



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG

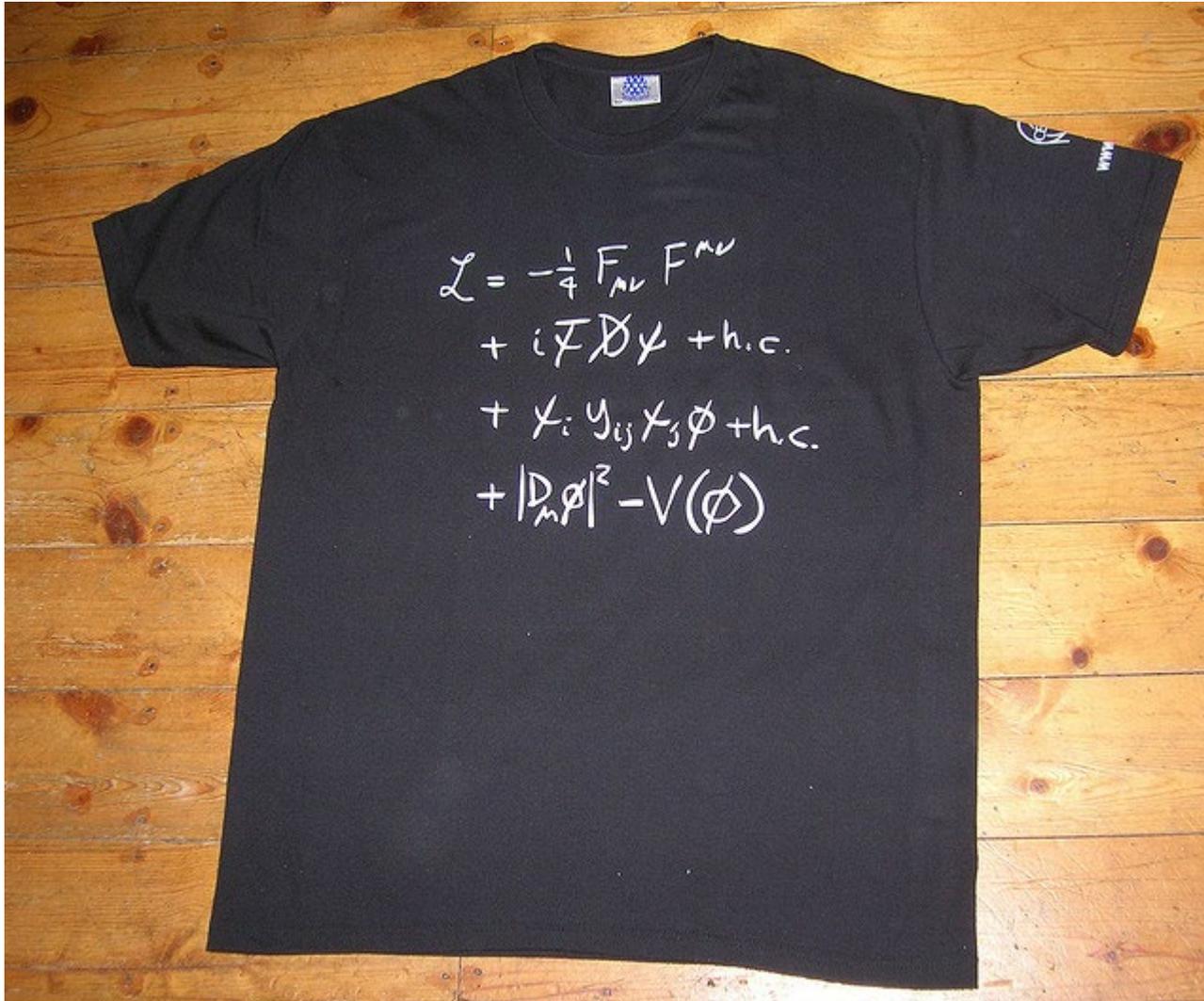
Bereich Mathematik und Naturwissenschaften, Fakultät Physik

Die Theorie hinter dem Standardmodell: Symmetrien & Lagrangedichten

Michael Kobel
Technische Universität Dresden

Netzwerk Teilchenwelt Summer School
CERN 02.08.2023

1. Theorien von früher und heute
2. Lagrangefunktion in klassischer Mechanik
3. Lagrangedichte der Teilchenphysik
4. **SYMMETRIEN**
5. Zusammenfassung und Bedeutung



