

Der OPAL-Detektor

OPAL (**O**mn**P**urpose **A**pparatus at **L**EP) war neben ALEPH, DELPHI und L3 einer der Detektoren am Large Electron-Positron Collider (LEP). Er besaß die Abmessungen eines Würfels mit etwa 12 Metern Kantenlänge.

Der OPAL-Detektor diente dem Nachweis und der Identifikation von Teilchen, die am LEP bei den Elektron-Positron-Kollisionen entstanden waren. Dafür bestand der OPAL-Detektor aus einer Vielzahl verschiedener Komponenten, welche zwiebelschalenförmig um den Kollisionspunkt von Elektronen und Positronen angeordnet waren.



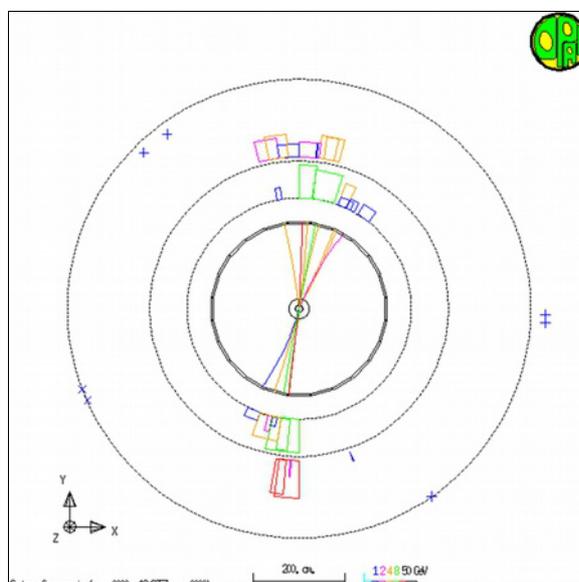
(Quelle: <http://opal.web.cern.ch/Opal/pix/Dismantling/2400/471.jpg>, 10.10.2015)

Zuerst durchquerten die entstandenen Anti-/Teilchen die von einem Magnetfeld durchsetzte **zentrale Spurkammer**. In dieser konnten elektrisch geladenen Teilchen nachgewiesen werden. Das Foto oben rechts zeigt die Spurkammer nach dem Abbau des OPAL-Detektors im Jahr 2001.

Nach der Spurkammer folgte das **elektromagnetische Kalorimeter** zur Bestimmung der Energien von elektrisch geladenen Leptonen und Photonen. Um auch die Energie der entstandenen Hadronen bestimmen zu können, war nach dem elektromagnetischen ein **hadronisches Kalorimeter** installiert. Die äußere Schicht des OPAL-Detektors bildeten die **Myonenkammern** zum Nachweis der entstandenen Anti-/Myonen. Anti-/Neutrinos konnten mit dem OPAL-Detektor nicht auf direktem Weg nachgewiesen werden.

Um auch Teilchen nachzuweisen zu können, die sich in Richtung der einlaufenden Elektronen- und Positronenstrahlen durch den Detektor bewegten, waren an den Enden des Detektors **Vorwärtsdetektoren und -kalorimeter** sowie **Myonen-Endkappen** installiert.

Zur Analyse der am OPAL-Detektor beobachteten Ereignisse stand den Wissenschaftlern ein sogenanntes **Eventdisplay** zur Verfügung, in welchem die Signaturen der beobachteten Teilchen visualisiert wurden. In der Abbildung unten ist das Bild eines Ereignisses im OPAL-Eventdisplay zu sehen, bei dem eine Vielzahl unterschiedlicher Anti-/Teilchen entstanden ist. Diese haben sich anschließend aus der Detektormitte nach außen bewegt. In dieser Darstellung entspricht die z-Richtung (senkrecht zur Abbildungsebene) der Bewegungsrichtung der Elektronen und Positronen, die im Zentrum des OPAL-Detektors zur Kollision gebracht wurden.



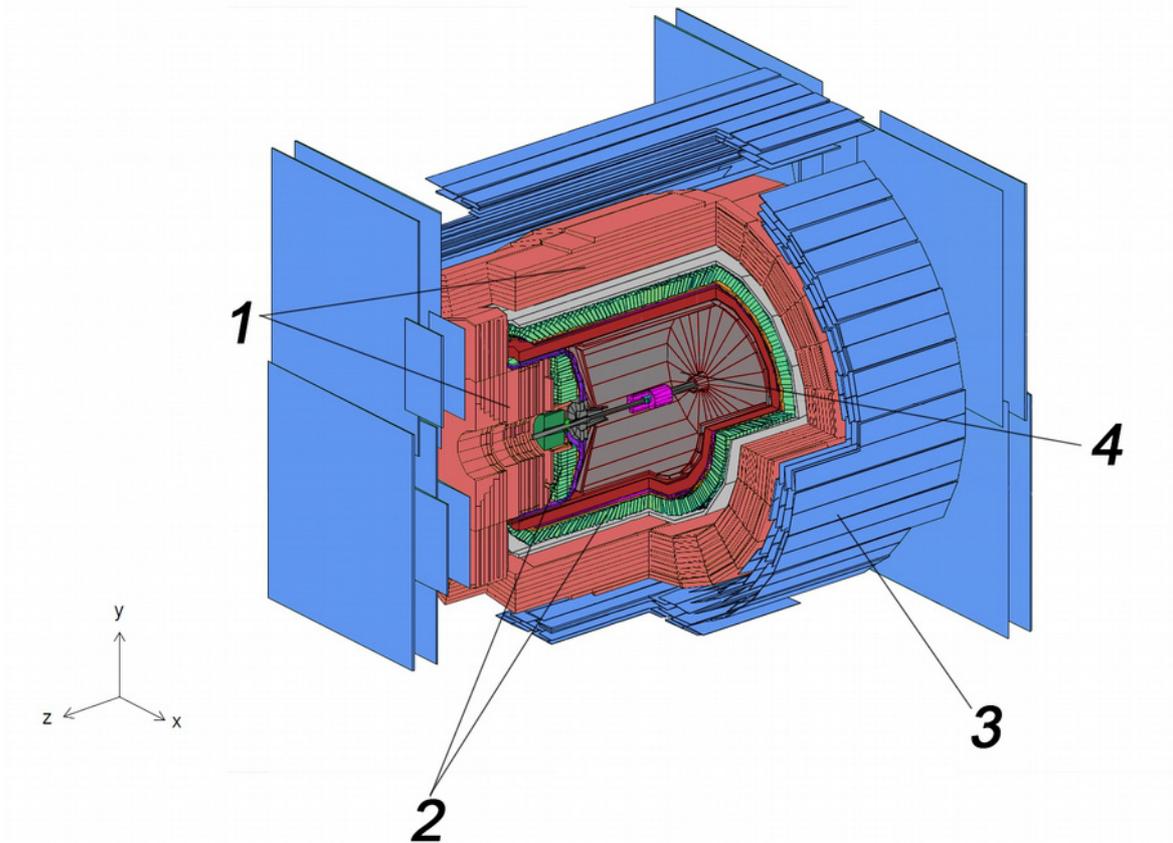
(Quelle: http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5294_9103.gif, 27.09.2015, verändert durch Philipp Lindenau)

Name: _____

Datum: _____

Beschrifte die Myonenkammer, die Spurkammer sowie die hadronischen und elektromagnetischen Kalorimeter in der schematischen Darstellung des OPAL-Detektors. Trage die zu den Komponenten gehörenden Zahlen anschließend in die zugehörigen Bereiche des OPAL-Eventdisplays ein.
Hinweis: Beachte die Orientierung der dargestellten Koordinatensysteme.

Schematische Darstellung des OPAL-Detektors:



(Quelle: Vollmer, C. F. (2004). Bestimmung der Masse und Breite des W-Bosons im semileptonischen Zerfallskanal mit dem OPAL Detektor bei LEP, verändert durch Philipp Lindenau)

