

# Das Standardmodell der Teilchenphysik im Schulunterricht

Fachvortrag



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG

Philipp Lindenau, Dr. Claudia Behnke  
Bad Wildbad | 25. – 27.06.2018



NETZWERK  
TEILCHENWELT

# Higgs Feld

## ► Symmetriebrechung

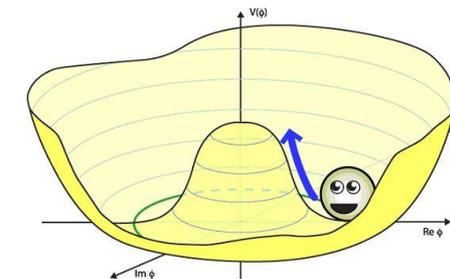
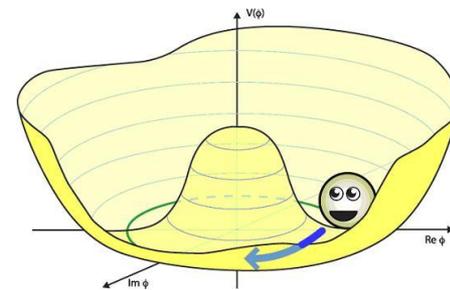
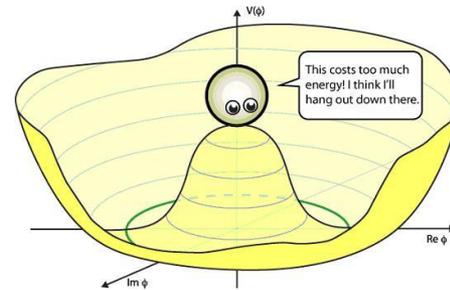
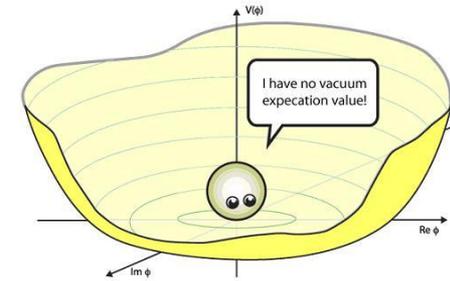
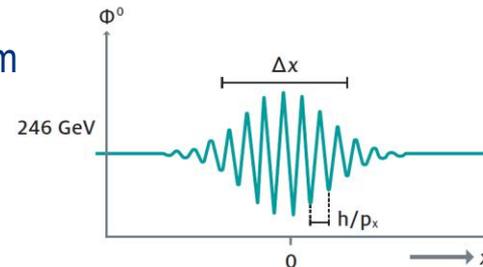
- Symmetrisches Potential  
Grundzustand symmetrisch
- Symmetrisches Potential  
Grundzustand nichtsymmetrisch