❖ „Weltformel“
auf CERN
T-shirt und
Mouse Pad

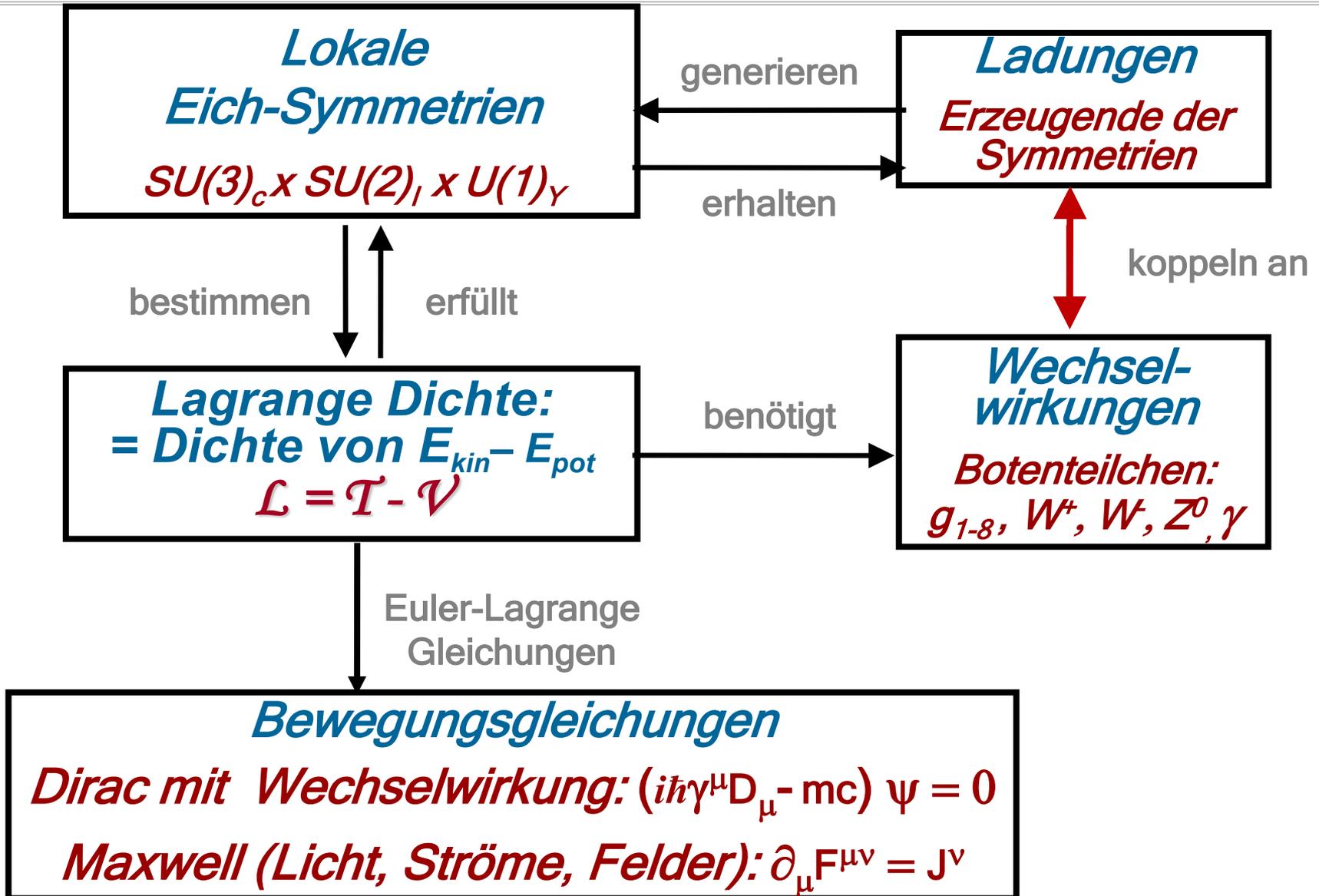


4. Mathematische Symmetrien (Hermann Weyl)

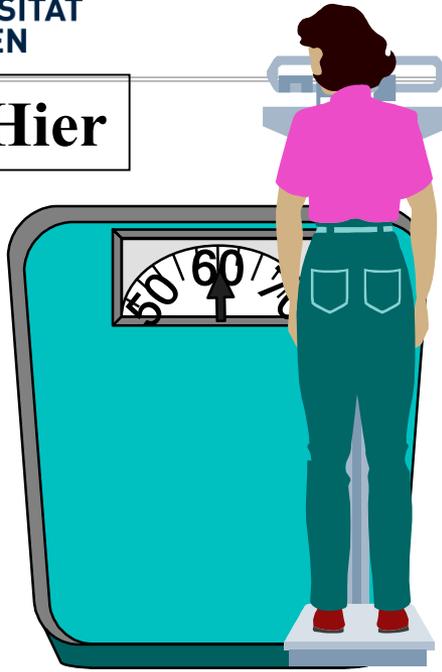
Werkzeugkiste: Transformationsgruppen



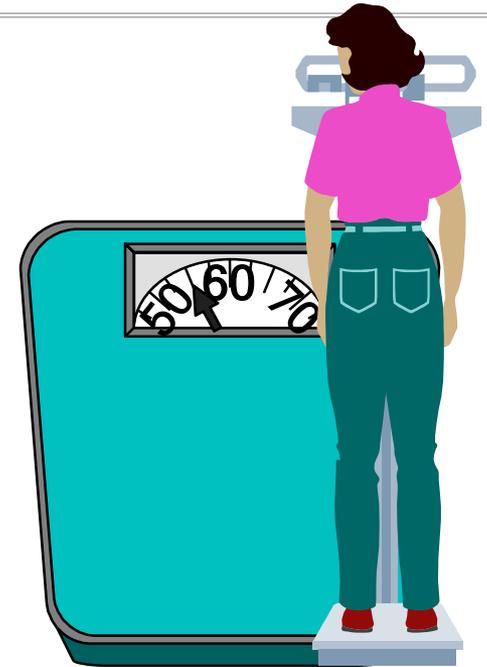
R.P. Feynman: Ein **Objekt** heißt *symmetrisch*, wenn man mit ihm **etwas anstellen** kann, **ohne** es am Ende, wenn man fertig ist mit der Prozedur, **geändert** zu haben.



Hier

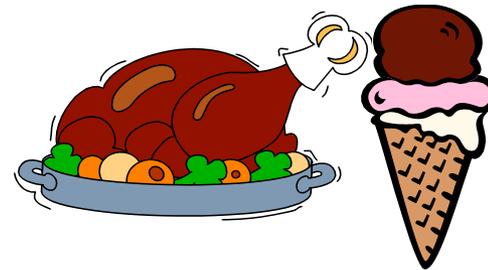
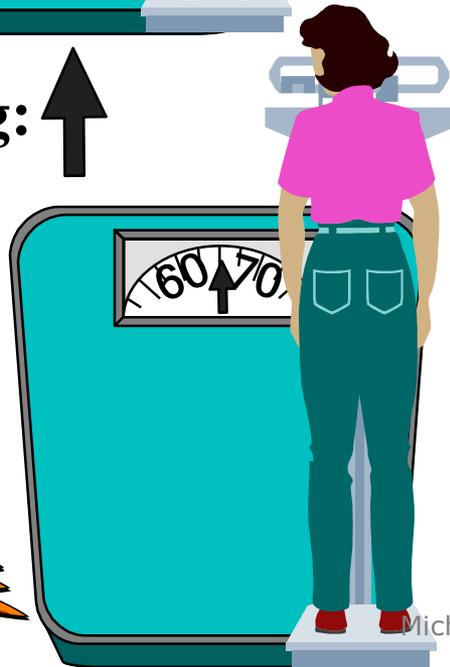


Dort

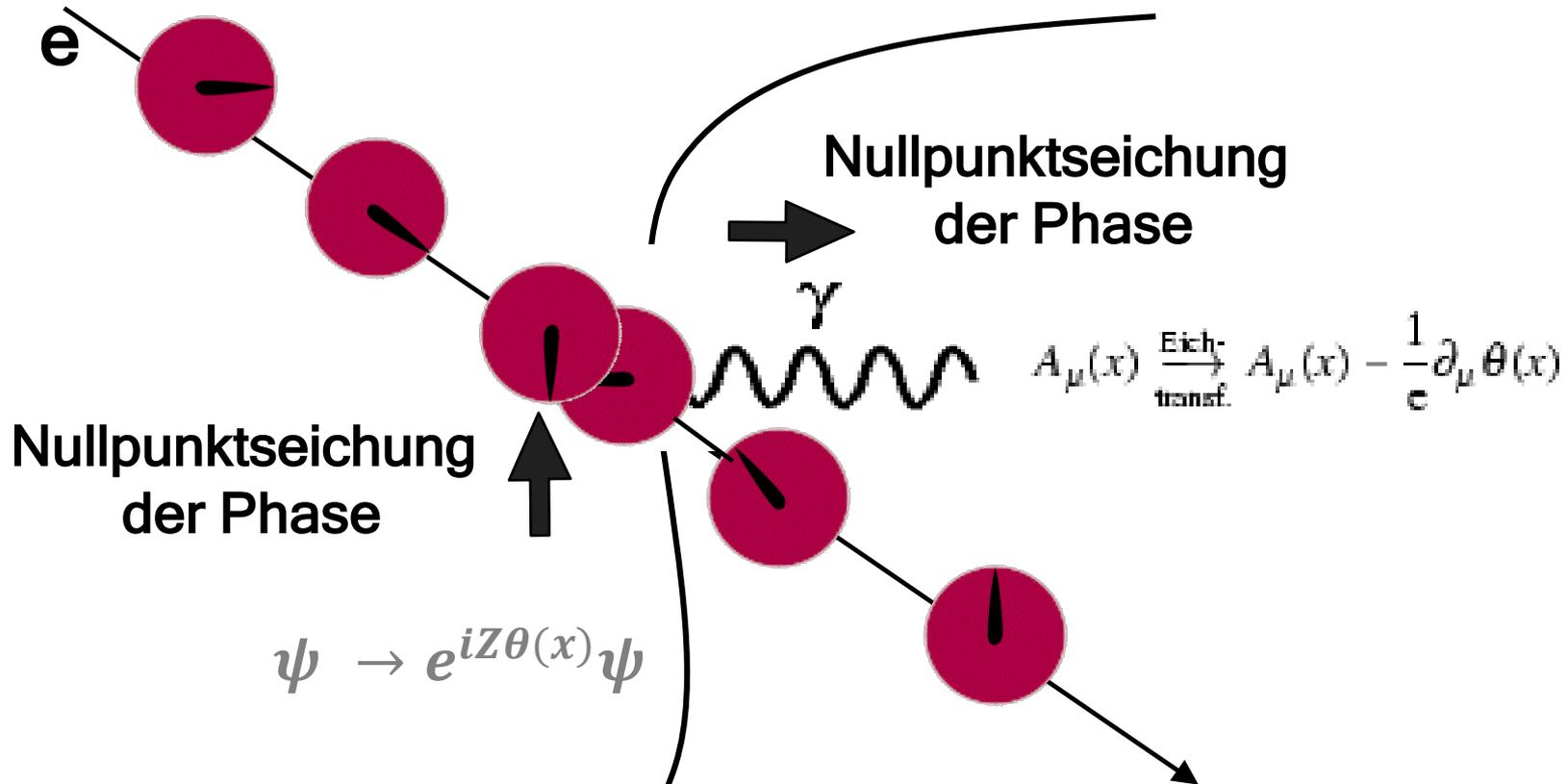


Messung: 

Messung: 

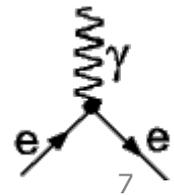


- ❖ Lokale Eichsymmetrie erfordert
 - Absorption oder Emission von "Eich-Teilchen"

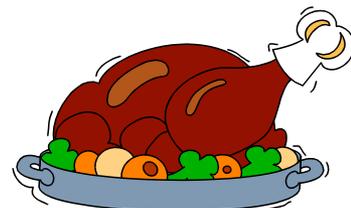
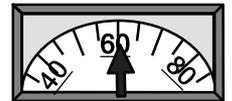
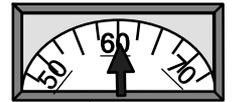


- QED 1927: Dirac, Jordan, Heisenberg, Pauli...
Eichtheorie 1941: Pauli, ...

