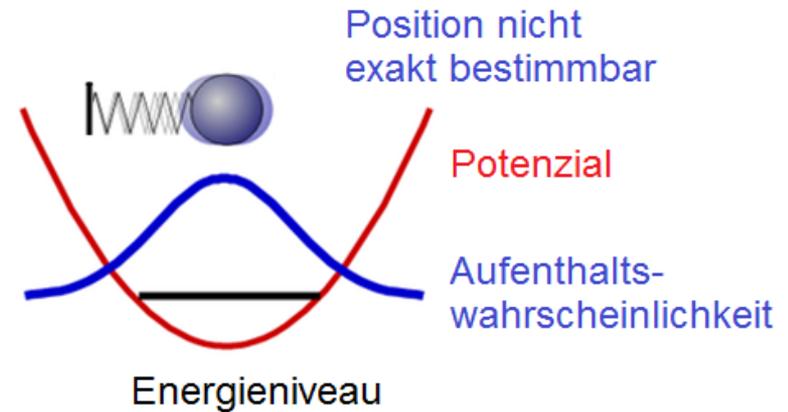
Quantisierung einer klassischen Theorie

klassischer
harmonischer
Oszillator:



Quantisierung

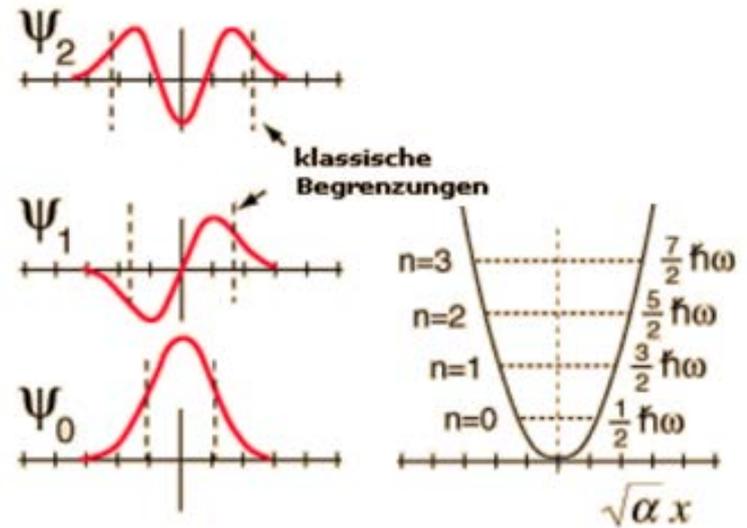
quantenmechanischer
harmonischer Oszillator



