

Für Quantenfelder können die Gesetze der elektromagnetischen Wechselwirkung aus einem Eichprinzip hergeleitet werden (H. Weyl 1921, 1929).

1.2.1 Globale Eichinvarianz

Die Erwartungswerte quantenmechanischer Observabler (einschließlich der Lagrangefunktion!)

$$\langle \mathcal{O} \rangle = \int \psi^* \mathcal{O} \psi$$

sind invariant unter **globalen Phasenrotationen** der Wellenfunktion

$$\psi(x) \longrightarrow \psi'(x) = e^{iQ\alpha} \psi(x).$$

Nur relative Phasen zwischen Zuständen sind meßbar.

Die Invarianz der Lagrangefunktion (Forminvarianz der Wellengleichung) unter Phasentransformationen entspricht einer **globalen U(1)-Symmetrie**, genannt **“Eichsymmetrie”**, die nach dem Noether'schen Theorem (E. Noether, 1918) zur Erhaltung der Wahrscheinlichkeit und von Ladungen (inneren Quantenzahlen der Teilchenzustände) führt.

komplexe Felder unter $U(1)$ -Eichtransformationen

$$\begin{aligned}\phi(x) &\longrightarrow \phi'(x) = e^{iQ\alpha} \phi(x), \\ \phi^*(x) &\longrightarrow \phi^{*'}(x) = e^{-iQ\alpha} \phi^*(x).\end{aligned}$$

d.h. auch unter infinitesimalen Variationen der Felder

$$\begin{aligned}\phi(x) &\longrightarrow \phi'(x) = \phi(x) + \delta\phi(x) = \phi(x) + iQ(\delta\alpha)\phi(x), \\ \phi^*(x) &\longrightarrow \phi^{*'}(x) = \phi^*(x) + \delta\phi^*(x) = \phi^*(x) - iQ(\delta\alpha)\phi^*(x)\end{aligned}$$

bedeutet für beliebige ortsunabhängige $\delta\alpha$, (d.h. es gilt $\delta(\partial_\mu\phi) = iQ(\delta\alpha)\partial_\mu\phi$):

$$\begin{aligned}\delta\mathcal{L} &= \frac{\partial\mathcal{L}}{\partial\phi}\delta\phi + \frac{\partial\mathcal{L}}{\partial(\partial_\mu\phi)}\delta(\partial_\mu\phi) + \frac{\partial\mathcal{L}}{\partial\phi^*}\delta\phi^* + \frac{\partial\mathcal{L}}{\partial(\partial_\mu\phi^*)}\delta(\partial_\mu\phi^*) \\ &= \left[\partial_\mu \frac{\partial\mathcal{L}}{\partial(\partial_\mu\phi)} \right] iQ(\delta\alpha)\phi + \frac{\partial\mathcal{L}}{\partial(\partial_\mu\phi)} iQ(\delta\alpha)\partial_\mu\phi + c.c. \\ &= iQ(\delta\alpha)\partial_\mu \left[\frac{\partial\mathcal{L}}{\partial(\partial_\mu\phi)} \phi \right] - iQ(\delta\alpha)\partial_\mu \left[\frac{\partial\mathcal{L}}{\partial(\partial_\mu\phi^*)} \phi^* \right] \equiv 0,\end{aligned}$$

unter Verwendung der Euler-Lagrange-Gleichungen.

Es gilt folglich die Kontinuitätsgleichung

$$\partial_\mu j^\mu = \frac{\partial}{\partial t} \rho + \vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0$$

für die 4-Stromdichte $j^\mu = (\rho, \vec{j})$ der Ladung $Q = \int d^3x \rho$:

$$j^\mu \equiv -iQ \left(\frac{\partial\mathcal{L}}{\partial(\partial_\mu\phi)} \phi - \frac{\partial\mathcal{L}}{\partial(\partial_\mu\phi^*)} \phi^* \right)$$