Ergebnis:
Fundamentalprozess („Vertex“)
Aufnahme oder Abgabe
eines Eichbosons (*Photon* γ)



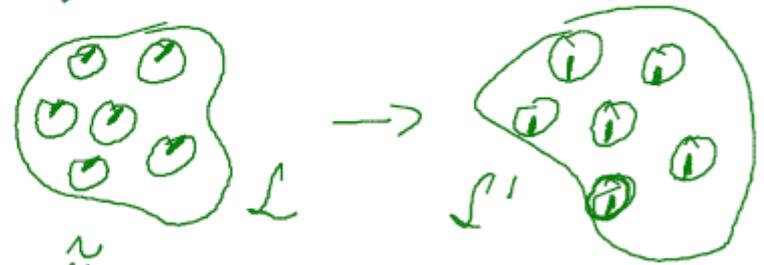
- ❖ Ziel der *Person (Teilchen)*:
 - Keine Änderung des *angezeigten Gewichts (Phasenwerts)* unter lokalen Änderung der Eichung
- ❖ *Sensitivität* auf Umeichungen
 - Bestimmt durch *Meßskala (Ladungszahl Z)*
- ❖ Wahrscheinlichkeit der *Nahrungsänderung (Wechselwirkung)*
 - *Häufigkeit der Gewichtskontrolle (Kopplung $e =: g_e \sqrt{(\hbar c \epsilon_0)}$)*
- ❖ Zunahme oder Abnahme von *Gewicht (Phase)*
 - in Form von *Nahrung (Eichbosonen: Photonen)*
- ❖ Menge der *Zu- und Abnahme (QM-Amplitude)*
 - Produkt von *Sensitivität * Häufigkeit (Produkt $Z * e$)*



• globale $U(1)_Z$ Symmetrie

$$\left. \begin{aligned} \psi &\rightarrow \psi' = e^{i\theta \hat{z}} \psi \\ \tilde{\psi} &\rightarrow \tilde{\psi}' = e^{-i\theta \hat{z}} \tilde{\psi} \end{aligned} \right\}$$

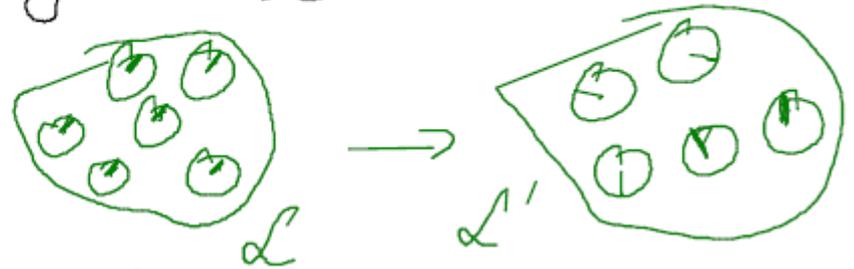
Neu-Definition des Phase-Wertes



$\Rightarrow \mathcal{L}_{QED}^{\text{frei}} = i \tilde{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu \psi - m \tilde{\psi} \psi$ invariant

• Pauli 1941 lokale $U(1)_Z$ Symmetrie

$$\left. \begin{aligned} \psi &\rightarrow \psi' = e^{i\theta(x^M) \hat{z}} \psi \\ \tilde{\psi} &\rightarrow \tilde{\psi}' = e^{-i\theta(x^M) \hat{z}} \tilde{\psi} \end{aligned} \right\}$$



$\mathcal{L}'_{QED} = i \tilde{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu \psi - \cancel{\partial_\mu \theta \tilde{\psi} \gamma^\mu \psi} - m \tilde{\psi} \psi \neq \mathcal{L}$
weil $\partial_\mu \psi' = \partial_\mu (e^{i\theta(x^M) \hat{z}} \psi) = e^{i\theta \hat{z}} [\partial_\mu \psi + i \hat{z} \partial_\mu \theta \psi]$

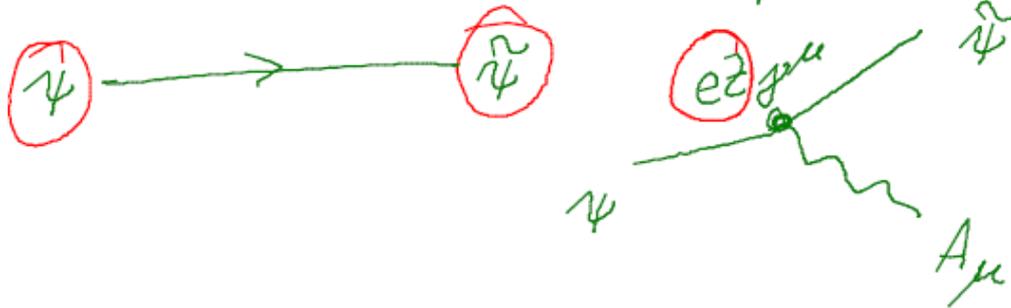
Funktionswert wenn $A_\mu \rightarrow A'_\mu = A_\mu - \frac{1}{e} \partial_\mu \Theta$

Eichfreiheit des Potentials

$\int_{\mathbb{R}^4} \mathcal{L}_{\text{QED}}$ aus $\partial_\mu \rightarrow D_\mu = \partial_\mu + ie\gamma A_\mu$

$\mathcal{L}_{\text{QED}} = i \bar{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu \psi - e \bar{\psi} \gamma^\mu \psi A_\mu - m \bar{\psi} \psi$

freie Fermionen WW Fermion - Photon Masse d. Fermionen



Photon koppelt mit e an den Fermionstrom

$\bar{\psi} \gamma^\mu \psi = j^\mu$
 $\int \mathcal{L}_{\text{QED}} = \int \mathcal{L}_{\text{fermion}} - e \int j^\mu A_\mu$

❖ Feldstärketensor, siehe

https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetischer_Feldst%C3%A4rketensor

Der elektromagnetische Feldstärketensor ist gewöhnlich definiert durch das **Vektorpotential**:

$$F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu$$

z. B. mit dem klassischen Vektorpotential

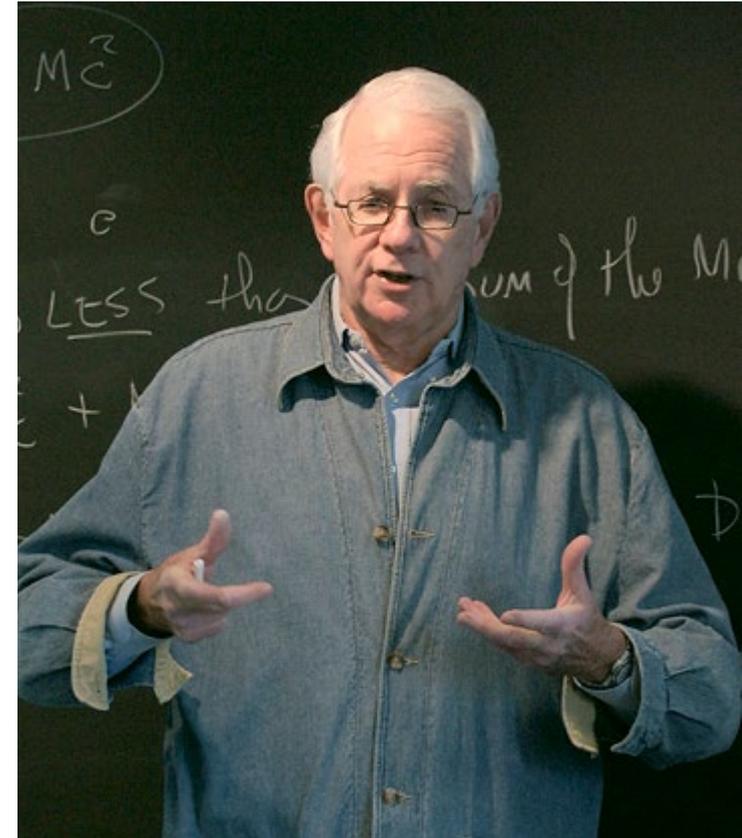
$$A^\mu = \left(\phi/c, \vec{A} \right)$$

Diese Definition ist auch für die **Quantenelektrodynamik** gültig. Dort ist einfach nur das Vektorpotential operatorwertig. Es ist ein Spezialfall der **Feldstärketensor**-Definition einer allgemeinen **Eichtheorie**.