$$a^+ \Psi_n = \sqrt{n+1} \Psi_{n+1} \quad \text{Aufsteigeoperator}$$

$$a \Psi_n = \sqrt{n} \Psi_{n-1} \quad \text{Absteigeoperator}$$

$$\hat{N} = a^+ a \quad \text{Besetzungszahloperator}$$



Was sind Elementarteilchen

Oliver Passon | FD Kolloquium Wuppertal



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

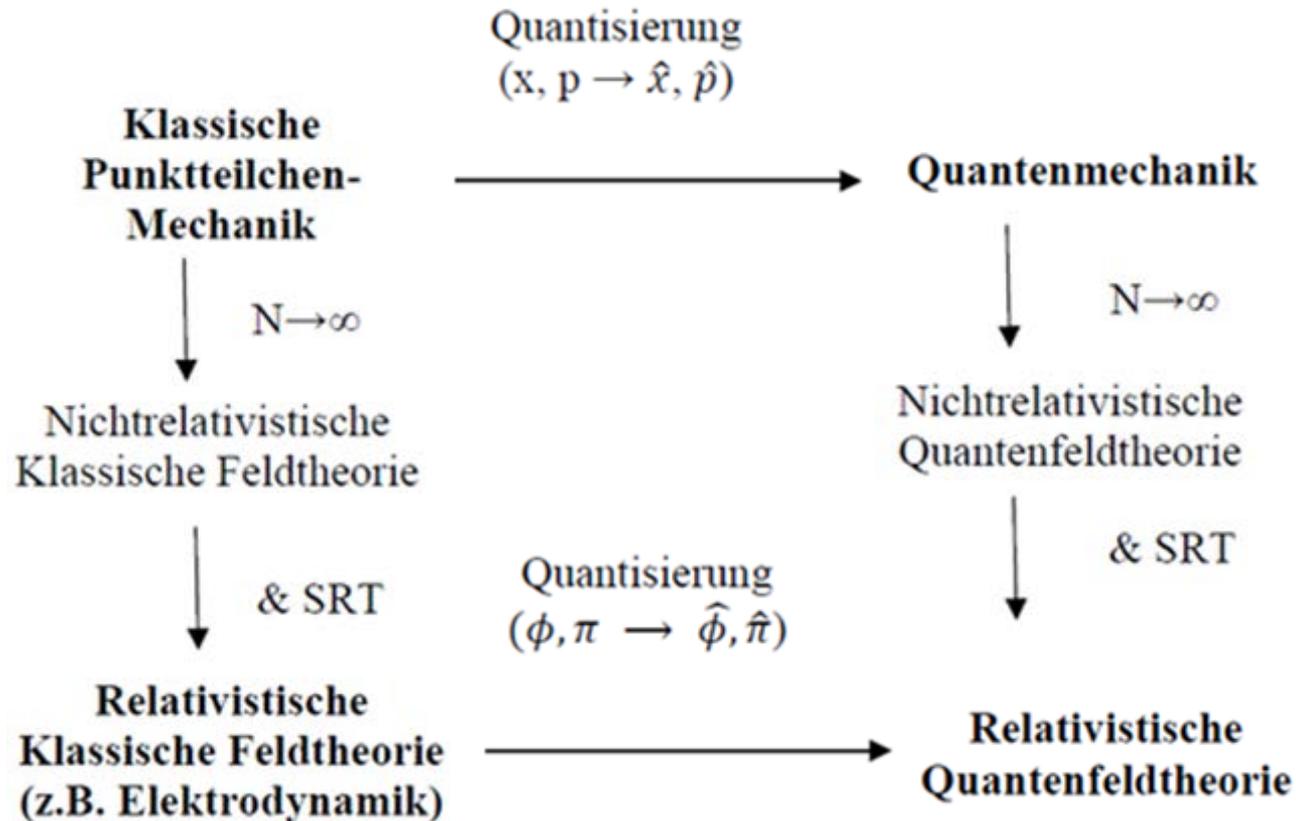
Teilchenbegriff in der Quantenmechanik

- Objekte der QM besitzen Eigenschaft „Anzahl“
- Objekte der QM besitzen die Eigenschaft „Ort“ (jedoch unscharf und unstetig)
- Ihnen fehlt „Identität“.
- **Mereologischer Aspekt:** Es gibt gebundene Zustände und Summenregeln für Eigenschaften.
- Der **kausale Aspekt** ist schwierig, denn...



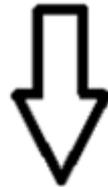
Slogan: Teilchen sind keine lokalen **Ursachen**, sondern die lokalen **Wirkungen** einer nicht-lokalen Ursache.

Elementarteilchenphysik bzw. Quantenfeldtheorie



Übergang zu unendlich vielen Freiheitsgraden

$N = 1, 2, 3, \dots$



$N \rightarrow \infty$



schwingende Saite

Auslenkung: $\phi(x, t)$ (statt: Ort des Teilchens i)

Quantisierung einer klassischen Theorie II

$$\left[\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \right] \phi(\mathbf{x}, t) = 0,$$

Lösung 

$$\phi(\mathbf{x}, t) = \int \frac{d^3 p}{f(\omega_{\mathbf{p}})} \left[a(\mathbf{p}) e^{\frac{1}{\hbar} i \mathbf{p} \cdot \mathbf{x}} + a^\dagger(\mathbf{p}) e^{-\frac{1}{\hbar} i \mathbf{p} \cdot \mathbf{x}} \right]$$

Quantisierung 

- Die reellwertige Funktion ϕ wird nun als Operator $\hat{\phi}$ umgedeutet.
- Daraus folgen algebraische Relationen für $a(p)$ und $a^+(p)$. Diese sind identisch mit denen der **Auf-** und **Absteigeoperatoren!**
- Ebenfalls kann der **Besetzungszahloperator** gebildet werden: $\hat{N} = a^+ a$