Erhaltungsgröße ist:

$$\frac{d}{dt}Q = 0.$$

Die quantenmechanischen Erwartungswerte sollen invariant sein unter **lokaler** Phasenwahl der Wellenfunktionen oder Felder, d.h. unabhängig an verschiedenen Raum-Zeit-Punkten:

$$\psi(x) \longrightarrow \psi'(x) = e^{iQ\alpha(x)}\psi(x).$$

Ortsabhängige Phasentransformationen (lokale Eichtransformationen) bedeuten für die Ableitungen der Felder in den Wellengleichungen:

$$\partial_\mu\psi(x) \longrightarrow \partial_\mu\psi'(x) = e^{iQ\alpha(x)}[\partial_\mu\psi(x) + iQ(\partial_\mu\alpha(x))\psi(x)].$$

Invarianz der Lagrangedichte und Forminvarianz der Wellengleichungen kann erreicht werden, indem die gewöhnliche Ableitung durch eine **eich-kovariante Ableitung** ersetzt wird:

$$\partial_\mu \longrightarrow D_\mu \equiv \partial_\mu + ieQA_\mu(x),$$

wobei $q = eQ$ die elektrische Ladung des Feldes $\psi(x)$ ist ($e =$ Elementarladung, $Q =$ Ladungsquantenzahl) und $A_\mu(x)$ das 4-Potential des elektromagnetischen Feldes, das sog. Eichvektorfeld zur Eichgruppe $U(1)$ mit Spin 1, das unter den Phasenrotationen transformiert wie

$$A_\mu(x) \longrightarrow A'_\mu(x) = A_\mu(x) - \frac{1}{e}\partial_\mu\alpha(x)$$

(\equiv Eichtransformation des elektromagnetischen Feldes).

$$\begin{aligned}
D_\mu \psi(x) &= (\partial_\mu + ieQA_\mu)\psi \longrightarrow \\
D'_\mu \psi'(x) &= (\partial_\mu + ieQA'_\mu(x))e^{iQ\alpha(x)}\psi(x) \\
&= e^{iQ\alpha(x)}[\partial_\mu + iQ\partial_\mu\alpha(x) + ieQA_\mu(x) - iQ\partial_\mu\alpha(x)]\psi(x) \\
&= e^{iQ\alpha(x)}[\partial_\mu + ieQA_\mu(x)]\psi(x) \equiv e^{iQ\alpha(x)}D_\mu\psi(x)
\end{aligned}$$

und $\psi^* D_\mu \psi$ ist invariant unter lokalen Phasentransformationen.

Dies wurde durch die Einführung einer Wechselwirkung für das Feld ψ , der elektromagnetischen Wechselwirkung für die U(1)-Phasentransformationen, erreicht.

Die globale U(1)-Symmetrie der Feldgleichungen für $\psi(x)$ führt zur Erhaltung der elektrischen Ladung, der Quellen des Eichfeldes, auch bei Wechselwirkung mit dem elektromagnetischen Feld. Die Eichfeldgleichungen mit der zugehörigen Eichinvarianz enthalten automatisch Ladungserhaltung.

Die Wechselwirkung (Kopplungsterme zwischen Materiefeld $\psi(x)$ und Eichwechselwirkungsfeld $A_\mu(x)$) ist (eindeutig) festgelegt durch die Forderung der lokalen Phaseninvarianz, das **lokale Eichprinzip**, d.h. durch die **kovariante Ableitung**

$$D_\mu \psi(x) = \partial_\mu \psi(x) + ieQA_\mu(x)\psi(x)$$

(minimale eichinvariante Kopplung).

Elektromagnetische Wechselwirkung zwischen Fermionen (Elektronen) und dem Photonfeld (QED):

Die Lagrangedichte für das freie Dirac-Feld

$$\mathcal{L}_{\text{frei}} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi$$

wird ersetzt durch die lokal eichinvariante Form mit minimaler Kopplung

$$\begin{aligned}\mathcal{L} &= \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi \\ &= \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi - eQA_\mu \bar{\psi}\gamma^\mu\psi \\ &= \mathcal{L}_{\text{frei}} - j^\mu A_\mu\end{aligned}$$

mit dem (erhaltenen) elektromagnetischen Strom

$$j^\mu = eQ\bar{\psi}\gamma^\mu\psi.$$

Zusammen mit der Lagrangedichte für das freie elektromagnetische Feld ist die **Lagrangedichte der Quantenelektrodynamik:**