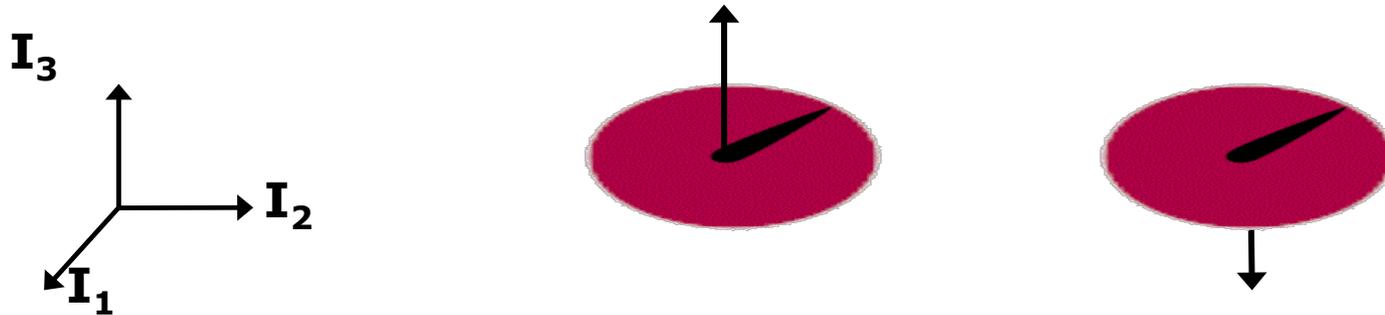
Die Matrixdarstellung des Feldstärketensors ist *koordinatenabhängig*. In einer flachen Raumzeit (also mit **Minkowski-Metrik**) und **kartesischen** Koordinaten kann der kontravariante Feldstärketensor geschrieben werden als:

$$F^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & -E_x/c & -E_y/c & -E_z/c \\ E_x/c & 0 & -B_z & B_y \\ E_y/c & B_z & 0 & -B_x \\ E_z/c & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix}$$

- Sheldon Glashow (*1932)
- 1950: Bronx High School of Science (selbe Klasse wie Steven Weinberg)
- 1959: Ph.D. in Harvard bei Julian Schwinger (Nobelpreis für QED 1965 mit Feynman und Tomonaga)
- 1961: Vorschlag $SU(2)_I \otimes U(1)_Y$
Partial Symmetry of Weak Interactions,
Nuclear Physics, Bd. 22, 1961, S. 579. [Abstract](#)
- Einführung des Schwachen Isospins I^W
 analog zum vorher bekannten Starken Isospin I^S
 [da Quarks unbekannt urspr. für (p,n) und (e,ν_e)]
- Ad-hoc Einführung der Elektroschwachen Mischung
 und des schwachen Mischungswinkels
(Diskussion später diese Woche)
 - Vorhersage des Z^0 („neutrale schwache Ströme“)
 - Photon-Kopplungen so, dass es an Elektr. Ladung und damit nicht an Neutrinos koppelt
 (keine Erklärung, warum die Natur ausgerechnet diesen Mischungswinkel wählte)
- Probleme mit Teilchenmassen, da Symmetrien nur mit masselosen Teilchen möglich



❖ 1961 S.Glashow: Eichung der schwachen Ladung

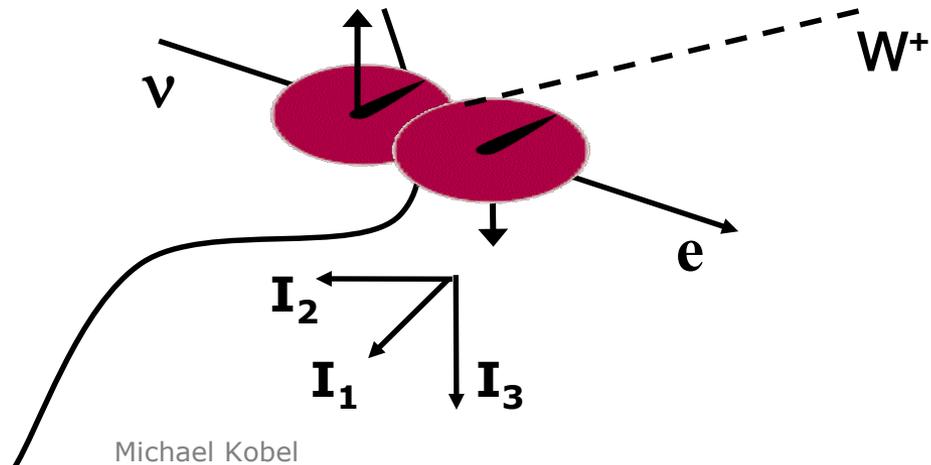
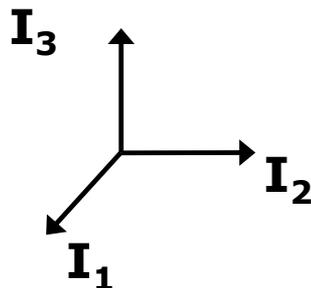


Neutrino: $I_3 = 1/2$
Proton: $I_3 = 1/2$

Elektron: $I_3 = -1/2$
Neutron: $I_3 = -1/2$

Idee: (ν, e) und (p, n) unterscheiden sich jeweils *nur* durch die „Richtung“ des schwachen Ladungsvektors I^W

❖ lokale Umeichung

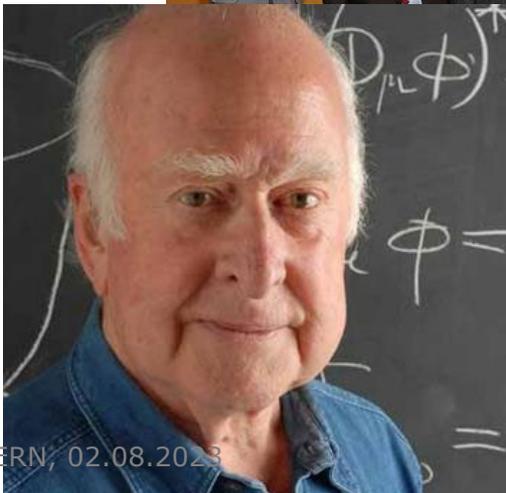
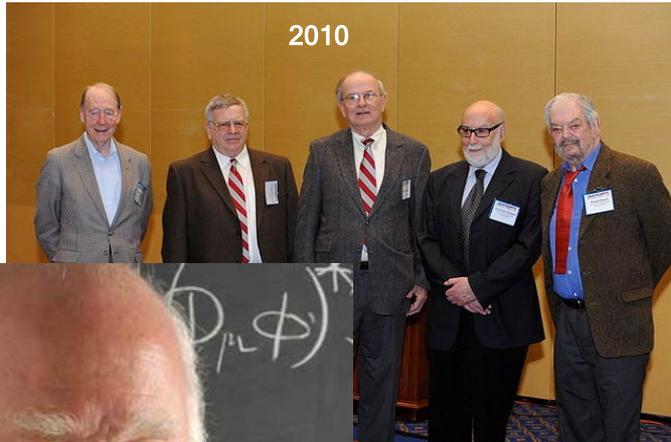


- ❖ 1961: GLASHOW (*1932)
- ❖ 1964: ENGLERT, BROUT, HIGGS
KIBBLE, GURALNIK, HAGEN (Bilder)
- ❖ 1964: GELL-MANN (1929-2019), ZWEIG(*1937)
- ❖ 1965: HAN, NAMBU (1921-2015), GREENBERG
- ❖ 1967: SALAM (1926-96), WEINBERG (1933-2021)
Weinberg: "A model of Leptons"
- ❖ 1973: GROSS, POLITZER, WILCZEK,
FRITSCH, GELL-MANN, LEUTWYLER, WEINBERG

Lokale Elektroschwache Eichsymmetrie
**Spontane Symmetriebrechung
zur Massenerzeugung ("Higgs Boson")**

Quarks
Starke "Farb-" Ladung
**Anwendung auf Baustein-Teilchen
(Nobelpreis 1979 mit Glashow, Foto)**

starker Kopplungsparameter (Nobelpreis 2004)
und Lokale Eichsymmetrie der starken WW