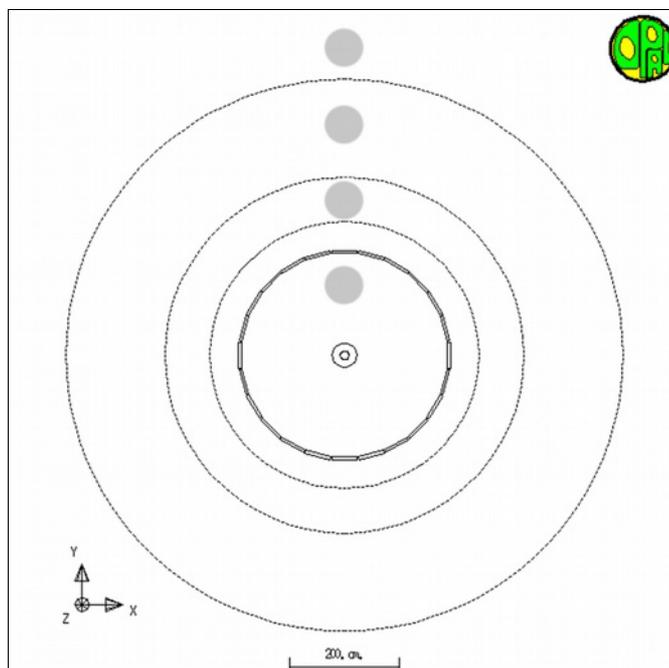
1 _____

3 _____

2 _____

4 _____

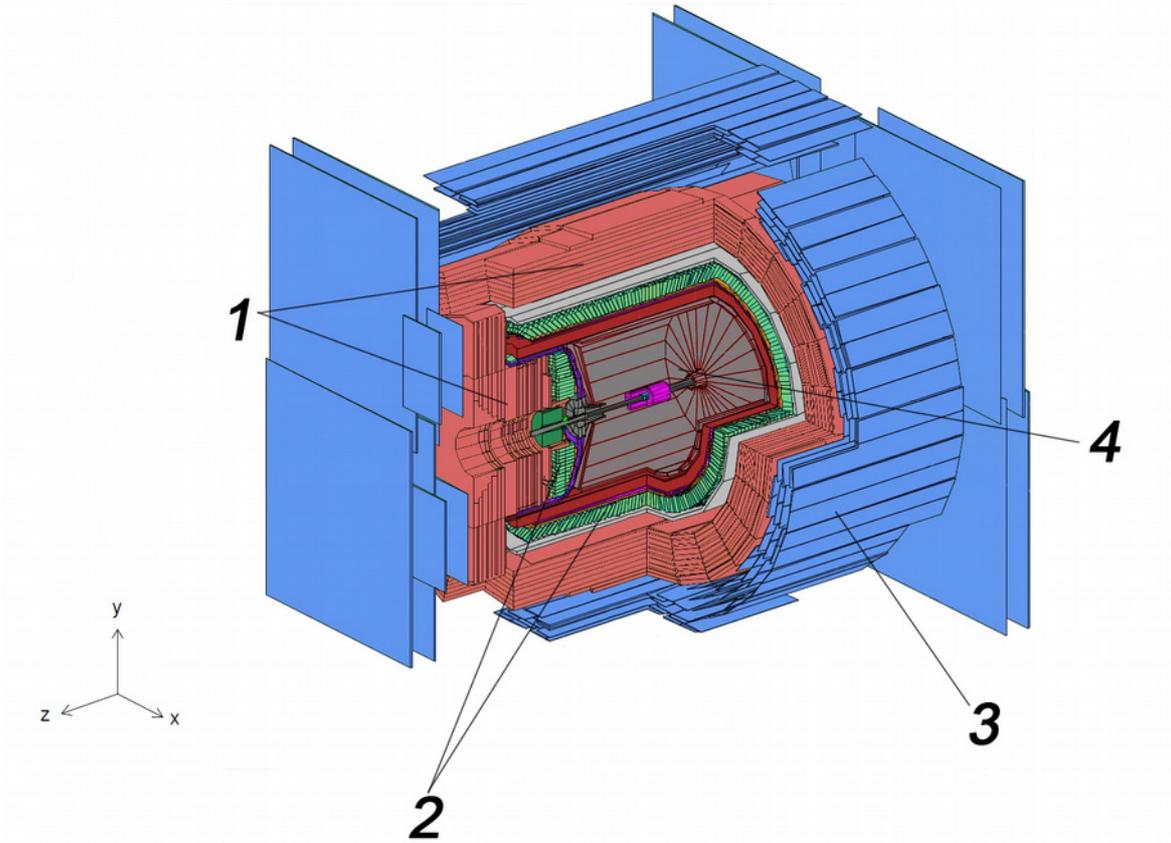
Vereinfachte Darstellung des OPAL-Eventdisplays:



(Quelle: http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/x7575_13812.gif, 20.08.2015, verändert durch Philipp Lindenau)

Beschrifte die Myonenkammer, die Spurkammer sowie die hadronischen und elektromagnetischen Kalorimeter in der schematischen Darstellung des OPAL-Detektors. Trage die zu den Komponenten gehörenden Zahlen anschließend in die zugehörigen Bereiche des OPAL-Eventdisplays ein.
 Hinweis: Beachte die Orientierung der dargestellten Koordinatensysteme.

Schematische Darstellung des OPAL-Detektors:



(Quelle: Vollmer, C. F. (2004). Bestimmung der Masse und Breite des W-Bosons im semileptonischen Zerfallskanal mit dem OPAL Detektor bei LEP, verändert durch Philipp Lindenau)

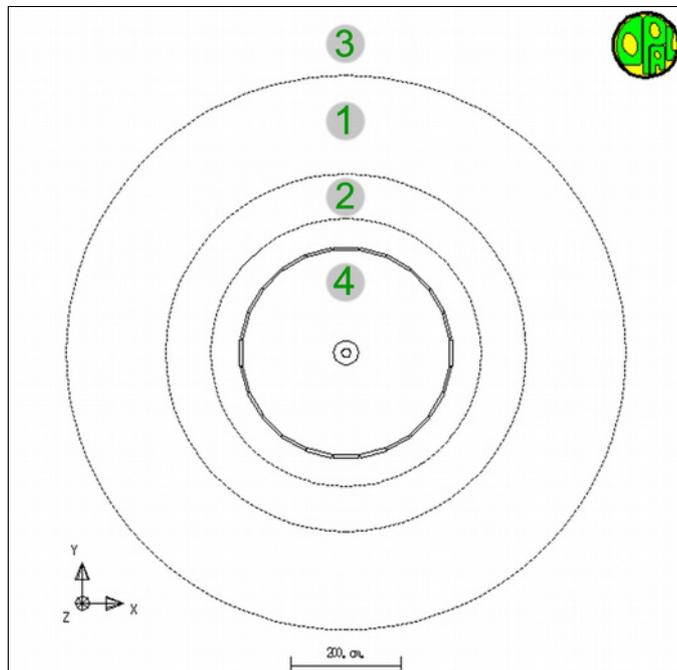
1 hadronische Kalorimeter

3 Myonenkammer

2 elektromagnetische Kalorimeter

4 Spurkammer

Vereinfachte Darstellung des OPAL-Eventdisplays:



(Quelle: http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/x7575_13812.gif, 20.08.2015, verändert durch Philipp Lindenau)

A.2 Arbeitsmaterialien: Nachweis von Anti-/Teilchen mit Großdetektoren

Nachweis von Anti-/Teilchen mit Großdetektoren

1. Bei einer Elektron-Positron-Kollision **im Inneren** des OPAL-Detektors konnten viele verschiedene Anti-/Teilchen entstehen. Diese konnten anhand der Spuren und Energieeinträge, die sie in den Detektorkomponenten hinterließen, unterschieden werden.

Kreuze an, welche der folgenden Anti-/Teilchen Energieeinträge im **hadronischen Kalorimeter** hinterlassen haben.

- | | | |
|-----------------------------------|---|-----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Elektron | <input type="checkbox"/> Photon | <input type="checkbox"/> Neutron |
| <input type="checkbox"/> Myon | <input type="checkbox"/> Tauon-Neutrino | <input type="checkbox"/> Positron |
| <input type="checkbox"/> Proton | | |

Kreuze an, welche der folgenden Anti-/Teilchen in der **Spurkammer** detektiert werden konnten.

- | | | |
|-----------------------------------|---|-----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Elektron | <input type="checkbox"/> Photon | <input type="checkbox"/> Neutron |
| <input type="checkbox"/> Myon | <input type="checkbox"/> Tauon-Neutrino | <input type="checkbox"/> Positron |
| <input type="checkbox"/> Proton | | |

Kreuze an, welche der folgenden Anti-/Teilchen in der **Myonenkammer** detektiert werden konnten.

- | | | |
|-----------------------------------|---|-----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Elektron | <input type="checkbox"/> Photon | <input type="checkbox"/> Neutron |
| <input type="checkbox"/> Myon | <input type="checkbox"/> Tauon-Neutrino | <input type="checkbox"/> Positron |
| <input type="checkbox"/> Proton | | |

Kreuze an, welche der folgenden Anti-/Teilchen Energieeinträge im **elektromagnetischen Kalorimeter** hinterlassen haben.

- | | | |
|-----------------------------------|---|-----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Elektron | <input type="checkbox"/> Photon | <input type="checkbox"/> Neutron |
| <input type="checkbox"/> Myon | <input type="checkbox"/> Tauon-Neutrino | <input type="checkbox"/> Positron |
| <input type="checkbox"/> Proton | | |

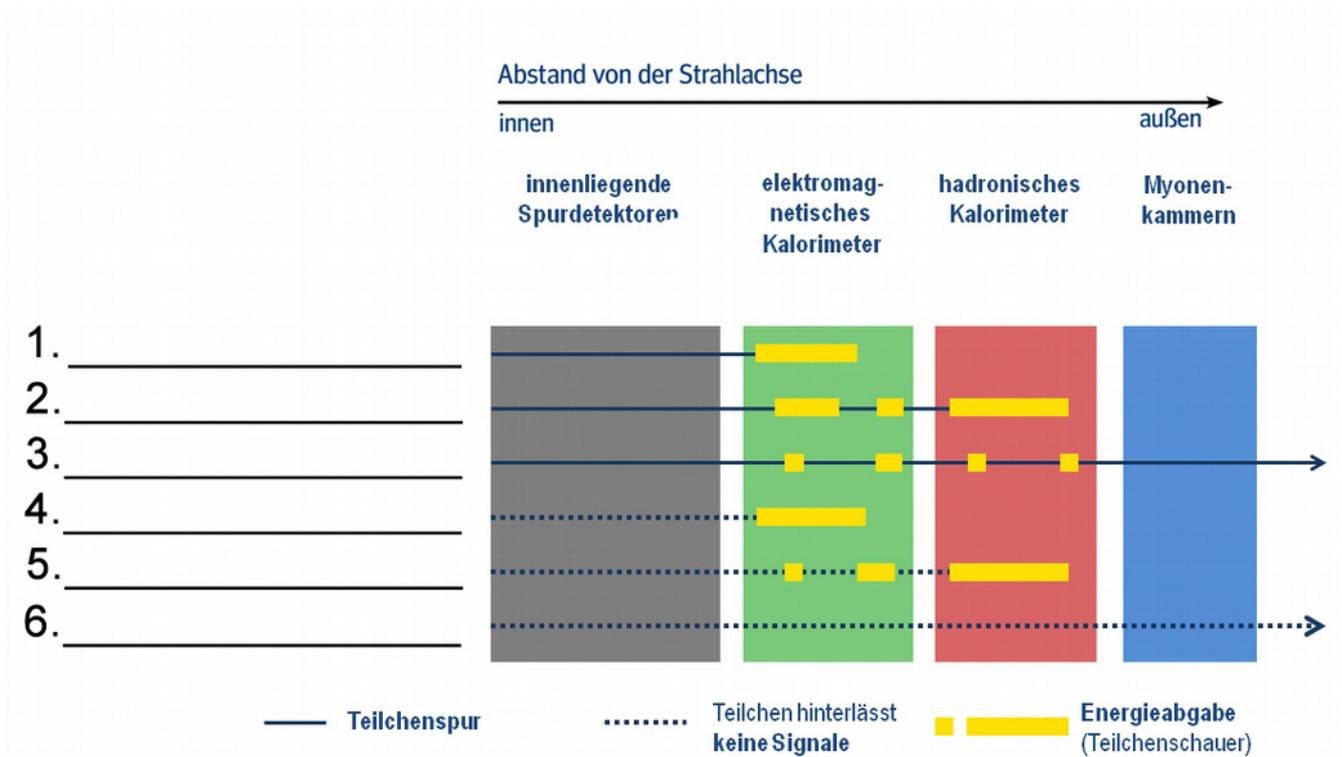
2. In der folgenden schematischen Darstellung des OPAL-Detektors sind die Signaturen unterschiedlicher Anti-/Teilchen dargestellt, welche diese nach ihrer Entstehung im Inneren des OPAL-Detektors hinterlassen haben.

Beschrifte die dargestellten Signaturen jeweils mit den Namen derjenigen Anti-/Teilchen, die sie erzeugt haben können.

Hinweis:

Den Signaturen können meist mehrere Anti-/Teilchen zugeordnet werden.

Gib gegebenenfalls den allgemeinen Namen der entsprechenden Anti-/Teilchenklasse an.



Nachweis von Anti-/Teilchen mit Großdetektoren

1. Bei einer Elektron-Positron-Kollision **im Inneren** des OPAL-Detektors konnten viele verschiedene Anti-/Teilchen entstehen. Diese konnten anhand der Spuren und Energieeinträge, die sie in den Detektorkomponenten hinterließen, unterschieden werden.

Kreuze an, welche der folgenden Anti-/Teilchen Energieeinträge im **hadronischen Kalorimeter** hinterlassen haben.