## ► Klassisch analog Dielektrikum : Abschirmung der Feldlinien

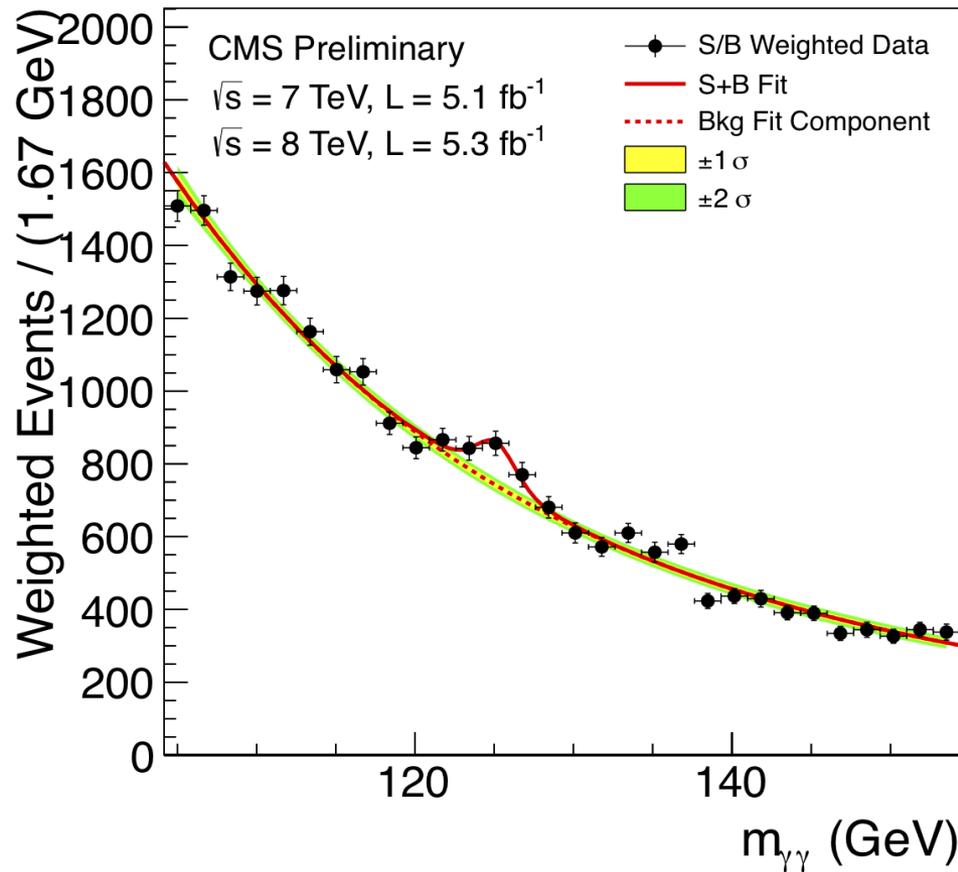
- Abschirmung „schwacher Felder“  
durch BEHiggs-Hintergrundfeld  
= unendlicher See schwacher Ladung
- Abschirmendes Feld  
Duplett in schw. Ladung  
Komponente  $v = 246$  GeV im Vakuum
- Anregung = Higgs-Teilchen

$$\Phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}$$

$$\Phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + H \end{pmatrix}$$



# Higgs Teilchen - Messung



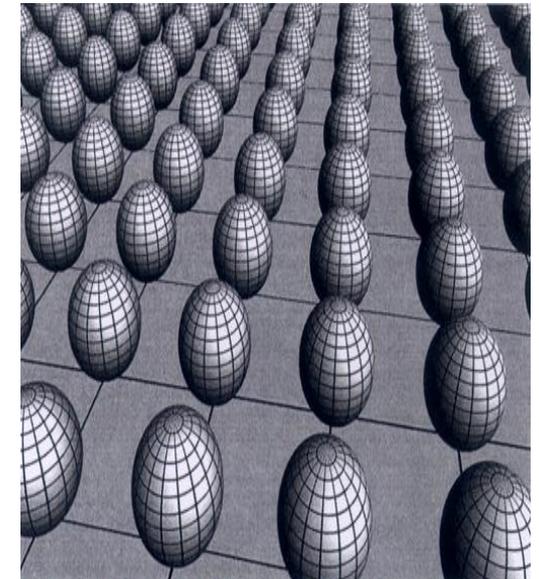
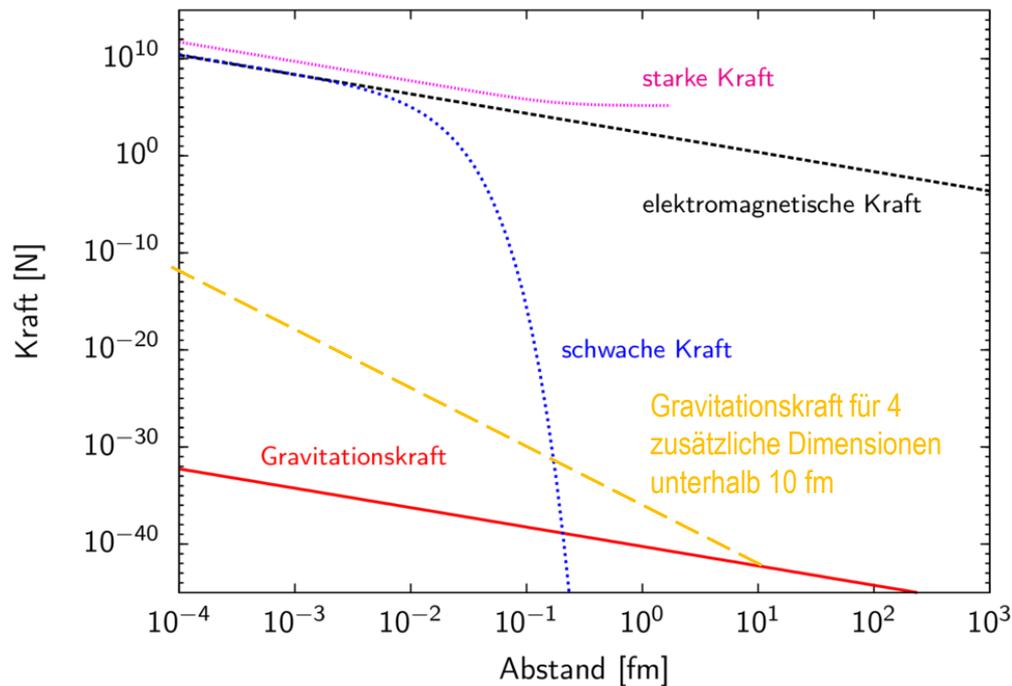
# Einschub:

- ▶ Alle Kraftgesetze beinhalten den Abstand  $r$ 
  - Bei kleinen Abständen  $F \sim 1/r^2$
- ▶ Reichweiten sind Konsequenzen dieser Kraftgesetze
  - Unendlich: im Alltag spürbar
  - Endlich: nur subatomar
- ▶ Reihenfolge der Stärken
  - Kann für Kräfte nicht definiert werden wegen  $F(r)$
  - Kann nur für Wechselwirkungen definiert werden:  $\alpha$  !
- ▶ Stärken aller **Wechselwirkungen sehr** ähnlich (außer für Gravitation)

**Basiskonzept:  
Wechselwirkung**  
= Kraft + Umwandlung +  
Erzeugung + Vernichtung

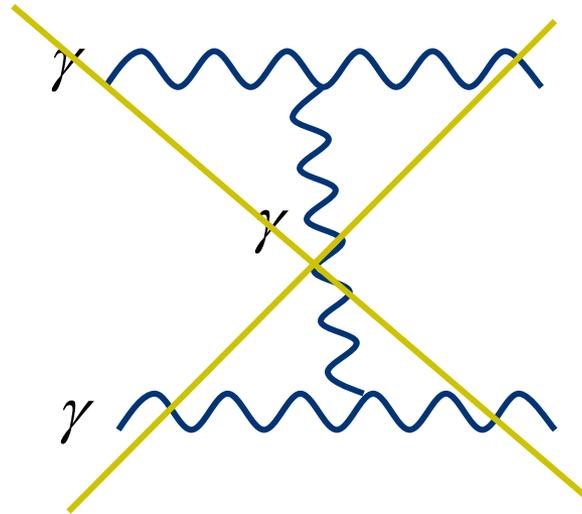
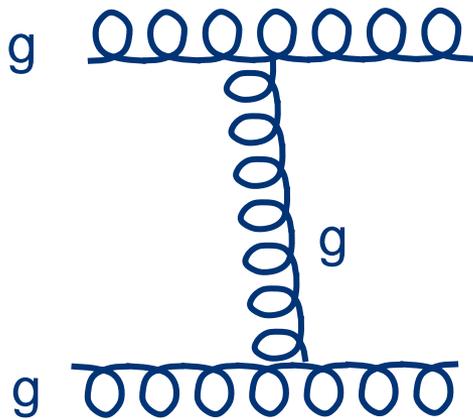
# Spekulationen