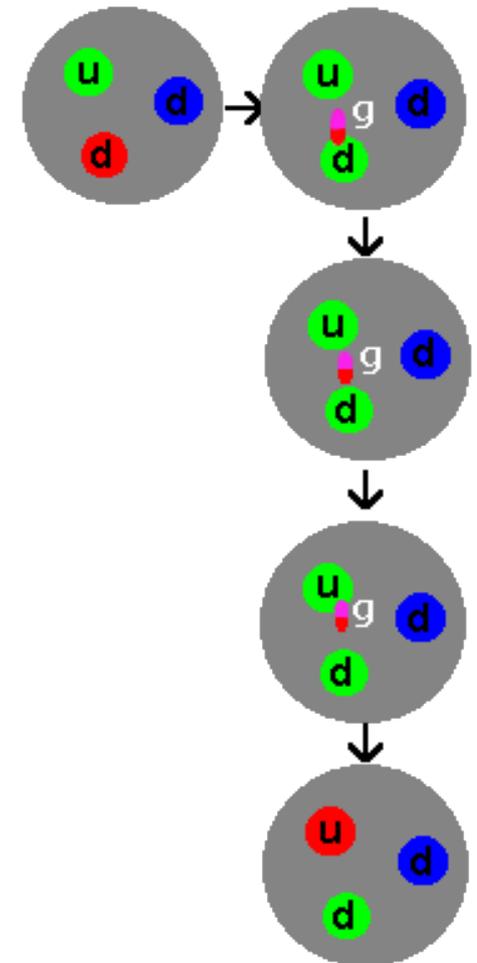
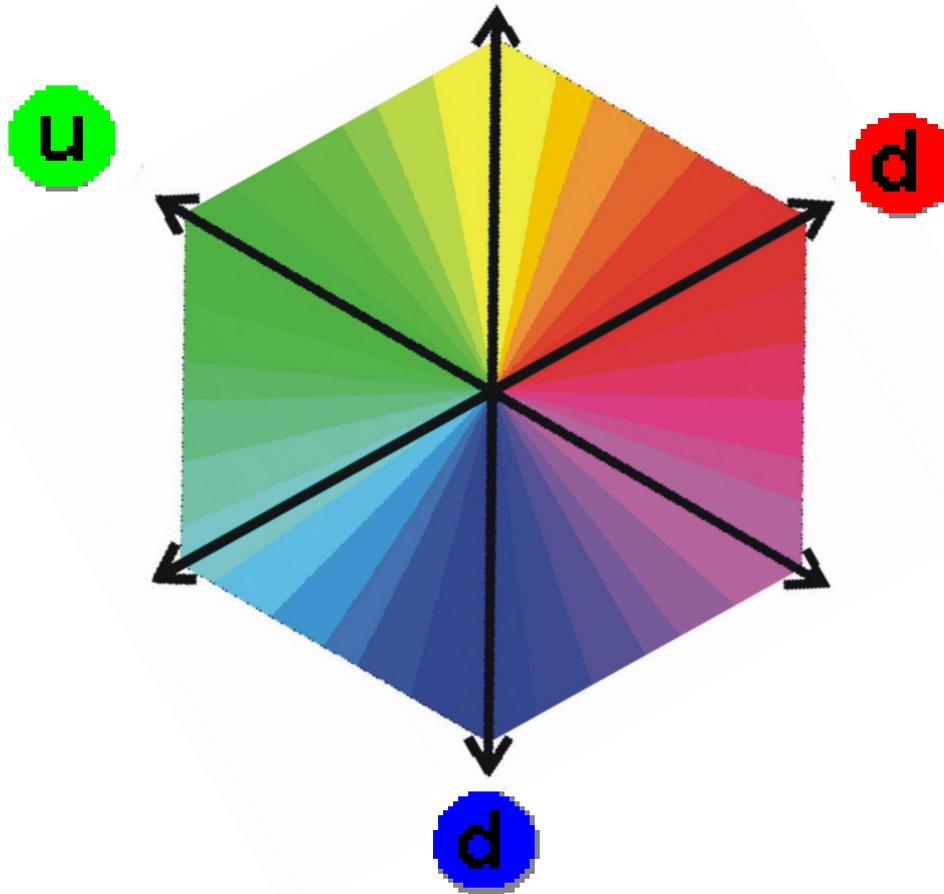
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}(\partial_\mu \vec{A}_\nu - \partial_\nu \vec{A}_\mu + g\vec{A}_\mu \times \vec{A}_\nu)^2 - \frac{1}{4}(\partial_\mu R_\nu - \partial_\nu R_\mu)^2 - \bar{R}\gamma^\mu (\partial_\mu - ig' B_\mu) R - L\gamma^\mu (\partial_\mu + ig\vec{t} \cdot \vec{A}_\mu - i\frac{1}{2}g' B_\mu) L$$

$$-\frac{1}{2}|\partial_\mu \varphi - ig\vec{A}_\mu \cdot \vec{t}\varphi + i\frac{1}{2}g' B_\mu \varphi|^2 - G_e (\bar{L}\varphi R + \bar{R}\varphi^\dagger L) - M_1^2 \varphi^\dagger \varphi + h(\varphi^\dagger \varphi)^2. \quad (4)$$

http://prl.aps.org/pdf/PRL/v19/i21/p1264_1

Masse für Bausteine

- ❖ 1973: Gross, Politzer, Wilczek, Nambu, Fritzsche...
starke WW durch Umeichung der Farbladung



❖ Jede Eichsymmetrie wird durch n Ladungsoperatoren "generiert"

- *Emag Symmetrie mit $n=1$ durch \hat{Z}
Ladungszahl (1x1 Matrix)*
- *Schwache Isospin Eichsymmetrie mit $n=3$ durch $\hat{I}_i := \frac{1}{2} \sigma_i, i=1,2,3$
 σ_i Pauli-Matrizen (2x2)*
- *Starke Eichsymmetrie mit $n=8$ durch $\hat{C}_a := \frac{1}{2} \lambda_a, a=1,\dots,8$
 λ_a Gell-Mann-Matrizen (3x3)*

❖ Die Ladungen sind Eigenwerte der "Generatoren"

- *z.B. $I_3(e^-) = -\frac{1}{2}$, da $\hat{I}_3 |e^-\rangle = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \psi_e \end{pmatrix} = -\frac{1}{2} |e^-\rangle$*
- *Nicht-diagonal Operatoren haben keinen Eigenwert -> nicht messbar*
 - *Schwache Ladung: 1 Eigenwert*
 - *Starke Ladung: 2 Eigenwerte (2-dim Vektor)*

Die 8 Gell-Mann Matrizen und Leiteroperatoren (Berger, Kap.4)

$$\lambda_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\lambda_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\lambda_7 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda_8 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}.$$

Die Fundamentaldarstellung, das Triplet, ist wieder durch die Matrizen der Gruppe selbst gegeben, also gilt für die Generatoren

$$F_i = \lambda_i / 2. \quad (4.15)$$

Die zugehörigen Basisvektoren innerhalb des Multipletts, in unserem Fall also die Farbzustände $|R\rangle$, $|G\rangle$, $|B\rangle$, unterscheiden sich durch die Eigenwerte zu F_3 und F_8 . Man stellt sie graphisch in einem sog. Gewichtsdiagramm (Abb. 4.1) dar, das entsprechend dem Rang 2 der Gruppe die Ebene ausfüllt.

Analog zum Vorgehen bei SU_2 faßt man auch bei SU_3 die neben den Eigenwertoperatoren verbleibenden Generatoren zu Leiteroperatoren zusammen. Durch sie kann man Zustände ineinander überführen. Ihre Wirkung läßt sich sehr anschaulich durch die Pfeile in Abb. 4.1 verdeutlichen.

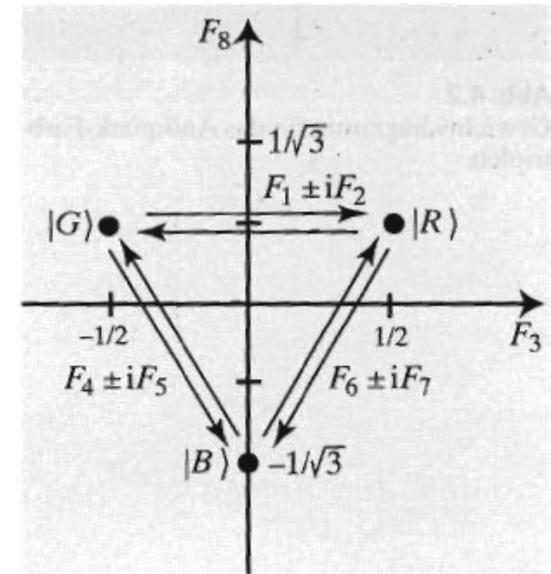
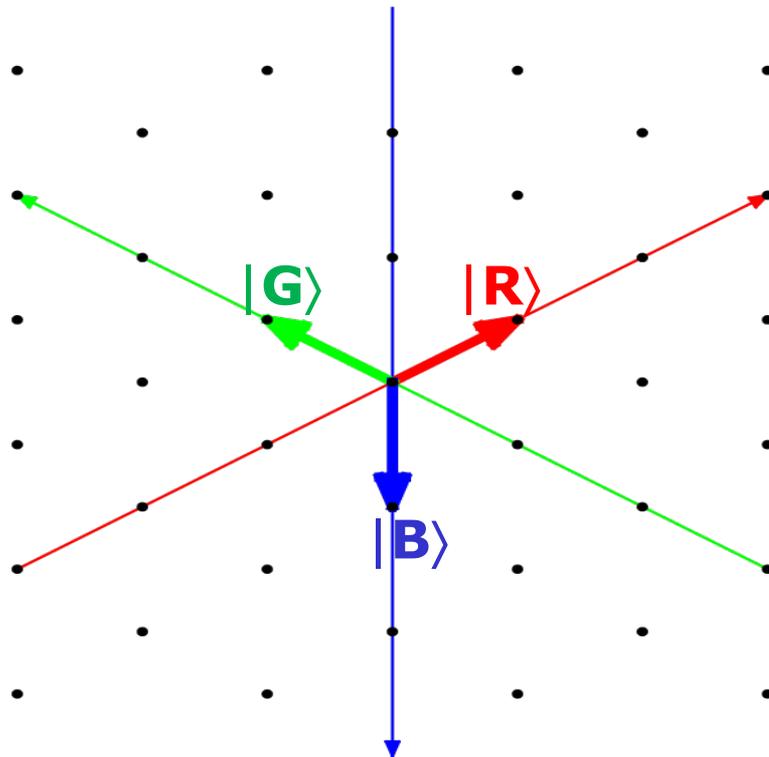


Abb. 4.1
Gewichtsdiagramm für das Quark-Farbtriplett

❖ Leiter-Operatoren: ~ Drehungen im Farbraum



Darstellung der Basisvektoren $|R\rangle, |G\rangle, |B\rangle$

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Wirkung der Leiteroperatoren

Als Beispiel wird

$$F_1 + iF_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

betrachtet. Offenbar gilt $(F_1 + iF_2)|G\rangle = |R\rangle$.