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{QED} &= \mathcal{L}_{\text{frei}}^{\text{Photon}} + \mathcal{L}_{\text{frei}}^{\text{Fermion}} + \mathcal{L}_{\text{WW}} \\ &= -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi - j^\mu A_\mu \\ &= -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{\psi}i\gamma^\mu \partial_\mu\psi - m\bar{\psi}\psi - j^\mu A_\mu \\ &= \mathcal{L}_{\text{kin}}^{\text{Photon}} + \mathcal{L}_{\text{kin}}^{\text{Fermion}} + \mathcal{L}_{\text{Masse}}^{\text{Fermion}} + \mathcal{L}_{\text{WW}} = T - V.\end{aligned}$$

Die Beiträge zur gesamten Lagrangedichte sind additiv und erfüllen die U(1)-Eichinvarianz.

Elektromagnetische Wechselwirkung zwischen geladenen Spin-0-Bosonen und dem Photonfeld:

Die Lagrangedichte für das freie Klein-Gordon-Feld

$$\mathcal{L}_{\text{frei}} = \partial_{\mu}\phi^* \partial^{\mu}\phi - m^2\phi^* \phi$$

wird ersetzt durch die lokal eichinvariante Form mit minimaler Kopplung ($q = eQ$)

$$\begin{aligned}\mathcal{L} &= -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + (D_{\mu}\phi)^* D^{\mu}\phi - m^2\phi^* \phi \\ &= -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \partial_{\mu}\phi^* \partial^{\mu}\phi - m^2\phi^* \phi \\ &\quad -iq[\phi^* \partial^{\mu}\phi - (\partial^{\mu}\phi^*)\phi]A_{\mu} + q^2 A_{\mu}A^{\mu}\phi^* \phi \\ &= \mathcal{L}_{\text{frei}} - j^{\mu} A_{\mu} + q^2 A_{\mu}A^{\mu}\phi^* \phi \\ &= \mathcal{L}_{\text{kin}}^{\text{Photon}} + \mathcal{L}_{\text{kin}}^{\text{Boson}} + \mathcal{L}_{\text{Masse}}^{\text{Boson}} + \mathcal{L}_{\text{WW}}.\end{aligned}$$

Dabei ist $j^{\mu} = iq[\phi^* \partial^{\mu}\phi - (\partial^{\mu}\phi^*)\phi]$ der erhaltene elektromagnetische Strom für die freien Bosonen.

Nach dem Noether-Theorem hat der erhaltene Strom für die an das Photonfeld koppelnden Bosonen eine andere Form. Der Wechselwirkungsterm erhält einen zusätzlichen Beitrag in der Form einer Kontaktwechselwirkung zwischen Photonen und Materie-Bosonen (eich- und lorentzinvariant).

Beispiel:

Erweiterung der Isospinsymmetrie $SU(2)$ zu einer lokalen Eichsymmetrie (Yang, Mills 1954):

Freie Lagrangefunktion für Nukleonen (Proton, Neutron):

$$\mathcal{L}_0 = \bar{\psi} I (i\gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi.$$

Proton und Neutron bilden dabei ein Isotopenspindublett (2-dimensionale Darstellung der Isospingruppe).

$$\psi = \begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}.$$

Beide Fermionfelder $p(x)$ und $n(x)$ sind jeweils 4-Spinoren.

Die freie Lagrangefunktion ohne Wechselwirkung ist diagonal im 2-dimensionalen Isospinraum (2-dim. Einheitsmatrix I) und invariant unter globalen Isospinrotationen

$$\psi(x) \longrightarrow \psi'(x) = e^{i\vec{\alpha} \cdot \vec{I}} \psi(x) = e^{i\vec{\alpha} \cdot \vec{\tau}/2} \psi(x),$$

wobei $\vec{\tau}$ der 3-Isovektor der Pauli'schen 2×2 Spinmatrizen ist (die drei Generatoren der Isospingruppe $SU(2)$, $\vec{I} = \vec{\tau}/2$, in der fundamentalen 2-dimensionalen Darstellung; Bezeichnung $\vec{\tau}$ statt $\vec{\sigma}$ für den Isospin).