- | | | |
|--|---|---|
| <input type="checkbox"/> Elektron | <input type="checkbox"/> Photon | <input checked="" type="checkbox"/> Neutron |
| <input checked="" type="checkbox"/> Myon | <input type="checkbox"/> Tauon-Neutrino | <input type="checkbox"/> Positron |
| <input checked="" type="checkbox"/> Proton | | |

Kreuze an, welche der folgenden Anti-/Teilchen in der **Spurkammer** detektiert werden konnten.

- | | | |
|--|---|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Elektron | <input type="checkbox"/> Photon | <input type="checkbox"/> Neutron |
| <input checked="" type="checkbox"/> Myon | <input type="checkbox"/> Tauon-Neutrino | <input checked="" type="checkbox"/> Positron |
| <input checked="" type="checkbox"/> Proton | | |

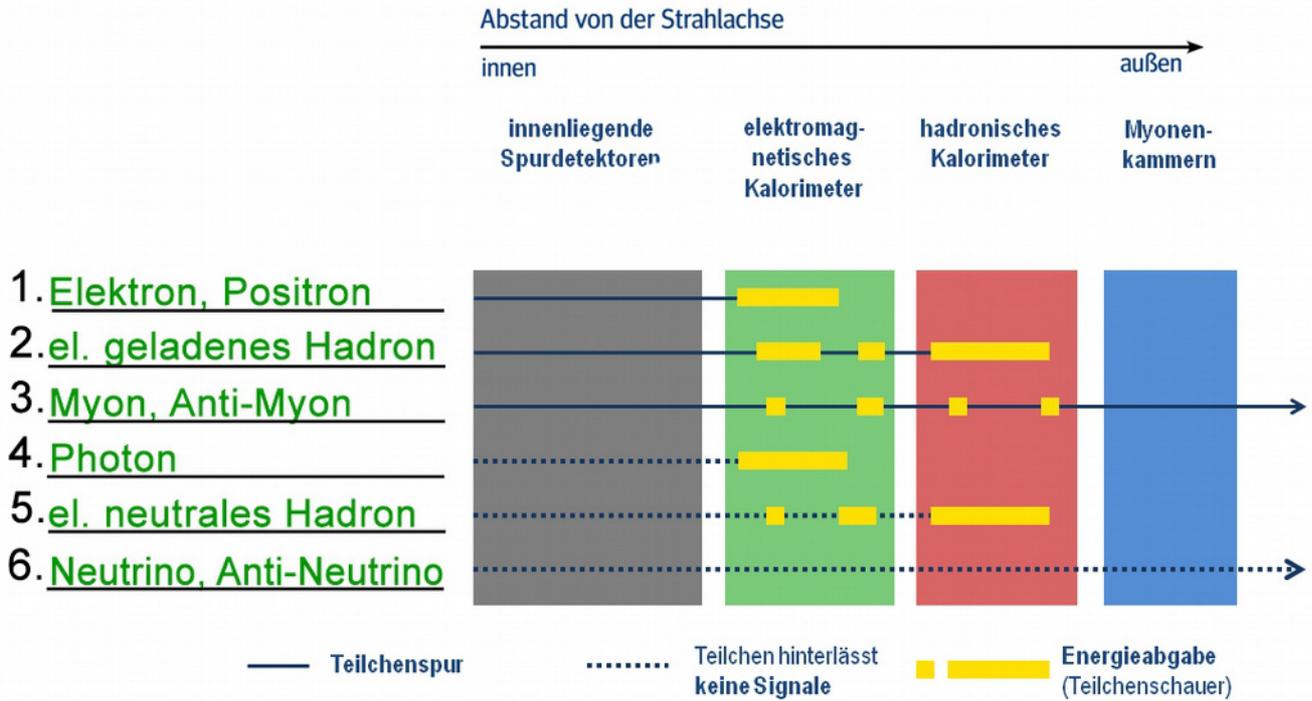
Kreuze an, welche der folgenden Anti-/Teilchen in der **Myonenkammer** detektiert werden konnten.

- | | | |
|--|---|-----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Elektron | <input type="checkbox"/> Photon | <input type="checkbox"/> Neutron |
| <input checked="" type="checkbox"/> Myon | <input type="checkbox"/> Tauon-Neutrino | <input type="checkbox"/> Positron |
| <input type="checkbox"/> Proton | | |

Kreuze an, welche der folgenden Anti-/Teilchen Energieeinträge im **elektromagnetischen Kalorimeter** hinterlassen haben.

- | | | |
|--|--|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Elektron | <input checked="" type="checkbox"/> Photon | <input checked="" type="checkbox"/> Neutron |
| <input checked="" type="checkbox"/> Myon | <input type="checkbox"/> Tauon-Neutrino | <input checked="" type="checkbox"/> Positron |
| <input checked="" type="checkbox"/> Proton | | |

2. In der folgenden schematischen Darstellung des OPAL-Detektors sind die Signaturen unterschiedlicher Anti-/Teilchen dargestellt, welche diese nach ihrer Entstehung im Inneren des OPAL-Detektors hinterlassen haben.
 Beschrifte die dargestellten Signaturen jeweils mit den Namen derjenigen Anti-/Teilchen, die sie erzeugt haben können.
 Hinweis:
 Den Signaturen können meist mehrere Anti-/Teilchen zugeordnet werden.
 Gib gegebenenfalls den allgemeinen Namen der entsprechenden Anti-/Teilchenklasse an.



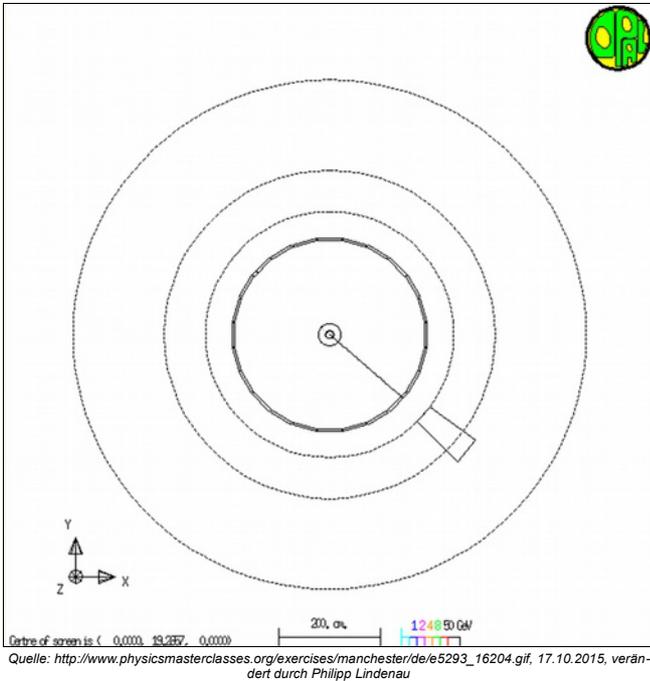
(Quelle: Netzwerk Teilchenwelt (2015). Unterrichtsmaterial zur Teilchenphysik, verändert durch Philipp Lindenu)

A.3 Arbeitsmaterialien: Identifikation einzelner Teilchen

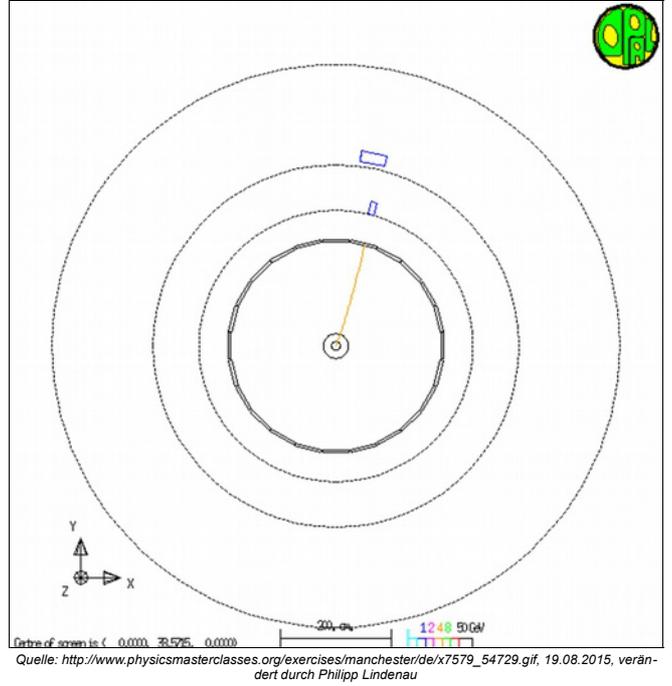
Identifikation einzelner Teilchen

In den folgenden Abbildungen sind jeweils Signaturen einzelner Teilchen im OPAL-Eventdisplay dargestellt. Ordne den Abbildungen zu, welche der aufgeführten Teilchen die jeweilige Signatur hinterlassen haben :

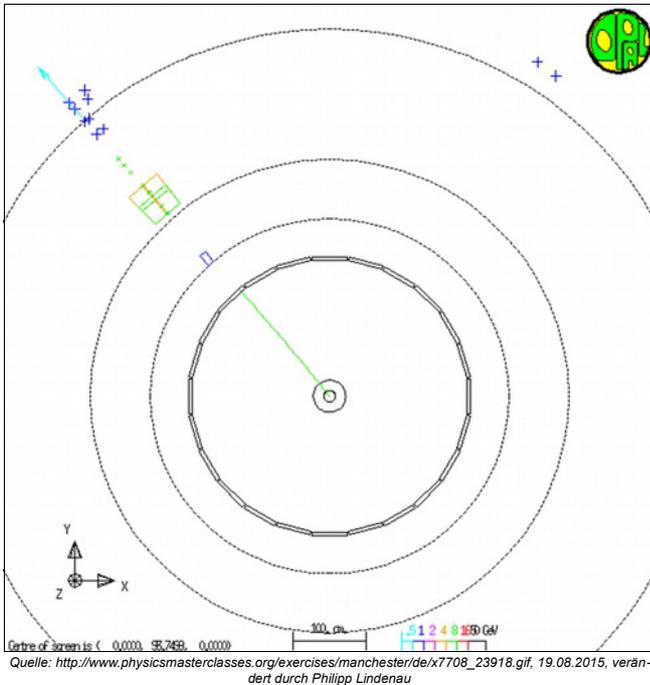
Myon, Elektron, Photon, elektrisch geladenes Hadron, elektrisch neutrales Hadron, Elektron-Neutrino