- ❖ Freie Lagrangedichte \mathcal{L} nicht invariant unter ***lokalen*** Eichtransf.
- ❖ Invarianz nur möglich, wenn "Eichbosonen" V_μ vorhanden
 $V_\mu =$ Gluonen $G_{a\mu}$, $a=1,\dots,8$, Weakonen $W_{i\mu}$, $i=1,2,3$, Photon A_μ
- ❖ Zahl der Eichbosonen = Zahl der Generatoren T der Symmetrie
 - Emag: \hat{Z}
 - Schwach: \hat{I}_i $i=1,2,3$
 - Stark: \hat{C}_a $a=1,\dots,8$
- ❖ Eichbosonen haben ***Wechselwirkung*** mit Materiemultipletts
 - einfaches "Rezept" zur Erfüllung der Symmetrien:
 Ersetze die Ableitung ∂_μ durch $D_\mu = \partial_\mu + \imath g \sum T V_\mu$
z.B. Elektromagnetismus $D_\mu = \partial_\mu + \imath g_{em} Z A_\mu$
Schwache Wechselwirkung $D_\mu = \partial_\mu + \imath g_W \sum I_i W_{i\mu}$

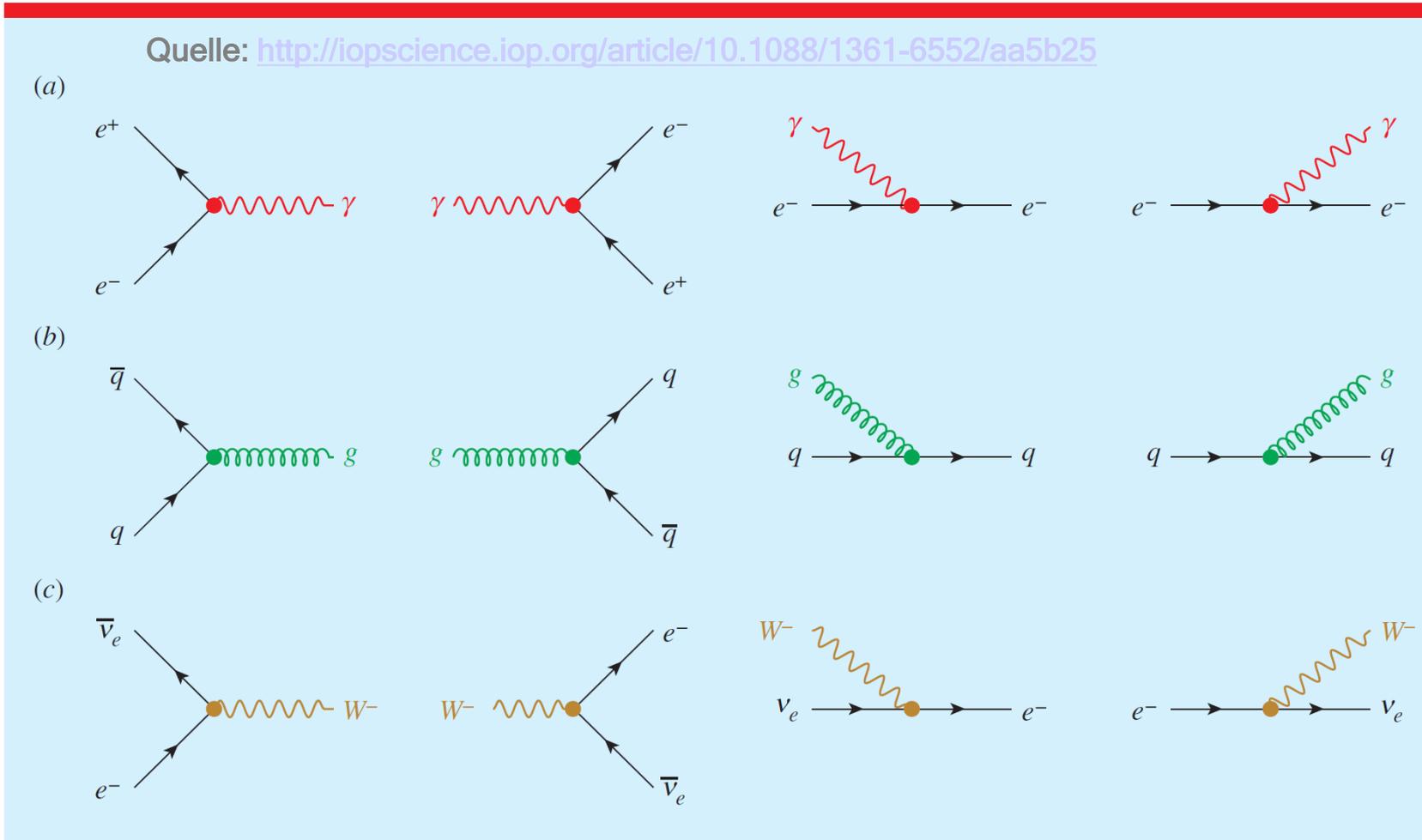
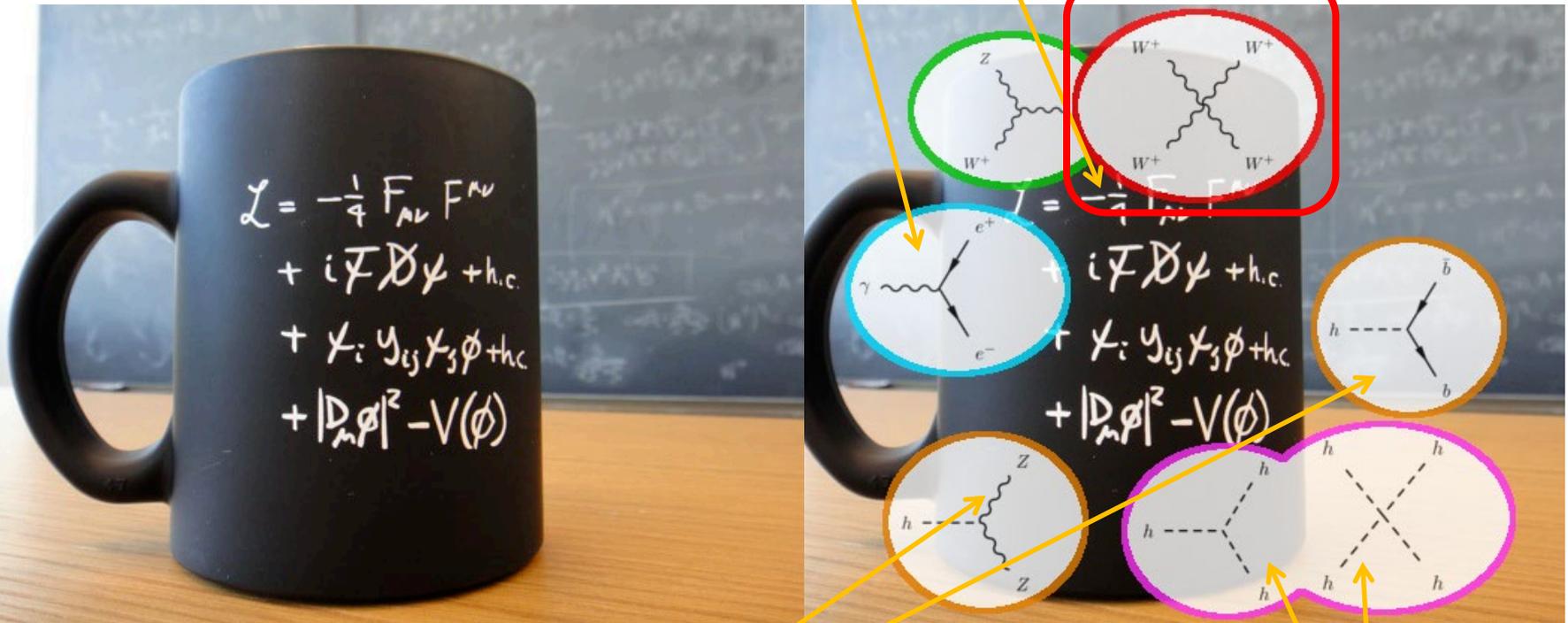


Figure 4. Basic vertices of the electromagnetic interaction (a), strong interaction (b), and weak interaction (c). From left to right: examples of annihilation, pair production, absorption, and emission.