Wechselwirkung:

Übergang zu einer **lokalen $SU(2)$ -Eichsymmetrie**, d.h. Forderung nach Invarianz der Lagrangefunktion und Feldgleichungen unter **lokalen Eichtransformationen**

$$\psi(x) \longrightarrow \psi'(x) = e^{i\vec{\alpha}(x)\cdot\vec{\tau}/2}\psi(x) \equiv G(x)\psi(x).$$

Damit transformiert der 4-Gradient des Feldes wie

$$\partial_\mu\psi(x) \longrightarrow G(x)(\partial_\mu\psi(x)) + (\partial_\mu G(x))\psi(x).$$

\implies Einführen einer **kovarianten Ableitung** (kovariant unter den lokalen Eichtransformationen $G(x)$):

$$D_\mu(x) = I\partial_\mu + igB_\mu(x)$$

mit der 2×2 -Einheitsmatrix I auf dem Isospinraum und einer Kopplungskonstanten g , die die Stärke der Eichwechselwirkung angibt.

Isospinraum, definiert durch ($a = 1, 2, 3$):

$$\begin{aligned} B^\mu(x) &= \frac{1}{2} \vec{\tau} \cdot \vec{b}^\mu(x) = \frac{1}{2} \tau_a b_a^\mu(x) \\ &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} b_3^\mu(x) & b_1^\mu(x) - ib_2^\mu(x) \\ b_1^\mu(x) + ib_2^\mu(x) & -b_3^\mu(x) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

mit dem Isektor $\vec{b}_\mu = (b_1^\mu, b_2^\mu, b_3^\mu)$ der drei Eichvektorfelder $b_i(x)$, die den drei Generatoren (Ladungsoperatoren) der $SU(2)$ -Eichsymmetrie $\vec{I} = \vec{\tau}/2$ entsprechen.

Um die lokale nicht-Abelsche $SU(2)$ -Eichsymmetrie zu erhalten, müssen also 3 neue Eichvektorpotentiale eingeführt werden, die 3 Eichbosonfeldern entsprechen, die die Eichwechselwirkungen vermitteln.

(Dies erinnert an die 3 Austauscheteilchen W^\pm und Z^0 der schwachen Wechselwirkung, die ebenfalls globale $SU(2)$ -Symmetrie besitzt, aber an Quark- und Leptonfelder koppelt.)

Die kovariante Ableitung soll unter lokalen Eichtransformationen ebenso transformieren wie die Felder, um die lokale Eichinvarianz der Lagrangefunktion zu gewährleisten, d.h.

$$D_\mu \psi \longrightarrow D'_\mu \psi' = G(x)(D_\mu \psi).$$

Eichvektorfelder:

$$\begin{aligned}D'_\mu \psi' &= (\partial_\mu + igB'_\mu)\psi' \\ &= G(\partial_\mu \psi) + (\partial_\mu G)\psi + igB'_\mu(G\psi) \\ &\equiv G(\partial_\mu + igB_\mu)\psi \\ &= G(\partial_\mu \psi) + igG(B_\mu \psi)\end{aligned}$$

und damit

$$igB'_\mu(G\psi) = igG(B_\mu \psi) - (\partial_\mu G)\psi$$

für beliebige Werte des Nukleonfelds ψ , d.h. nach Multiplizieren mit G^{-1} :

$$\begin{aligned}B'_\mu &= GB_\mu G^{-1} + \frac{i}{g}(\partial_\mu G)G^{-1} \\ &= G\left[B_\mu + \frac{i}{g}G^{-1}(\partial_\mu G)\right]G^{-1}.\end{aligned}$$