Die „Besetzungszahldarstellung“

$$a(\mathbf{p})|0\rangle = 0 \quad |0\rangle \text{ „Vakuuzustand“}$$

$$a^\dagger(\mathbf{p})|0\rangle = |1\rangle \quad \text{„Erzeugungsoperator“}$$

$$a^\dagger(\mathbf{p})|1\rangle = [a^\dagger(\mathbf{p})]^2|0\rangle = |2\rangle$$

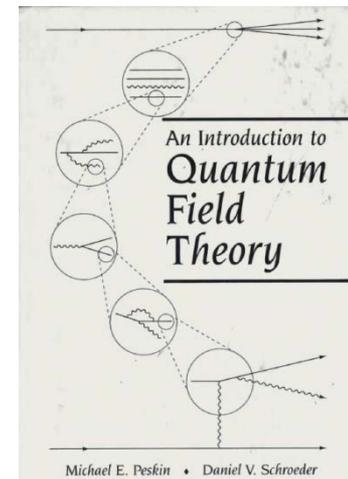
$$a(\mathbf{p})|4\rangle = |3\rangle \quad \text{„Vernichtungsoperator“}$$

- Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren erlauben, die sog. „**Besetzungszahldarstellung**“ der Zustände zu konstruieren.
- Die Quantenfeldtheorie beschreibt auch Situationen, in denen sich die **Teilchenzahl ändert!**

Sprechweise: Elementarteilchen sind **Anregungen** des Quantenfeldes.

So the operator $a_{\mathbf{p}}^\dagger$ creates momentum \mathbf{p} and energy $\omega_{\mathbf{p}} = \sqrt{|\mathbf{p}|^2 + m^2}$. Similarly, the state $a_{\mathbf{p}}^\dagger a_{\mathbf{q}}^\dagger \cdots |0\rangle$ has momentum $\mathbf{p} + \mathbf{q} + \cdots$. It is quite natural to call these excitations *particles*, since they are discrete entities that have the proper relativistic energy-momentum relation. (By a *particle* we do not mean something that must be localized in space; $a_{\mathbf{p}}^\dagger$ creates particles in momentum eigenstates.) From now on we will refer to $\omega_{\mathbf{p}}$ as $E_{\mathbf{p}}$ (or simply E), since it really is the energy of a particle. Note, by the way, that the energy is always positive: $E_{\mathbf{p}} = +\sqrt{|\mathbf{p}|^2 + m^2}$.

(Peskin und Schroeder S. 22)



Sind Elementarteilchen Teilchen?

- Die Besetzungszahldarstellung scheint ein Indiz für „Teilchenhaftigkeit“
Allerdings:
 - Die „**Besetzungszahl**“ eines Zustandes der Quantenfeldtheorie ist nun eine Eigenschaft wie der „**Ort**“ in der Quantentheorie. Es gibt also auch Überlagerungen von Zuständen mit unterschiedlicher Teilchenzahl: $|\Psi\rangle = |2\rangle + |3\rangle$
 - Die Besetzungszahldarstellung kann für Theorien mit Wechselwirkung nicht angegeben werden.
(Fraser, D. and Earman, J. (2008) Stud. in the Hist. and Phil. of Mod. Phys., 39, 841-859.)
 - In der (relativistischen) Quantenfeldtheorie gibt es **keinen** Ortsoperator.
(Malament, D. B. (1996) in: R. Clifton (Hrsg.) „Perspectives on Quantum Reality“, Dordrecht: Kluwer sowie Halvorson, H. und Clifton, R. (2002) Phil. of Sci., Vol. 69, No. 1. 1-28.)

Nebenbemerkung: Der Photoeffekt

Interessanterweise enthält das übliche Oberstufencurriculum bereits einen Gegenstand, der seine fachwissenschaftliche Begründung erst in der Quantenfeldtheorie findet. Die ist das sog. Photon!