Wechselwirkungen zwischen Boten und Bausteinen

Botenteilchen unter sich:
→ emag Wellen, Confinement, VBS...

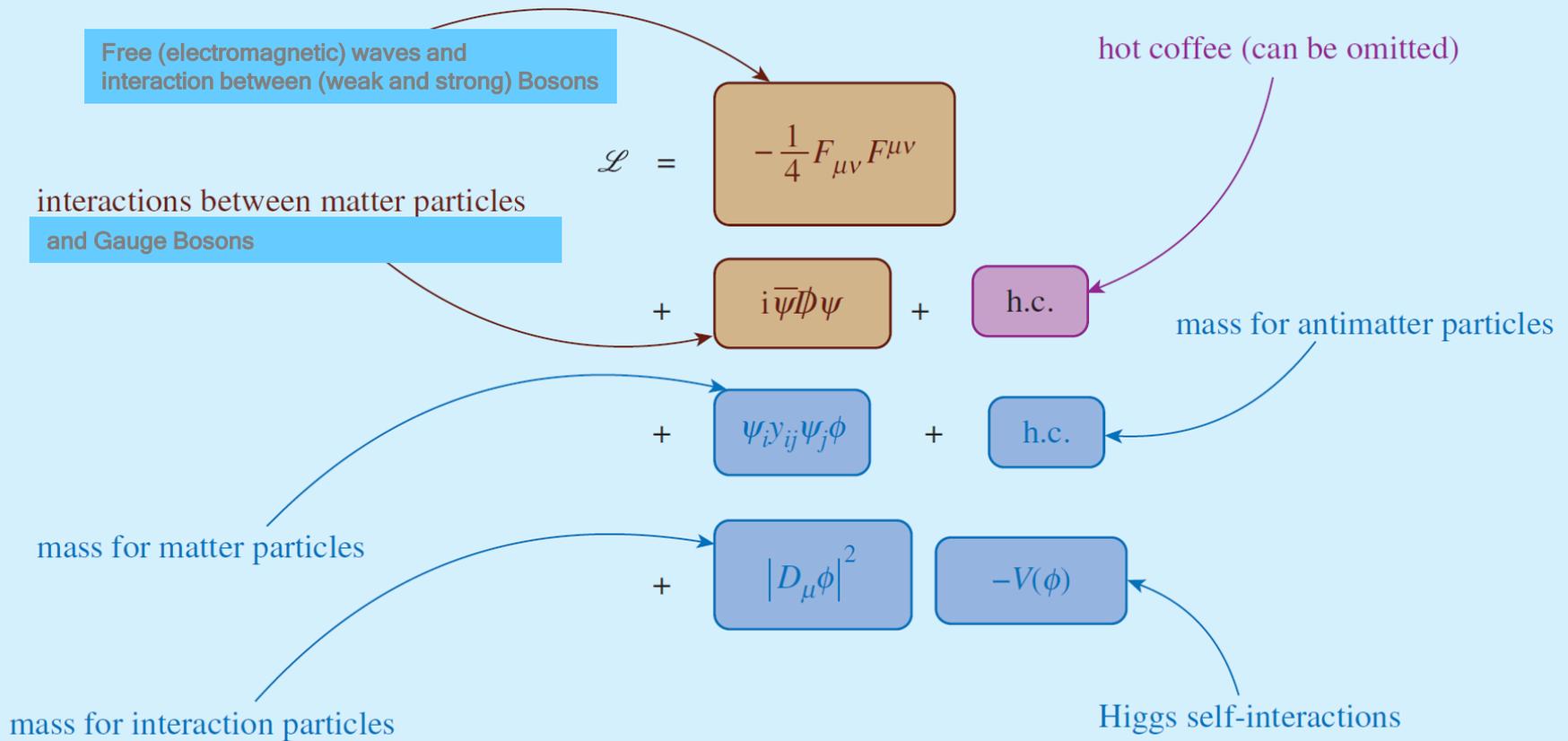


<http://www.quantumdiaries.org/2011/06/26/cern-mug-summarizes-standard-model-but-is-off-by-a-factor-of-2/>

Higgs mit Bausteinen und Boten

Massen der Bausteine und Botenteilchen
Erzeugung und Zerfälle des Higgs Teilchens

Higgsteilchen unter sich
noch nicht beobachtet



1. Theorien von früher und heute
2. Lagrangefunktion in klassischer Mechanik
3. Lagrangedichte der Teilchenphysik
4. Symmetrien
- 5. ZUSAMMENFASSUNG UND BEDEUTUNG**

❖ Aufstellung der Terme der Lagrangedichte:

- Natur verlangt ihre Invarianz unter 3 „lokalen Umeichungen“
-> 3 lokale Eichsymmetrien
- Jede Symmetrie lässt sich nur mit Hilfe von Wechselwirkungstermen in der Lagrangedichte erfüllen
-> lok. Eichsymmetrie ist „Ursache“ der Wechselwirkungen !

❖ Bedeutung der Terme in der Lagrangedichte:

- Jedem Term entspricht entweder
→ kinetische Energie freier Teilchen
→ Wechselwirkung (Vertex) zwischen Teilchen
- Terme (=Vertices), die die Eichsymmetrie nicht erfüllen, sind verboten und damit auch Prozesse, die diese erfordern.
- Bewegungsgleichungen (Dirac, Klein-Gordon, Maxwell,...) folgen aus Prinzip minimaler Wirkung



❖ 3 Typen von **Ladungen** generieren 3 Symmetrie Gruppen:

- $SU(3)_C \otimes SU(2)_I \otimes U(1)_Y$
- Diese „lokalen Eichsymmetrien“ verlangen (!) **Wechselwirkungen**, (sonst können die lokalen Symmetrien nicht erfüllt werden)

❖ Je 1 freien **Kopplungsparameter** (Stärke) für jede Wechselwirkung (genaue Werte abhängig vom jeweiligen Energieübertrag z.B. $1/\alpha_s \sim 2-10$)

- $\frac{1}{\alpha_s} = 5$ $\frac{1}{\alpha_W} = 29$ $\frac{1}{\alpha_Y} = 108$ vor Kondensation des BEH-Feldes
- $\frac{1}{\alpha_{em}} = \frac{1}{\alpha_W} + \frac{1}{\alpha_Y} = 137$ nach Kondensation des BEH Feldes

❖ **Brout-Englert-Higgs (BEH) Mechanismus** bei 10^{-12} s nach Urknall

- Kondensation eines allgegenwärtigen BEH-Feldes
- Spontane Brechung der schwachen Eichsymmetrien
- Elektroschwache Mischung von (B^0, W^0) zu (Z^0, γ)
- Generierung der Massen von W^+ , W^- und Z^0
- Mischung der Fermionen und Generierung ihrer Massen

❖ **Gravitation**

Why are all the interactions so similar in their structure?

There are a number of possibilities:

❖ *The first is the limited imagination of physicists:*

When we see a new phenomenon, we try to fit it in the frame-work we already have - until we have made enough experiments we don't know that it doesn't work...

It's because physicists have only been able to think of the same damn thing, over and over again.