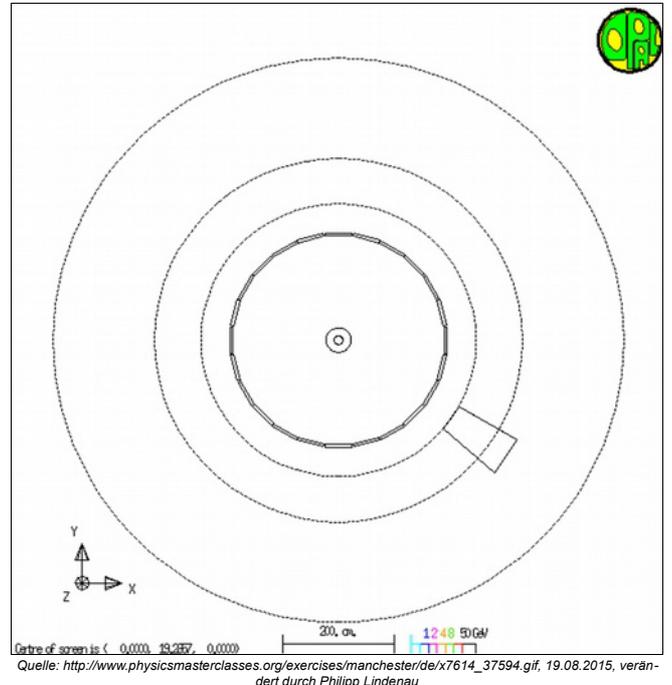
Teilchen: _____



Teilchen: _____



Teilchen: _____

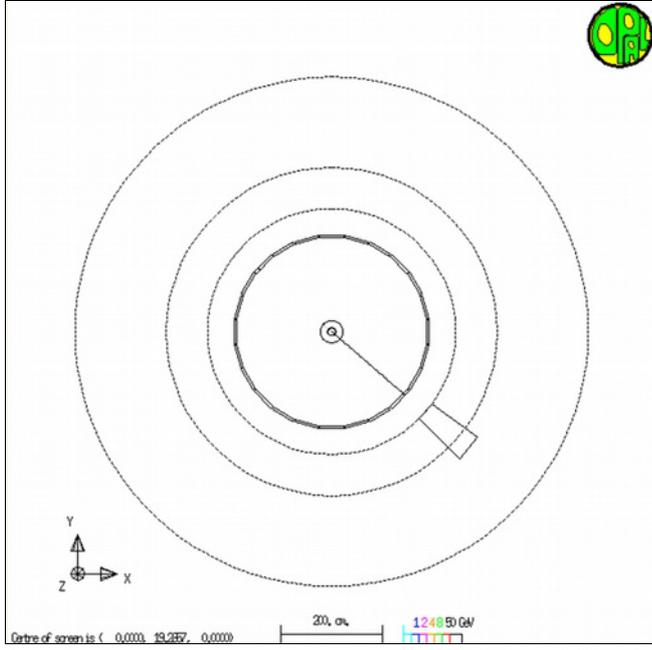


Teilchen: _____

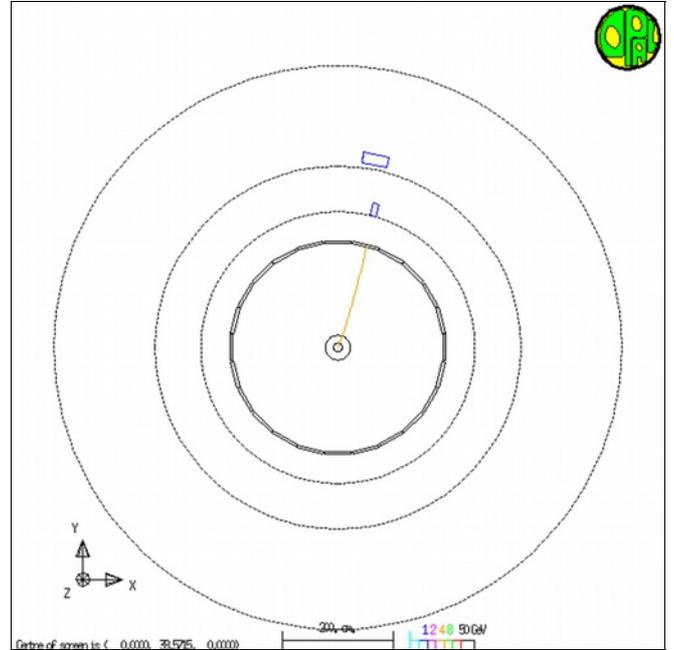
Identifikation einzelner Teilchen

In den folgenden Abbildungen sind jeweils Signaturen einzelner Teilchen im OPAL-Eventdisplay dargestellt. Ordne den Abbildungen zu, welche der aufgeführten Teilchen die jeweilige Signatur hinterlassen haben:

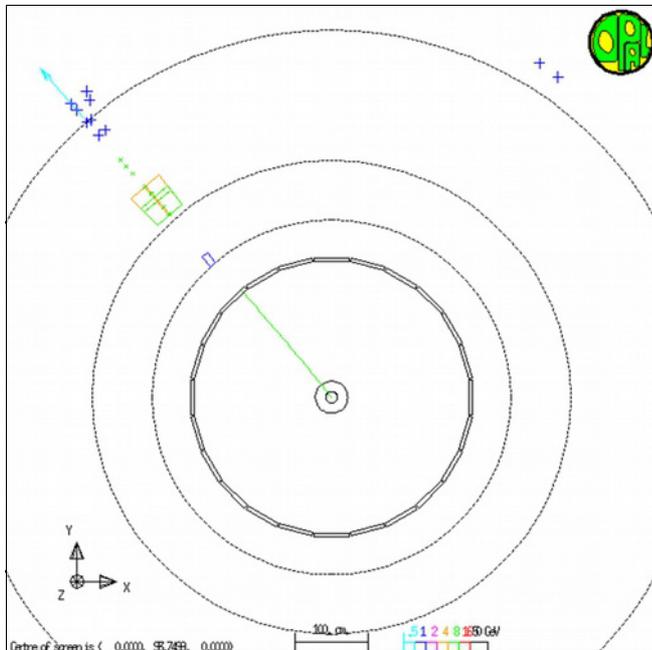
Myon, Elektron, Photon, elektrisch geladenes Hadron, elektrisch neutrales Hadron, Elektron-Neutrino



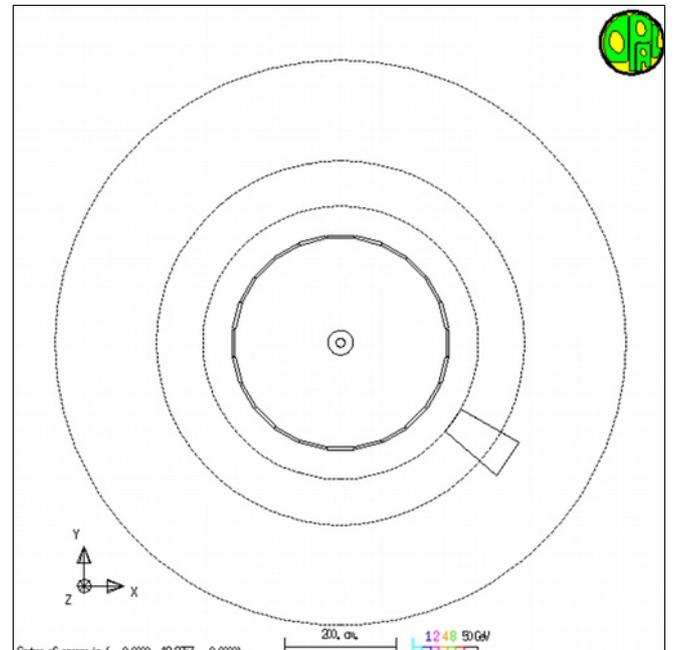
Teilchen: Elektron



Teilchen: elektrisch geladenes Hadron



Teilchen: Myon



Teilchen: Photon

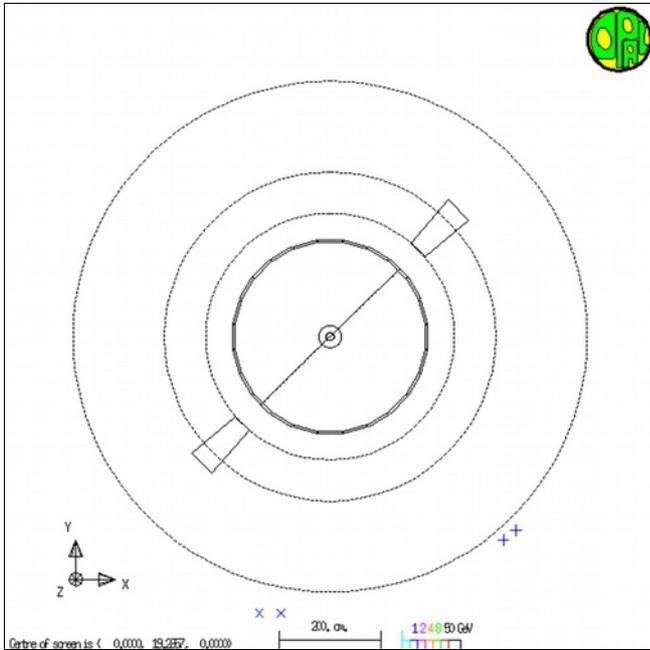
ERWARTUNGSBILD

A.4 Arbeitsmaterialien: Mysteriöse Einträge

Mysteriöse Einträge

In den Darstellungen von Ereignissen im OPAL-Eventdisplay sind häufig einzelne Kreuze als Markierungen für Einträge zu sehen, denen kein vom Kollisionspunkt in der Mitte kommendes Anti-/Teilchen zugeordnet werden kann. Man findet sie vor allem in der Myonenkammer (linke Abbildung) und/oder im hadronischen Kalorimeter (rechte Abbildung).

Begründe, warum derartige Einträge an den genannten Stellen nicht von Anti-/Teilchen stammen können, die bei einer Elektron-Positron-Kollision im Inneren des Detektors entstanden sind. Überlege dir anschließend, wodurch solche Einträge verursacht worden sein können.