- ▶ Zusätzliche Dimensionen für Gravitation könnten die Kräfte „vereinigen“



# Glukon Selbstwechselwirkung

- ▶ Glukonen besitzen selbst starke Ladung
  - Glukonen können selbst Glukonen abstrahlen



# Bisher ignoriert: Zustandsmischung

- ▶ Makroskopisch messbare Teilchen: immer **Massen-Eigenzustände**
- ▶ Wechselwirkungen: immer **Ladungs-Eigenzustände**
- ▶ Umwandlungen nur innerhalb der Ladungs-Dupletts möglich
  - Die Multipletts sind daher \*nur\* für **Ladungs-Eigenzustände** definiert
- ▶ Konsequenz des BEHiggs Feldes:
  - die Masseneigenzustände von Quarks sind nicht identisch mit den schwachen Ladungs-Eigenzuständen, sondern eine Mischung aus diesen!
  - → Masseneigenzustände haben i.a. keine definierte schwache Ladung
  - → Schwache Ladungs-Eigenzustände haben i.a. keine definierte Masse

$$\begin{array}{c} \text{Schwache Ladungs-} \\ \text{Eigenzustände} \end{array} \begin{array}{c} \nearrow \\ \left( \begin{array}{c} d' \\ s' \\ b' \end{array} \right) \end{array} = \begin{array}{c} \text{Cabibbo-} \\ \text{Kobayashi-} \\ \text{Maskawa Matrix} \\ \text{(CKM Matrix)} \end{array} \begin{array}{c} \left( \begin{array}{c} d \\ s \\ b \end{array} \right) \\ \nwarrow \\ \text{Massen} \\ \text{Eigenzustände} \end{array}$$

Also: Ladungs-Multipletts eigentlich  $\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}$

# Zustandsmischung

- Die Quadrate der Elemente  $V_{qq'}$  der unitären CKM Matrix bestimmen die Wahrscheinlichkeit der Umwandlungen.

z.B.  $s \rightarrow u + W^-$  wird möglich wegen des  $|d'\rangle$ -Anteils in  $|s\rangle$

$$\begin{pmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \text{also } |s'\rangle &= V_{cd}|d\rangle + V_{cs}|s\rangle + V_{cb}|b\rangle \\ |s\rangle &= V_{us}^*|d'\rangle + V_{cs}^*|s'\rangle + V_{ts}^*|b'\rangle \end{aligned}$$

- Die Mischungen der Quarks in der schwachen Wechselwirkung sind eher klein, d.h. die Mischungsmatrix ist „fast“ die Einheitsmatrix)

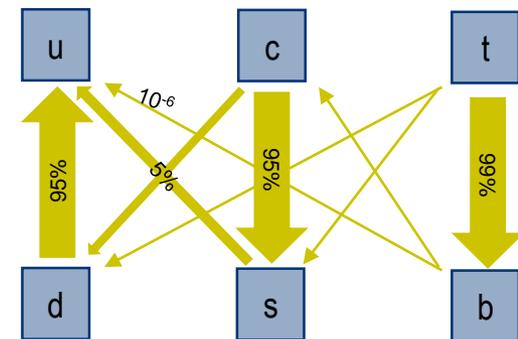
$$\begin{pmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0,975} & 0,225 & 0,003 \\ 0,225 & \mathbf{0,974} & 0,041 \\ 0,009 & 0,040 & \mathbf{0,999} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{pmatrix}$$

Schwache Ladungs-Eigenzustände

Massen Eigenzustände

# Quark-Umwandlungen

- ▶ Beispiel: Wandelt sich ein c-Quark in einem schwachen Prozess um, entsteht daraus **immer** ein s' Ladungs-Eigenzustand, den man mit Wahrscheinlichkeit  $|V_{cd}|^2=0,05$  aber als ein d-Quark Masse-EZ beobachtet
- ▶ Die Mischungsmatrix ist fast diagonal
  - Jeweils schwerere Massen-EZ (d,c,t) wandeln sich >95% innerhalb derselben Teilchen-Generation um
  - Für s- und b-Quarks sind nur Umwandlungen in die leichteren Generationen möglich, unterdrückt um Faktoren 40 ( $s \rightarrow u$ ), 600 ( $b \rightarrow c$ ) und 100.000 ( $b \rightarrow u$ ), ihre Lebensdauern sind entsprechend verlängert
  - Der Term  $|V_{ud}|^2=0,95$  verlängert z.B. die Lebensdauern von freien Neutronen und elektr. geladenen Pionen um 5%