Dies ist die nicht-Abelsche Verallgemeinerung der $U(1)$ -Eichtransformation des elektromagnetischen Potentials (Isoskalar), die analog lautet:

$$\begin{aligned}A'_\mu &= G_{EM}A_\mu G_{EM}^{-1} + \frac{i}{eQ}(\partial_\mu G_{EM})G_{EM}^{-1} \\ &\equiv A_\mu - \frac{1}{e}\partial_\mu \alpha(x)\end{aligned}$$

mit der lokalen $U(1)$ -Eichtransformation

$$G_{EM}(x) = e^{iQ\alpha(x)}.$$

Eichsymmetrien werden durch sog. **Lie-Gruppen** beschrieben:

Gruppen von Transformationen $g(\alpha)$, die durch einen Satz kontinuierlicher Parameter α_a ($a = 1, \dots, n$) beschrieben werden und analytische Funktionen dieser Parameter sind.

Sie lassen sich aus infinitesimal kleinen Transformationen nahe der Einheitstransformation I ,

$$\delta g = g(\delta\alpha) = I + i\delta\alpha^a T^a + \mathcal{O}(\delta\alpha^2),$$

zusammensetzen. T^a ($a = 1, \dots, n$) sind die **Erzeugenden** oder **Generatoren** der Gruppe.

Alle Gruppenelemente lassen sich in der Form

$$g(\alpha) = e^{i\alpha^a T^a}$$

darstellen (Phasentransformationen der Wellenfunktion).

Die Transformationen sind **unitär**, wenn die Erzeugenden **hermitesch** sind. Alle Darstellungen endlicher (endliche Zahl von Parametern) oder kompakter (beschränkter Parameterraum) Lie-Gruppen lassen sich darauf zurückführen (geeignete Parametrisierung).

Unitarität ist wegen der Erhaltung der Wahrscheinlichkeit eine Bedingung für Symmetrietransformationen von Zuständen in der Quantenmechanik.

Observable und Erhaltungsgrößen.

Jeder Satz von n linear unabhängigen Generatoren einer Lie-Gruppe erfüllt die Vertauschungsrelationen

$$[T^a, T^b] = T^a T^b - T^b T^a = i f^{abc} T^c$$

mit den i.a. komplexen **Strukturkonstanten** f^{abc} und $[T^a, T^b] = -[T^b, T^a]$.

Mit der Vertauschung als zusätzlicher Operation bilden die Generatoren eine sog. **Lie-Algebra**. Die Strukturkonstanten sind spezifisch für die Lie-Algebra. Sie hängen aber von der Wahl der unabhängigen Generatoren und damit der Parameter der Gruppe ab.

Die Zahl der unabhängigen Parameter bzw. der Generatoren (Ladungsoperatoren) heißt die **Ordnung** n einer Lie-Gruppe. Die maximale Anzahl der miteinander vertauschenden und damit simultan diagonalisierbaren Generatoren ist der **Rang** r der Gruppe.

relevant:

1) die einzige **kommutative** oder **Abelsche** Lie-Gruppe $U(1)$ der unitären 1-dim. Phasentransformationen mit Ordnung und Rang 1 und

2) die Gruppen $SU(N)$ ($N \geq 2$) der **speziellen unitären Transformationen** N -dimensionaler komplexer Vektoren mit $U^\dagger U = 1$ und $\text{Det}(U) = 1$.

Sie erhalten das komplexe Betragsquadrat der Vektoren.

Die Generatoren $T = T^\dagger$ lassen sich **darstellen** als hermitesche $n \times n$ -Matrizen mit $\text{Spur}(T) = 0$ auf einem n -dimensionalen Vektorraum (Darstellungsraum).

Die **fundamentale Darstellung** ist die mit der niedrigsten Dimension n . Sie entspricht den Multipletts der fundamentalen Teilchenzustände.

Es gibt $2N^2 - N^2 - 1 = N^2 - 1$ unabhängige Matrizen dieser Art und damit Generatoren und unabhängige Parameter der Gruppe. Für die Gruppen $SU(N)$ ist der Rang $N - 1$ und gibt gleichzeitig die Zahl der verschiedenen fundamentalen Darstellungen an.