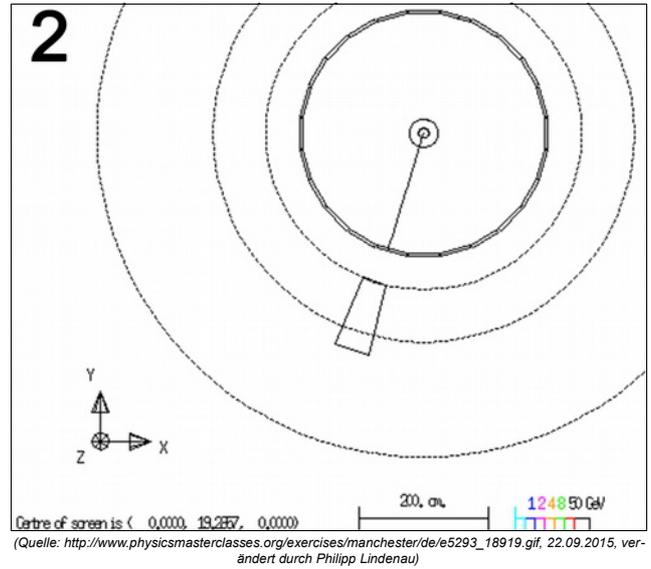
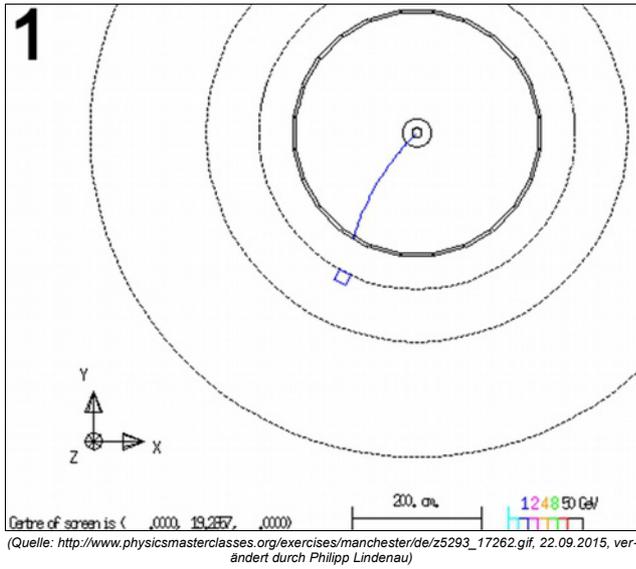


Da den Einträgen keine Spuren in der Spurkammer zugeordnet werden können, scheiden alle aus der Detektormitte kommenden elektrisch geladenen Anti-/Teilchen als Ursache aus. Daher bleiben nur noch Photonen, elektrisch neutrale Hadronen und Anti-/Neutrinos als mögliche Ursachen der Einträge. Photonen verlieren allerdings ihre komplette Energie im elektromagnetischen Kalorimeter und gelangen daher nicht bis zum hadronischen Kalorimeter, weswegen sie als Ursache ebenfalls ausscheiden. Da keine Energiedepositionen im elektromagnetischen Kalorimeter zu sehen sind, können auch elektrisch neutrale Hadronen als Ursache ausgeschlossen werden, da diese dort Einträge hinterlassen. Anti-/Neutrinos können ebenfalls keine derartigen Einträge hinterlassen, da sie mit dem OPAL-Detektor nicht nachgewiesen werden konnten. Somit sind alle aus der Detektormitte kommenden Anti-/Teilchen als mögliche Ursache ausgeschlossen.

Es existieren mehrere mögliche Ursachen für das Vorhandensein derartiger Einträge:

1. Es handelt sich um elektronisches Rauschen
2. Die Einträge wurden von Anti-/Teilchen hervorgerufen, die von außerhalb in den Detektor gelangt sind. Die wahrscheinlichste Quelle solcher Anti-/Teilchen ist die kosmische Höhenstrahlung.
3. Die Einträge stammen von Anti-/Teilchen, die bei spontanen Umwandlungen der Atomkerne des Detektormaterials (Radioaktivität) erzeugt wurden.

A.5 Arbeitsmaterialien: Einflussfaktoren auf die Spurkrümmung



Die abgebildeten Ausschnitte aus Bildern des OPAL-Eventdisplays zeigen jeweils die Signatur eines einzelnen Anti-/Teilchens.

- a) Nenne jeweils die Komponenten des OPAL-Detektors, in welchen die Anti-/Teilchen Spuren bzw. Einträge hinterlassen haben. Schlussfolgere daraus, welche Anti-/Teilchen die erkennbaren Signaturen jeweils erzeugt haben könnten.

- b) Abgesehen davon, dass sich die ursprüngliche Ausbreitungsrichtung der Anti-/Teilchen unterscheidet, gibt es weitere sichtbare Unterschiede zwischen den Signaturen. Nenne diese und stelle eine Vermutung auf, welcher Zusammenhang zwischen ihnen besteht.

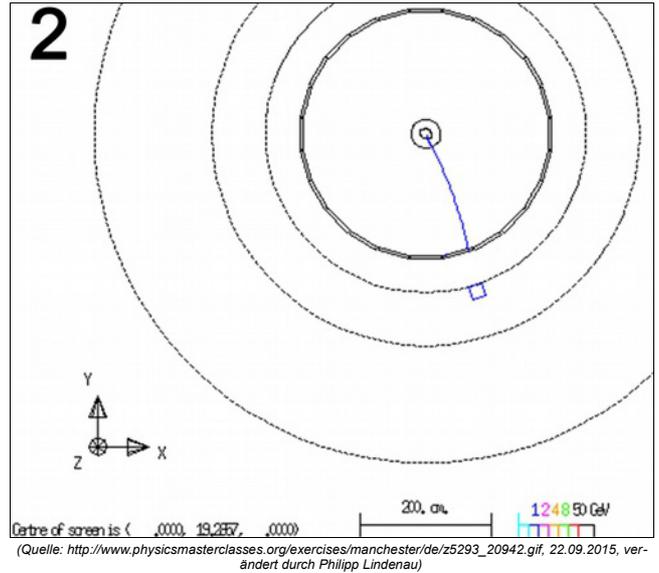
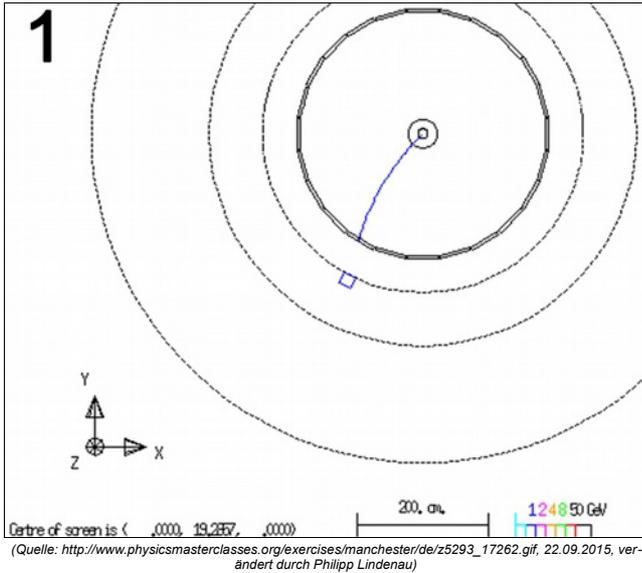
- b*) Beweise deine Vermutung. Gehe dabei davon aus, dass sich das Anti-/Teilchen in der x-y-Ebene bewegt haben. Das Magnetfeld war in positiver z-Richtung orientiert.

Name:

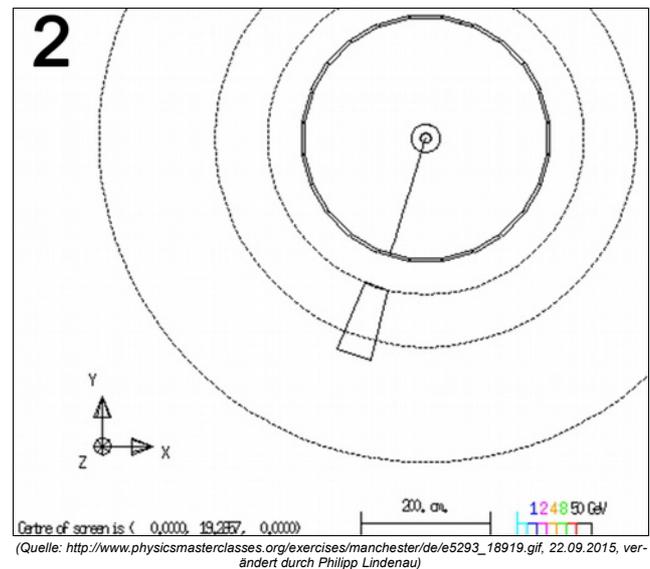
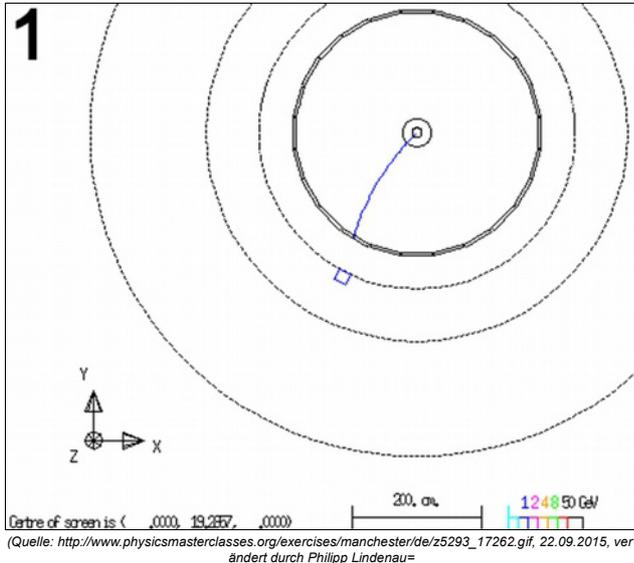
Datum:

c) Entscheide, welche Anti-/Teilchen die Signaturen in den folgenden beiden Abbildungen des OPAL-Eventdisplays erzeugt haben. Begründe jeweils deine Entscheidung.

Hinweis: Das Magnetfeldes zeigt in positive z-Richtung, also aus der Blattebene hinaus



Einflussfaktoren auf die Spurkrümmung



Die abgebildeten Ausschnitte aus Bildern des OPAL-Eventdisplays zeigen jeweils die Signatur eines einzelnen Anti-/Teilchens.

- a) Nenne jeweils die Komponenten des OPAL-Detektors, in welchen die Anti-/Teilchen Spuren bzw. Einträge hinterlassen haben. Schlussfolgere daraus, welche Anti-/Teilchen die erkennbaren Signaturen jeweils erzeugt haben könnten.

Beide Anti-/Teilchen haben jeweils eine Spur in der Spurkammer und einen Energieeintrag im elektromagnetischen Kalorimeter hinterlassen. Weitere Einträge sind nicht sichtbar. Daher kann es sich in beiden Fällen nur um ein Elektron oder ein Positron handeln.

- b) Abgesehen davon, dass sich die ursprüngliche Ausbreitungsrichtung der Anti-/Teilchen unterscheidet, gibt es weitere sichtbare Unterschiede zwischen den Signaturen. Nenne diese und stelle eine Vermutung auf, welcher Zusammenhang zwischen ihnen besteht.

Ein Unterschied besteht im Impuls der Anti-/Teilchen, welchen diese in der Spurkammer besaßen. Bei dem Anti-/Teilchen in Abbildung 1 war dieser im Bereich von $1-2 \frac{\text{GeV}}{c}$, während der Impuls des Anti-/Teilchens in Abbildung 2 deutlich größer war. Des Weiteren besteht ein Unterschied in der Krümmung der Spur. Das Anti-/Teilchen in Abbildung 1 beschrieb eine deutliche Linkskurve. Beim Anti-/Teilchen in Abbildung 2 ist keine Krümmung der Spur zu erkennen.

Vermutung: Der Krümmungsradius der Spur ist umso kleiner, je geringer der Impuls des Anti-/Teilchens ist.