# Zustandsmischung

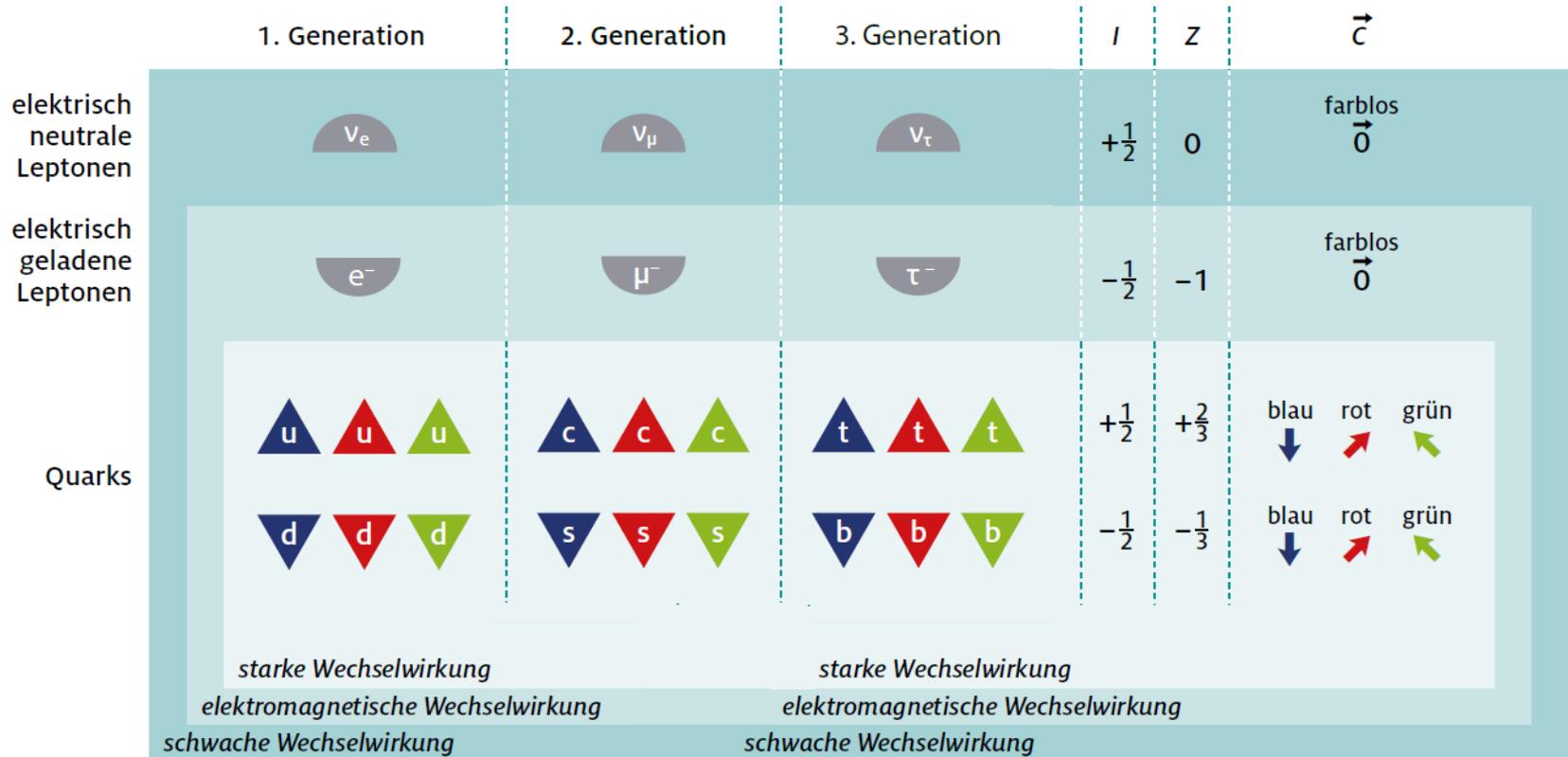
- ▶ **Die Mischungen der Quarks** in der schwachen Wechselwirkung **sind eher klein**
  - Größte Wahrscheinlichkeit für Umwandlung „innerhalb“ des jeweiligen Multipletts
- ▶ **Die Mischungen der Neutrinos** in der schwachen Wechselwirkung **sind dagegen fast maximal**
  - Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata-(PMNS)-Matrix
  - → Möglichkeit der „Neutrino Flavor-Oszillation“  $\nu_e \Leftrightarrow \nu_\mu \Leftrightarrow \nu_\tau$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,82 & 0,55 & -0,15 \\ -0,33 & 0,60 & 0,73 \\ 0,46 & -0,58 & 0,67 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Schwache Ladungs-Eigenzustände