Allerdings:

- Kann der Photoeffekt auch halbklassisch erklärt werden (Gregor Wentzel und Guido Beck 1926)
- Sind die Photonen als „Anregungszustände“ des EM-Feldes nicht lokalisiert
- Gibt es keine „Wellenfunktion des Photons“

(siehe Kuhn und Strnad (1995) „Quantenfeldtheorie“ Vieweg)



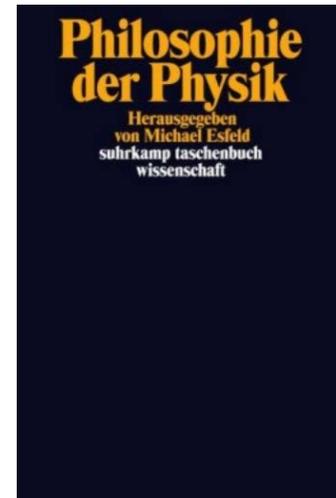
Die Erklärung des Effektes mit „Erbsen-Photonen“ hat die selbe Qualität wie das Bohr'sche Atommodell.

Was sind Elementarteilchen?

Operational sind Teilchen nicht mehr als:

- i. Bündel dynamischer Größen (Masse, Energie, Spin, ...)
- ii. approximativ lokalisierbar durch einen Detektor
- iii. statistisch unkorreliert, d.h. sie werden unabhängig voneinander gemessen.

(aus B. Falkenburg (2012) „Was sind subatomare Teilchen?“
in M. Esfeld (Hg.) Philosophie der Physik, Berlin: Suhrkamp.)



Feynman-Graphen, Kraftwirkung durch den Austausch „virtueller“ Teilchen



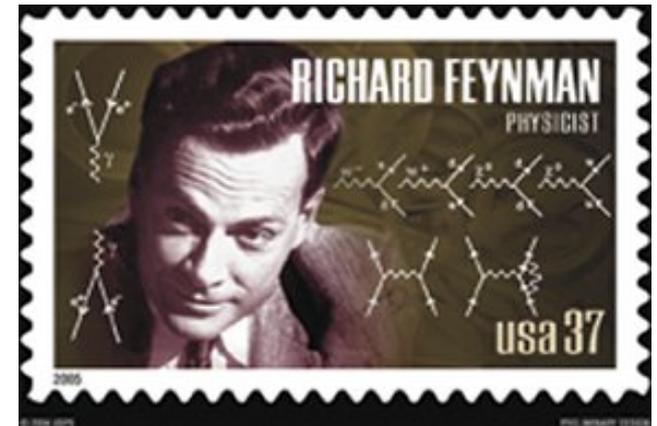
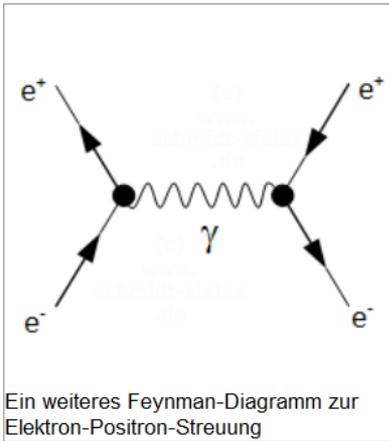
PHOTON
NACHWEIS: 1905

γ

AUSTAUSCHTEILCHEN

Masse:	0
Elektrische Ladung:	0
Starke Ladung:	-
Schwache Ladung:	0
Mittlere Lebensdauer:	unbegrenzt
Reichweite:	unbegrenzt

The image shows a card for the Photon particle. At the top, it says 'PHOTON' and 'NACHWEIS: 1905'. In the center is a yellow star with a white outline and the Greek letter gamma (γ) inside. Below the star, it says 'AUSTAUSCHTEILCHEN'. At the bottom, there is a table with properties: Masse: 0, Elektrische Ladung: 0, Starke Ladung: -, Schwache Ladung: 0, Mittlere Lebensdauer: unbegrenzt, and Reichweite: unbegrenzt.



Feynman-Diagramme ...