- b*) Beweise deine Vermutung. Gehe dabei davon aus, dass sich das Anti-/Teilchen in der x-y-Ebene bewegt haben. Das Magnetfeld war in positiver z-Richtung orientiert.

Die Spurkammer des OPAL-Detektors war von einem homogenen Magnetfeld durchsetzt. Deshalb wirkte auf elektrisch geladene Anti-/Teilchen, welche sich mit der Geschwindigkeit v durch die Spurkammer bewegten, die Lorentzkraft als Zentripetalkraft.

$$\rightarrow F_L = F_Z$$

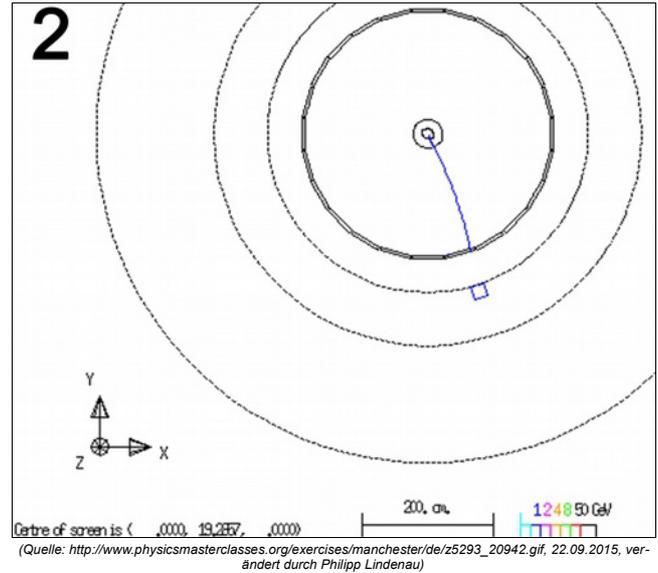
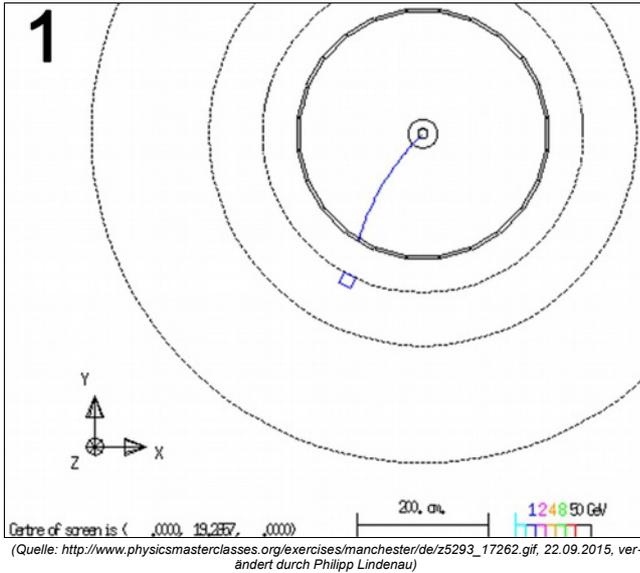
$$\rightarrow Q \cdot v \cdot B = \gamma \cdot m \cdot \frac{v^2}{r} \quad (\text{beide Kräfte eingesetzt})$$

$$\rightarrow r = \frac{\gamma \cdot m \cdot v}{Q \cdot B} \quad (\text{nach dem Krümmungsradius } r \text{ umgestellt})$$

$$\rightarrow r = \frac{p}{Q \cdot B} \quad (\text{die Beziehung } p = \gamma \cdot m \cdot v \text{ genutzt})$$

Der Krümmungsradius der Spur in der Spurkammer ist also direkt proportional zum Impuls des Anti-/Teilchens.

- c) Entscheide, welche Anti-/Teilchen die Signaturen in den folgenden beiden Abbildungen des OPAL-Eventdisplays erzeugt haben. Begründe jeweils deine Entscheidung.
Hinweis: Das Magnetfeldes zeigt in positive z-Richtung, also aus der Blattebene hinaus



Durch Anwendung der „Rechte-Hand-Regel“ folgt, dass die nach links gekrümmte Spur in Abbildung 1 von einem elektrisch negativ geladenen Teilchen erzeugt wurde. Somit muss es sich um die Signatur eines Elektrons handeln. Analog folgt, dass die Signatur in Abbildung 2 von einem Positron erzeugt wurde, da die Spur nach rechts gekrümmt ist, was auf eine positive elektrische Ladung schließen lässt.

**A.6 Arbeitsmaterialien:
Identifikation möglicher Umwandlungskanäle des Z-Teilchens**

Name:

Datum:

2. Entscheide, welche der folgenden Umwandlungen des Z-Teilchens möglich sind. Im Fall der Unmöglichkeit gib dafür eine Begründung an.

a) $Z \rightarrow e^+ + e^-$

b) $Z \rightarrow b^{\downarrow} + \bar{b}^{\uparrow}$

c) $Z \rightarrow \gamma + \gamma$

d) $Z \rightarrow \bar{t}^{\uparrow} + t^{\downarrow}$

e) $Z \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_{\mu}$

f) $Z \rightarrow u^{\downarrow} + d^{\uparrow}$

	Masse in $\frac{\text{GeV}}{c^2}$	Elektrische Ladungszahl	Schwache Ladungszahl	Starker Farbladungsvektor
Z				

a)

e^+				
e^-				
$e^+ + e^-$				

b)

t				
\bar{t}				
$t + \bar{t}$				

c)

γ				
$\gamma + \gamma$				

d)

b				
\bar{b}				
$b + \bar{b}$				

e)

μ^-				
$\bar{\nu}_\mu$				
$\mu^- + \bar{\nu}_\mu$				

f)

u				
d				
$u + d$				

	Masse in $\frac{\text{GeV}}{c^2}$	Elektrische Ladungszahl	Schwache Ladungszahl	Starker Farbladungsvektor
Z	91,2	0	0	$\vec{0}$

a)

e^+	$0.5 \cdot 10^{-3}$	+1	$+\frac{1}{2}$	$\vec{0}$
e^-	$0.5 \cdot 10^{-3}$	-1	$-\frac{1}{2}$	$\vec{0}$
$e^+ + e^-$				

b)

t	173	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{2}$	$\vec{}$
\bar{t}	173	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{2}$	$\vec{}$
$t + \bar{t}$				

c)

γ	0	0	0	$\vec{0}$
$\gamma + \gamma$				

d)

b	4,2	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{2}$	\downarrow
\bar{b}	4,2	$+\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{2}$	\uparrow
$b + \bar{b}$				

e)

μ^-	0,1	-1	$-\frac{1}{2}$	$\vec{0}$
$\bar{\nu}_\mu$	$< 2 \cdot 10^{-9}$	0	$-\frac{1}{2}$	$\vec{0}$
$\mu^- + \bar{\nu}_\mu$				

f)

u	$2 \cdot 10^{-3}$	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{2}$	\downarrow
d	$5 \cdot 10^{-3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{2}$	\rightarrow
$u + d$				

Identifikation möglicher Umwandlungskanäle des Z-Teilchens

Während der ersten Betriebsphase des Large Electron-Positron Colliders („LEP1“, 1989-1995) wurden Elektronen und Positronen bei einer Kollisionsenergie im Bereich der Masse des Z-Teilchens (etwa $91 \frac{\text{GeV}}{c^2}$) zur Kollision gebracht. Dabei wurden insgesamt über 20 Millionen Z-Teilchen erzeugt. Diese sehr kurzlebigen Teilchen wandeln sich allerdings nahezu sofort in verschiedene andere Teilchen um.

1. Notiere dir bekannte Kriterien bzw. Anforderungen an die Umwandlungsprodukte, welche erfüllt sein müssen, damit eine Umwandlung des Z-Teilchens in diese Anti-/Teilchen möglich ist.
 - **Die Summe der Massen der Umwandlungsprodukte darf nicht größer sein als die Masse des Z-Teilchens.**
 - **Elektrische, schwache und starke Ladung müssen bei der Umwandlung erhalten bleiben. Die Summe der entsprechenden Ladungen der Umwandlungsprodukte muss also der entsprechenden Ladung des Z-Teilchens entsprechen.**
 - **Die Umwandlungsprodukte müssen eine elektrische und/oder schwache Ladung besitzen, da das Z-Teilchen an diese Ladungen koppelt.**

Zusätzliche Kriterien:

- **Bei einer Umwandlung des Z-Teilchens entstehen immer genau zwei Anti-/Teilchen.**
- **Die Umwandlung des Z-Teilchens darf nicht im Widerspruch zu den Dupletts der schwachen Ladung stehen.**

2. Entscheide, welche der folgenden Umwandlungen des Z-Teilchens möglich sind. Im Fall der Unmöglichkeit gib dafür eine Begründung an.

a) $Z \rightarrow e^+ + e^-$

Diese Umwandlung ist möglich.

b) $Z \rightarrow t + \bar{t}$

Diese Umwandlung ist nicht möglich, da sowohl Top- als auch Anti-Top-Quark eine größere Masse als das Z-Teilchen besitzen. Die Summe der Massen der beiden entstandenen Quarks ist also größer als die Masse des Z-Teilchens.

c) $Z \rightarrow \gamma + \gamma$

Diese Umwandlung ist nicht möglich, da Photonen weder eine schwache noch eine elektrische Ladung besitzen und das Z-Teilchen daher nicht an diese koppeln kann.

d) $Z \rightarrow b + \bar{b}$

Diese Umwandlung ist möglich.

e) $Z \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

Diese Umwandlung ist nicht möglich, da sowohl die elektrische als auch die schwache Ladung nicht erhalten sind. Die Summe der elektrischen und die Summe der schwachen Ladungszahlen der Umwandlungsprodukte beträgt jeweils -1, während das Z-Teilchen weder eine elektrische noch eine schwache Ladung besitzt.

f) $Z \rightarrow u + d$

Diese Umwandlung ist nicht möglich. Zum einen ist die starke Ladung nicht erhalten, da sich die starken Farbladungsvektoren der Umwandlungsprodukte nicht zum Nullvektor addieren. Zum anderen ist die elektrische Ladung nicht erhalten, da die Summe der elektrischen Ladungszahlen bei den Umwandlungsprodukten $\frac{1}{3}$ beträgt. Das Z-Teilchen ist allerdings elektrisch neutral und farbneutral bezüglich der starken Ladung.