Massen Eigenzustände

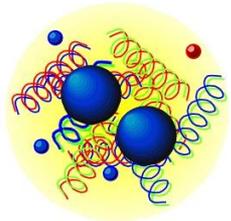
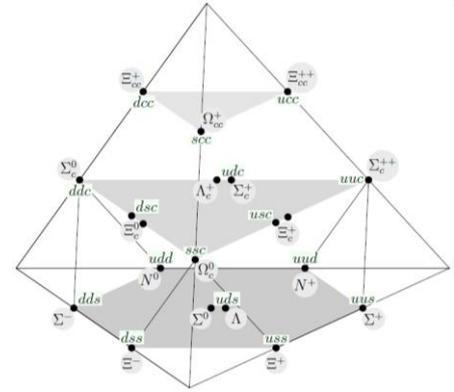
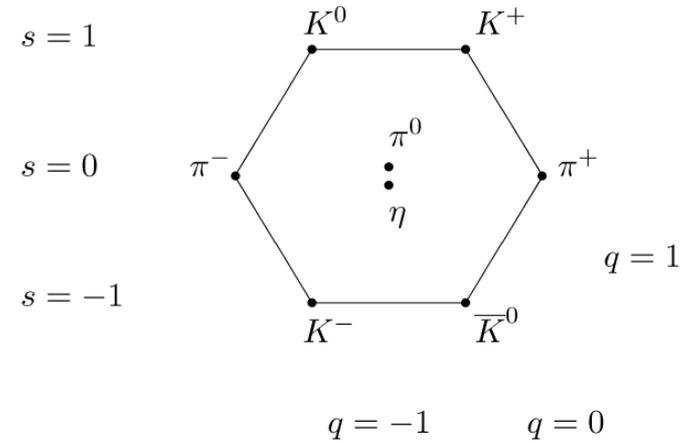
# Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip



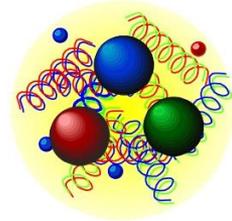
# Hadronen

## ► Zusammengesetzte Zustände von Quarks und Antiquarks

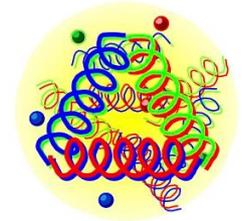
- Baryonen: 3 Quarks
  - Proton
  - Neutron
  - .....
- Mesonen: Quark Antiquark
  - Pion
  - Kaon
  - ....
- Weitere Zustände
  - Pentaquarks
  - Tetraquarks
  - Glue Balls



meson



baryon



glueball?

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

[www.teilchenwelt.de](http://www.teilchenwelt.de)

PROJEKTLEITUNG



PARTNER



SCHIRMHERRSCHAFT



FÖRDERER

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG



[www.facebook.de/teilchenwelt/](http://www.facebook.de/teilchenwelt/)



NETZWERK  
TEILCHENWELT