- ...repräsentieren mathematische Ausdrücke, die bei der näherungsweisen Bestimmung der „Streumatrix S “ zu einer bestimmten Näherung n -ter Ordnung summiert werden müssen.
- ... sind keine Visualisierung einer „Teilchenbahn“ oder der räumlichen Lage der Streupartner.
- ... erfüllen (zusammen mit den Feynmanregeln) eine wichtige Aufgabe bei der **rechnerischen Bestimmung** von Wirkungsquerschnitten.
- ... beschreiben mit den inneren Linien sog. virtuelle Zustände (d.h. $E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$ gilt nicht).

Was ist an der Erklärung einer Kraftwirkung durch den Austausch „virtueller“ Teilchen problematisch?



Abb. 3 Wenn zwei Menschen in Booten sich einen Ball zuwerfen, bewegen sie sich auseinander. Sie wechselwirken miteinander, in diesem Fall üben sie eine abstoßende Kraft aufeinander aus. Gleiches gilt für Elementarteilchen, indem sie ein Teilchen austauschen. Für andere Arten von Wechselwirkungen (anziehende Kraft, Teilchenumwandlungen etc.) gilt die Analogie nicht.

Nach: Weingard, R. (1988) „Virtual Particles and the Interpretation of Quantum Field Theory“, in: H. R. Brown und R. Harré (Hrsg.) „Philosophical Foundations of Quantum Field Theory“ 1988, Oxford: OUP.

- Jedes einzelne Feynman-Diagramm dient der Berechnung **eines** Terms S_n für das volle Streumatrixelement ($S = \sum S_n$)
- Die experimentell zugängliche Übergangswahrscheinlichkeit gewinnt man jedoch aus dem **Quadrat der Summe** dieser Anteile: $P = |\langle \Psi_f | \sum S_n | \Psi_i \rangle|^2$ (hier bezeichnen die Ψ_n die Anfangs- und Endzustände des Streuprozesses)
- In einer Superposition können die **einzelnen Term nicht realistisch** gedeutet werden (Überlagerungszustände in der Quantentheorie drücken ja gerade aus, dass für die betreffende Größe *keine* feste Eigenschaft vorliegt)
- Zudem handelt es sich lediglich um ein spezielles Lösungsverfahren („**Störungstheorie**“)

Naheliegende Einwände

Modelle müssen „verkürzen“ und sind deshalb im strengen Sinne immer falsch

- Es sollte ihre Erklärungsfunktion aber nicht durch einen fachwissenschaftlichen Fehler erkaufte werden...

Das Material der „Netzwerk Teilchenwelt“ stammt von CERN Physikern, die darin ihre eigene Arbeit beschreiben!

- Die hier referierten Argumente stammen tatsächlich aus der Diskussion innerhalb der Philosophie der Physik. Das operationale Verständnis der Teilchenphysiker sollte nicht unkritisch in die Schule transportiert werden.

Fazit, Konsequenzen & Lösungsvorschläge

- Elementarteilchenphysik nicht behandeln?
 - Nein! Der besondere Bildungswert der modernen Physik liegt gerade darin, dass sie zu einer grundlegenden Reflexion des Prozesses der physikalischen Erkenntnisgewinnung zwingt und damit auch zu einer Erweiterung des begrifflichen Rahmens der Physik führt.
 - Auch andere (fast alle?) Bereiche der Physik erfordern abstrakte Begriffsbildungen. Auch hier muss die unterrichtliche Behandlung nicht scheitern.
- Tatsächlich treten ähnliche Probleme auch in anderen Bereichen der Schulphysik auf:
 - **Wärme**begriff (wird mit „Stofflichkeit“ assoziiert; kann aber im fachwissenschaftlichen Sinne nicht gespeichert werden)
 - Mechanische Modelle in der **Optik**
 - Teilchenmodelle des **elektrischen Stroms**
 - Ausbreitung **elektromagnetischer Wellen**
 - ...

Die Entwicklung anschlussfähiger und fachlich tragfähiger Konzepte zu Quanten- und Teilchenphysik kann somit bereits in diesen Bereichen (Wärmelehre, Optik, E-Lehre etc.) der Schulphysik vorbereitet werden.

Literatur:

OP (2014) „Was sind Elementarteilchen und gibt es „virtuelle“ Photonen?“, Praxis der Naturwissenschaften Physik in der Schule. Heft 5, 63. Jahrgang, S. 44.