	Masse in $\frac{\text{GeV}}{c^2}$	Elektrische Ladungszahl	Schwache Ladungszahl	Starker Farbladungsvektor
Z	91,2	0	0	$\vec{0}$

a)

e^+	$0,5 \cdot 10^{-3}$	+1	$+\frac{1}{2}$	$\vec{0}$
e^-	$0,5 \cdot 10^{-3}$	-1	$-\frac{1}{2}$	$\vec{0}$
$e^+ + e^-$	$1 \cdot 10^{-3}$	0	0	$\vec{0}$

b)

t^{\rightarrow}	173	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{2}$	\rightarrow
\bar{t}^{\leftarrow}	173	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{2}$	\leftarrow
$t^{\rightarrow} + \bar{t}^{\leftarrow}$	346	0	0	$\rightarrow + \leftarrow = \vec{0}$

c)

γ	0	0	0	$\vec{0}$
$\gamma + \gamma$	0	0	0	$\vec{0}$

d)

b^{\downarrow}	4,2	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{2}$	\downarrow
\bar{b}^{\uparrow}	4,2	$+\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{2}$	\uparrow
$b^{\downarrow} + \bar{b}^{\uparrow}$	8,4	0	0	$\downarrow + \uparrow = \vec{0}$

e)

μ^-	0,1	-1	$-\frac{1}{2}$	$\vec{0}$
$\bar{\nu}_\mu$	$< 2 \cdot 10^{-9}$	0	$-\frac{1}{2}$	$\vec{0}$
$\mu^- + \bar{\nu}_\mu$	0,1	-1	-1	$\vec{0}$

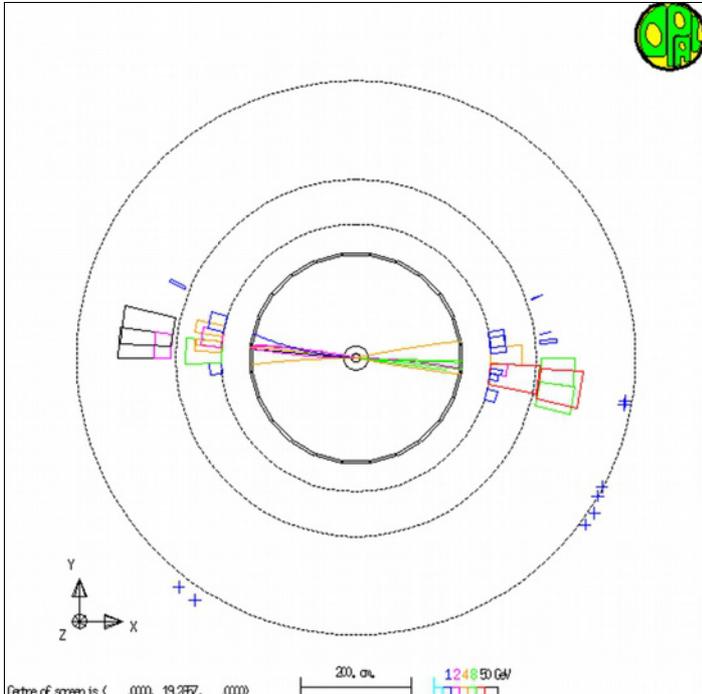
f)

u^{\downarrow}	$2 \cdot 10^{-3}$	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{2}$	\downarrow
d^{\rightarrow}	$5 \cdot 10^{-3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{2}$	\rightarrow
$u^{\downarrow} + d^{\rightarrow}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$+\frac{1}{3}$	0	$\downarrow + \rightarrow = \rightarrow$

A.7 Arbeitsmaterialien: Die Entstehung von Jets

Die Entstehung von Jets

Bei der Umwandlung eines Z-Teilchens entsteht mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 70 Prozent ein Quark-Anti-Quark-Paar. Die Abbildung zeigt ein derartiges Ereignis im OPAL-Eventdisplay. Es ist eine Vielzahl von Spuren und Energieeinträgen in den Kalorimetern zu erkennen. Doch wie kann das sein, wenn bei der Umwandlung des Z-Teilchens lediglich ein Quark und ein Anti-Quark entstanden sind?



(Quelle: http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5293_54644.gif, 27.09.2015, verändert durch Philipp Lindenau)

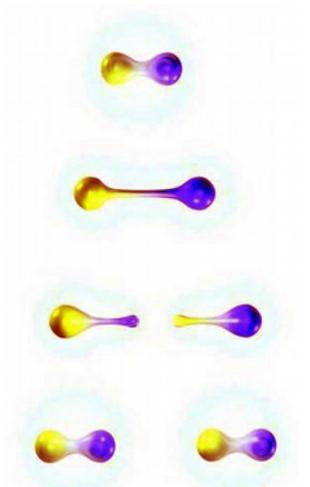
Die starke Wechselwirkung, welche unter anderem dafür verantwortlich ist, dass sich Quarks zu Hadronen binden und diese wiederum Atomkerne bilden, besitzt eine besondere Eigenschaft. Die von ihr hervorgerufene Kraftwirkung zwischen Anti-/Quarks wird mit wachsendem Abstand nicht immer kleiner, wie es zum Beispiel bei der elektromagnetischen Wechselwirkung der Fall ist. Stattdessen bleibt sie ab einem Abstand von etwa 1 fm (das entspricht etwa dem Radius von Protonen und Neutronen) annähernd konstant. Dies hat zur Folge, dass die potentielle Energie der Quarks sehr stark anwächst, wenn sich diese voneinander entfernen, wie es nach deren Erzeugung am Large Electron-Positron Collider (LEP) der Fall war. Diese potentielle Energie reicht spätestens ab einem Abstand von 2 fm aus, um ein neues Anti-/Quark zu erzeugen. Dieser Vorgang ist in der Abbildung unten rechts veranschaulicht.

Der beschriebene Prozess wiederholt sich bei den in Kollisionsexperimenten erzeugten Anti-/Quarks sehr oft, da diese sehr große kinetische Energien besitzen. Nachdem eine Vielzahl von Anti-/Quarks entstanden ist, binden sich diese schließlich zu Hadronen, die sich in Form sogenannter *Jets* etwa in die gleiche Richtung bewegen, wie das ursprünglich bei der Z-Umwandlung entstandene Anti-/Quark.

Mitunter bilden sich instabile Hadronen (z.B. Pionen), die sich selbst wieder umwandeln. Dabei kann es zur Entstehung von Leptonen und Photonen kommen, welche dann ebenfalls in den Jets zu finden sind. Den gesamten beschriebenen Prozess nennt man *Hadronisierung*. Die Tatsache, dass sich Anti-/Quarks nicht isolieren lassen, wird als Quark-Einschluss bzw. *Confinement* (engl. für Gefangenschaft) bezeichnet.

Ereignisse, bei denen ein Quark-Anti-Quark-Paar entstanden ist, lassen sich also sehr einfach von anderen Umwandlungen des Z-Teilchens unterscheiden, da dabei stets Jets aus vielen Anti-/Teilchen entstehen.

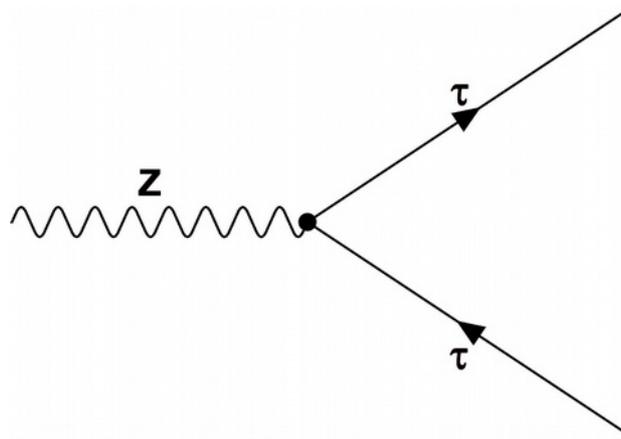
Da Gluonen (die Botenteilchen der starken Wechselwirkung) genau wie die Anti-/Quarks stark geladen sind, können auch sie nicht isoliert existieren. Einzelne Gluonen erzeugen ebenfalls Jets, welche im Eventdisplay sichtbar sind und sich schwer von den Jets der Anti-/Quarks unterscheiden lassen.



(Quelle: Netzwerk Teilchenwelt (2015). Unterrichtsmaterial zur Teilchenphysik, verändert durch Philipp Lindenau)

**A.8 Arbeitsmaterialien:
Umwandlungen des Z-Teilchens in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar**

Umwandlungen des Z-Teilchens in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar



Bei der Umwandlung eines Z-Teilchens kann ein Tauon-Anti-Tauon-Paar entstehen. Dieser Prozess ist im obigen Feynman-Diagramm dargestellt. Tauonen und Anti-Tauonen konnten mit dem OPAL-Detektor nicht direkt nachgewiesen werden, da diese Anti-/Teilchen eine sehr kurze mittlere Lebensdauer ($\sim 10^{-13}$ Sekunden) besitzen und sich daher unmittelbar nach ihrer Entstehung in andere Anti-/Teilchen umwandeln. Dafür gibt es jeweils eine Vielzahl unterschiedlicher Möglichkeiten.

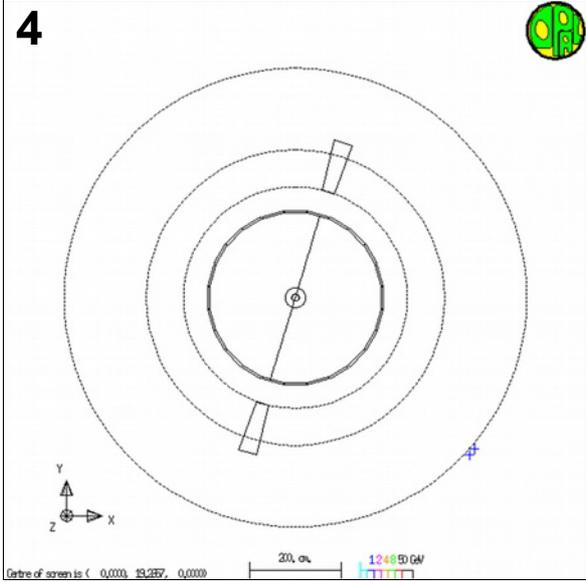
In der nachfolgenden Tabelle sind die wahrscheinlichsten Kombinationen von Anti-/Teilchen angegeben, die nach der Umwandlung eines Anti-/Tauons auftreten können. Mitunter entstehen bei der Umwandlung eines Anti-/Tauons instabile Hadronen, die sich sofort wieder umwandeln. In der Tabelle sind lediglich die finalen Umwandlungsprodukte angegeben, deren Signaturen schließlich im OPAL-Detektor beobachtet werden konnten.