❖ *Another possibility is that it is the same damn thing over and over again - that Nature has only one way of doing things, and She repeats her story from time to time.*

❖ *A third possibility is that things look similar because they are aspects of the same thing - some larger picture underneath...*

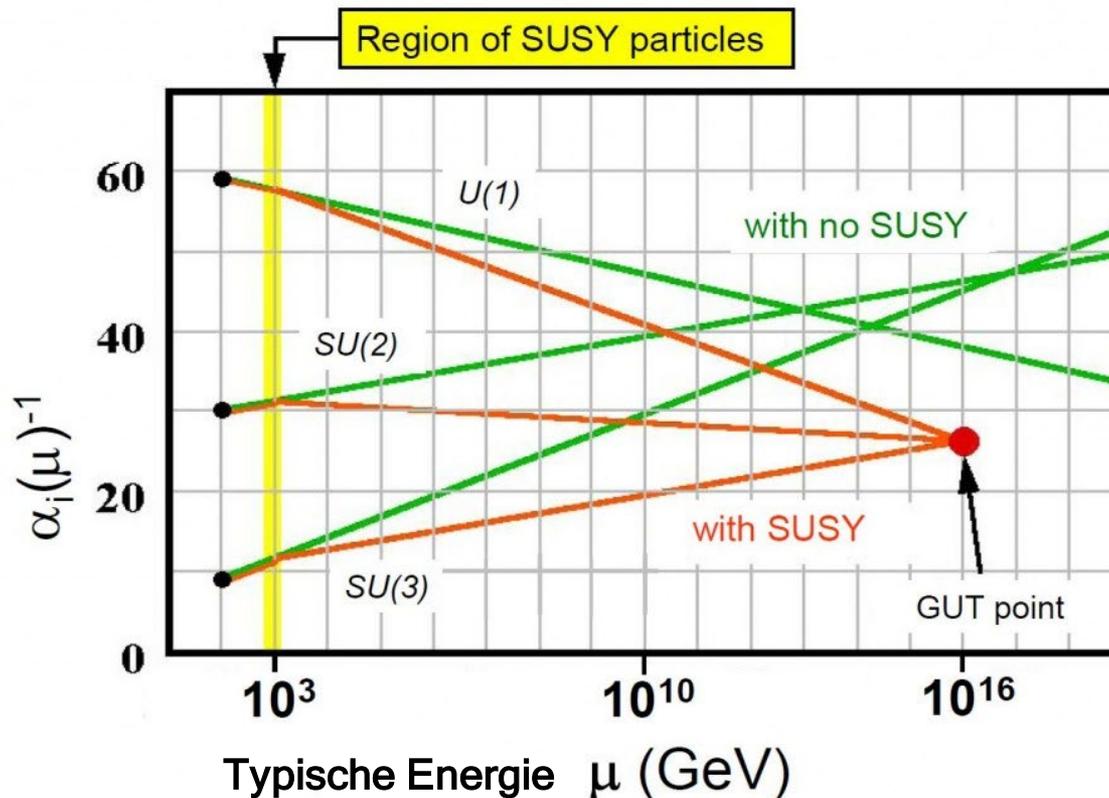
Richard. P. Feynman, "The strange theory of light and matter"

Princeton University Press, 1985

"Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie"

CERN, 02.08.2023 Piper Taschenbuch, 9,95€ Michael Kobel

- ❖ Kopplungsparameter α nähern sich bei hoher Energie an
→ alle Kräfte haben ähnliche Stärke
- ❖ Zeichen für einen gemeinsamen Ursprung aller Wechselwirkungen?



<http://sites.uci.edu/energyobserver/2012/12/02/update-on-some-higgs-blog-entries/>

- ❖ Klappt sogar noch besser mit Supersymmetrie!

- ❖ Aus Axiomen des Standardmodells
 - 3 Symmetrien mit je 1 freien Kopplungsparameter α
 - Spontane Brechung einer Symmetrie durch das BEHiggs-Feld (mind. 15, und falls Neutrinos ihre Masse (auch) über dass BEH-Feld bekommen 22-24 weitere freie Parameter)

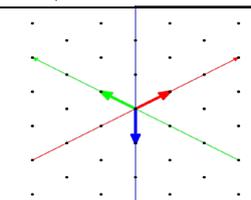
- ❖ ergibt sich theoretische Vorhersagekraft für
 - Anzahl und *alle* Eigenschaften der Botenteilchen (daher konnte Glashow das Z^0 voraussagen)
 - Erlaubte und verbotene Prozesse mit Wahrscheinlichkeiten und Winkelverteilungen
 - Energie (Abstands-)abhängigkeit der Kopplungsparameter α

- ❖ wobei als rein experimenteller Input nicht vorhersagbar sind
 - freie Parameter
 - Objekte (Materieteilchen-Multipletts) auf die die Symmetrien wirken

ANHANG

Übersicht Wechselwirkungen und Eichbosonen

❖ Eichsymmetrien mit masselosen Eichbosonen (ungebrochen)

Eichsymmetrie	QED $U(1)_Z$	QCD $SU(3)_c$
	abelsch	nicht- abelsch
D_μ	$\partial_\mu + ie\hat{Z} A_\mu$	$\partial_\mu + ig_s C_a G_{a\mu}$
Kopplung	$g_{em}=0.3$ (= e nat. Einh.)	$g_s = 1.2$
Generatoren	1: \hat{Z} (1x1)	8 : C_a (3x3)
Eichfelder	A_μ	$G_{a\mu}, a = 1, \dots, 8$
Eichbosonen	Photon γ	Gluonen $g_{1\dots 8}$
Wirkt auf Teilchenmultiplett	(e), (μ), (τ), (u), (c), (t), (d), (s), (b)	$(u^{\rightarrow}, u^{\leftarrow}, u^{\uparrow})$ $(d^{\rightarrow}, d^{\leftarrow}, d^{\uparrow})$ $(\bar{u}^{\rightarrow}, \bar{u}^{\leftarrow}, \bar{u}^{\uparrow})$ $(\bar{d}^{\rightarrow}, \bar{d}^{\leftarrow}, \bar{d}^{\uparrow})$
Ladungen	Elektrische Ladung -1, -1, -1, +2/3, -1/3, -1/3, ...	Starke Farb- ladung 

❖ Schwache Eichsymmetrien: ungebrochen nur bis $\sim 10^{-10}$ s nach dem Urknall

Eichsymmetrie	$U(1)_Y$	("QFD") $SU(2)_I$
	abelsch	nicht- abelsch
D_μ	$\partial_\mu + ig_Y \hat{Y}^W B_\mu$	$\partial_\mu + ig_W I_i W_{i\mu}$
Kopplung	$g_Y = 0.36$	$g_W = 0.63$
Generatoren	1: \hat{Y}^W (1x1)	3 : I_i (2x2)
Eichfelder	B_μ	$W_{i\mu}, i = 1, \dots, 3$
Eichbosonen	B-Boson	Weakonen W^+, W^-, W_3^0
Wirkt auf Teilchenmultiplett	$(e), (\mu), (\tau), (v_e), (v_\mu), (v_\tau),$ $(u), (c), (t), (d), (s), (b)$	$\begin{pmatrix} v_e \\ e^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}$
Ladungen	Schwache Hyperladung $Y^W = Z - I_3$	Schwache Isospin-Ladung $I_3 = \begin{pmatrix} +1/2 \\ -1/2 \end{pmatrix}$

❖ nach Symmetriebrechung im Brout-Englert-Higgs Feld B^0 und W^0 vermischt zu Z^0 und γ in "elektroschwacher Wechselwirkung"

- ❖ **Theoretiker** schlagen neue(n) Term(e) in \mathcal{L} vor
 - (Meist) motiviert von neuen Ideen / Erklärungen
- ❖ **Experimentalphysiker** simulieren Effekt in Detektor+ Daten
 - suchen danach, bzw schließen diesen Term aus

- ❖ **Beispiel Diplomarbeit in Dresden 2013**
Constanze Hasterok, Optimization of the Search for Contributions of Anomalous Quartic Gauge Couplings to Vector Boson Scattering at the Large Hadron Collider
<https://cds.cern.ch/record/1647794/files/CERN-THESIS-2013-273.pdf>

- Neuer „aQGC“ Beitrag zum WWWW-vertex



$$\mathcal{L}_1 = \alpha_1 g g' \text{tr}[\Sigma \mathbf{B}_{\mu\nu} \Sigma^\dagger \mathbf{W}^{\mu\nu}], \quad (2.41)$$

$$\mathcal{L}_2 = i\alpha_2 g' \text{tr}[\Sigma \mathbf{B}_{\mu\nu} \Sigma^\dagger [V^\mu, V^\nu]], \quad (2.42)$$

$$\mathcal{L}_3 = i\alpha_3 g \text{tr}[\mathbf{W}_{\mu\nu} [V^\mu, V^\nu]], \quad (2.43)$$

$$\mathcal{L}_4 = \alpha_4 (\text{tr}[V_\mu V_\nu])^2, \quad \text{and} \quad (2.44)$$

$$\mathcal{L}_5 = \alpha_5 (\text{tr}[V_\mu V^\mu])^2. \quad (2.45)$$

In this work, anomalous coupling parameters shall be constrained in the measurement of the scattering of two W bosons with equal electric charge. \mathcal{L}_1 and \mathcal{L}_2 modify only triple gauge couplings. Hence, they are not relevant for our process of interest. \mathcal{L}_3 modifies triple and quartic gauge couplings and \mathcal{L}_4 and \mathcal{L}_5 modify only quartic gauge couplings [29].