Umwandlungsprodukte des Tauons	Umwandlungsprodukte des Anti-Tauons
• $\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau$	• $\tau^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\tau$
• $\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$	• $\tau^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu + \bar{\nu}_\tau$
• $\tau^- \rightarrow h^- + \nu_\tau + x\gamma$	• $\tau^+ \rightarrow h^+ + \bar{\nu}_\tau + x\gamma$
• $\tau^- \rightarrow h^- + h^+ + h^- + \nu_\tau + x\gamma$	• $\tau^+ \rightarrow h^+ + h^- + h^+ + \bar{\nu}_\tau + x\gamma$

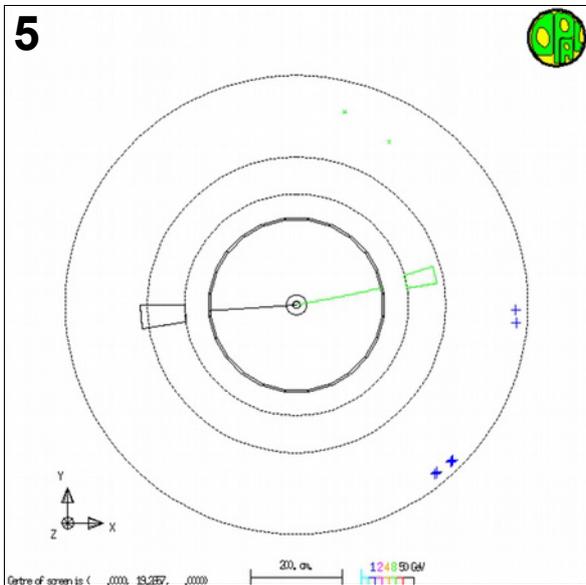
Dabei bezeichnen h^+ bzw. h^- elektrisch positiv bzw. elektrisch negativ geladene Hadronen und $x\gamma$ symbolisiert eine beliebige Anzahl an Photonen (Es müssen allerdings keine Photonen entstehen). Die Umwandlungskanäle des Anti-Tauons erhält man aus denen des Tauons, indem man alle Teilchen durch ihre Anti-Teilchen ersetzt und umgekehrt.

Es entsteht in jedem Fall mindestens ein Anti-/Neutrino. Diese Anti-/Teilchen konnten mit dem OPAL-Detektor nicht nachgewiesen werden. Allerdings kann auf ihre Entstehung unter anderem dadurch geschlossen werden, dass die übrigen Umwandlungsprodukte zusammen nicht die komplette zur Verfügung stehende Kollisionsenergie besitzen. Dies kann man oft an den Farben der Signaturen im OPAL-Eventdisplay erkennen.

Die Umwandlungen des Tauons und des Anti-Tauons sind unabhängig voneinander. Daher können nach der Umwandlung eines Z-Teilchens in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar alle möglichen Kombinationen aus Tauon- und Anti-Tauon-Umwandlungsprodukten auftreten

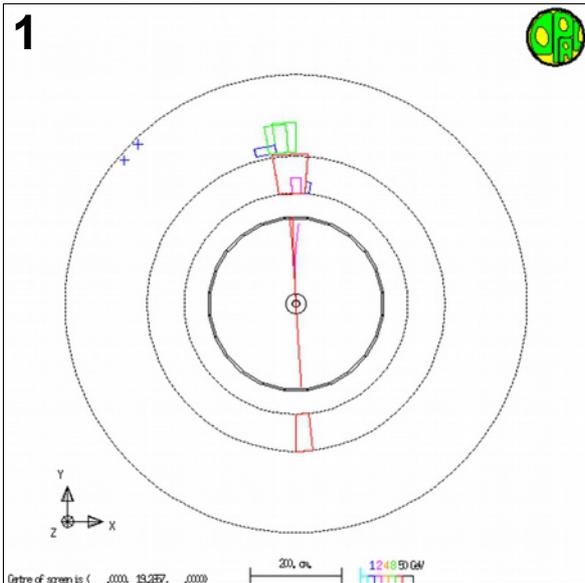


(Quelle: http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/e5293_18919.gif, 27.09.2015, verändert durch Philipp Lindenau)



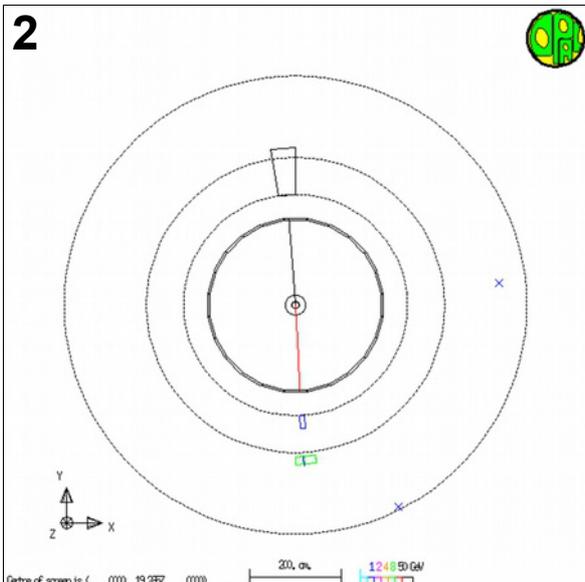
(Quelle: http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5293_20706.gif, 27.09.2015, verändert durch Philipp Lindenau)

Die folgenden Abbildungen des OPAL-Eventdisplays zeigen die Signaturen von Anti-/Teilchen, die nach der Umwandlung eines Z-Teilchens im OPAL-Detektor registriert wurden. Entscheide jeweils, ob die Signaturen eindeutig auf eine Umwandlung des Z-Teilchens in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar schließen lassen. Begründe deine Entscheidung.



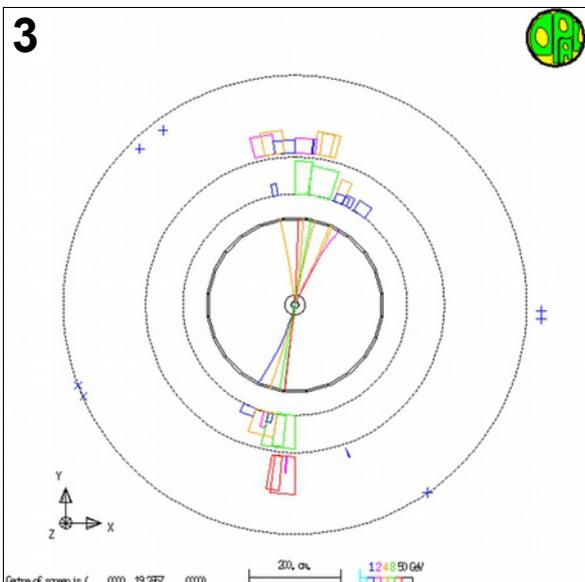
(Quelle: http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5293_1584.gif, 27.09.2015, verändert durch Philipp Lindenau)

Ausgehend vom Kollisionspunkt im Zentrum sind in positiver y-Richtung drei dicht beieinanderliegende Spuren in der Spurkammer zu erkennen. Die Einträge in den Kalorimetern lassen darauf schließen, dass es sich bei den erzeugenden Anti-/Teilchen um elektrisch geladene Hadronen gehandelt hat. Es hat also eine Umwandlung eines Z-Teilchens in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar stattgefunden.



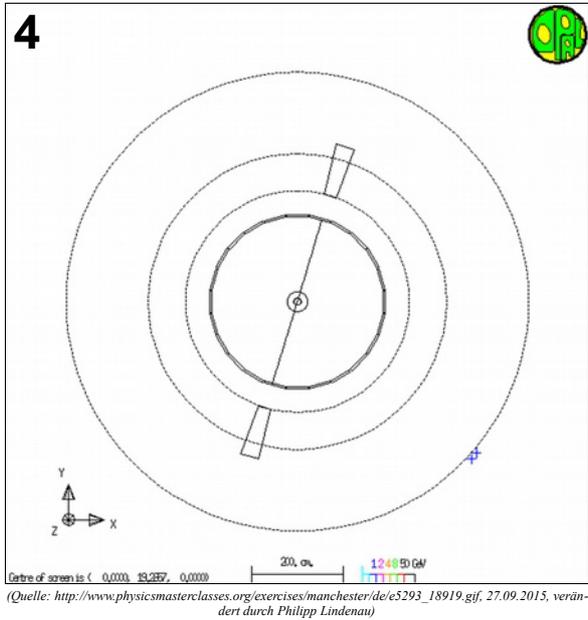
(Quelle: http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5293_21992.gif, 27.09.2015, verändert durch Philipp Lindenau)

Es ist die Signatur eines einzelnen geladenen Hadrons und eines Elektrons oder Positrons zu erkennen. Diese Kombination ist nur möglich, wenn es sich um eine Umwandlung des Z-Teilchens in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar gehandelt hat.

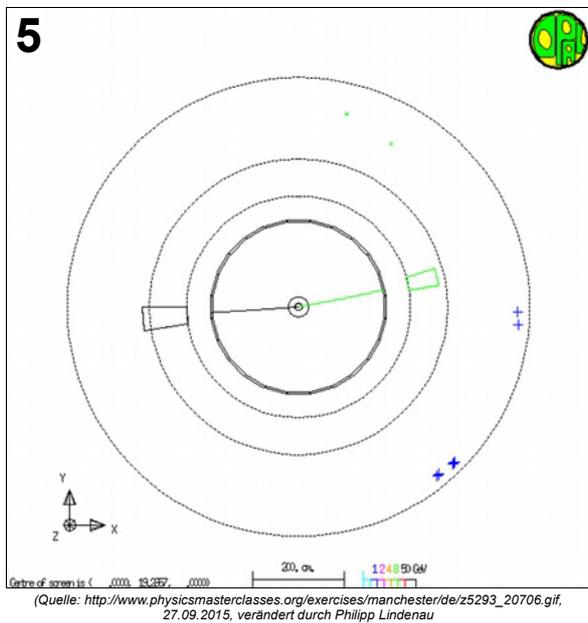


(Quelle: http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z5294_9103.gif, 27.09.2015, verändert durch Philipp Lindenau)

Es sind zwei Jets mit einer Vielzahl von Spuren zu erkennen. Dies lässt auf die Umwandlung eines Z-Teilchens in ein Quark-Anti-Quark-Paar schließen. Es handelt sich demnach nicht um eine Umwandlung in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar



Beide sichtbaren Signaturen können jeweils von einem Elektron oder einem Positron stammen. Demnach muss es sich um ein Elektron-Positron-Paar handeln. Dieses kann durch die Umwandlung eines Tauon-Anti-Tauon-Paares aber auch durch direkte Umwandlung eines Z-Teilchens entstanden sein. Eine eindeutige Zuordnung ist nicht möglich.



Es ist die Signatur eines Elektron-Positron-Paares zu sehen. Eines der beiden Anti-/Teilchen besaß einen geringen Impuls. Dies lässt darauf schließen, dass weitere Anti-/Teilchen entstanden sind, welche den fehlenden Impulsbetrag besaßen. Da keine weiteren Signaturen erkennbar sind, muss es sich bei diesen Anti-/Teilchen um Anti-/Neutrinos gehandelt haben. Die Entstehung von Anti-/Neutrinos ist auch daran erkennbar, dass sich Elektron und Positron nicht in exakt entgegengesetzter Richtung fortbewegt haben. Ohne zusätzliche Anti-/Neutrinos wäre also die Impulserhaltung verletzt.

Es muss sich also um eine Umwandlung des Z-Teilchens in ein Tauon-Anti-Tauon-Paar gehandelt haben, da nur bei einer solchen Umwandlung ein Elektron-Positron-Paar mit zusätzlichen Anti-/Neutrinos entstehen kann.

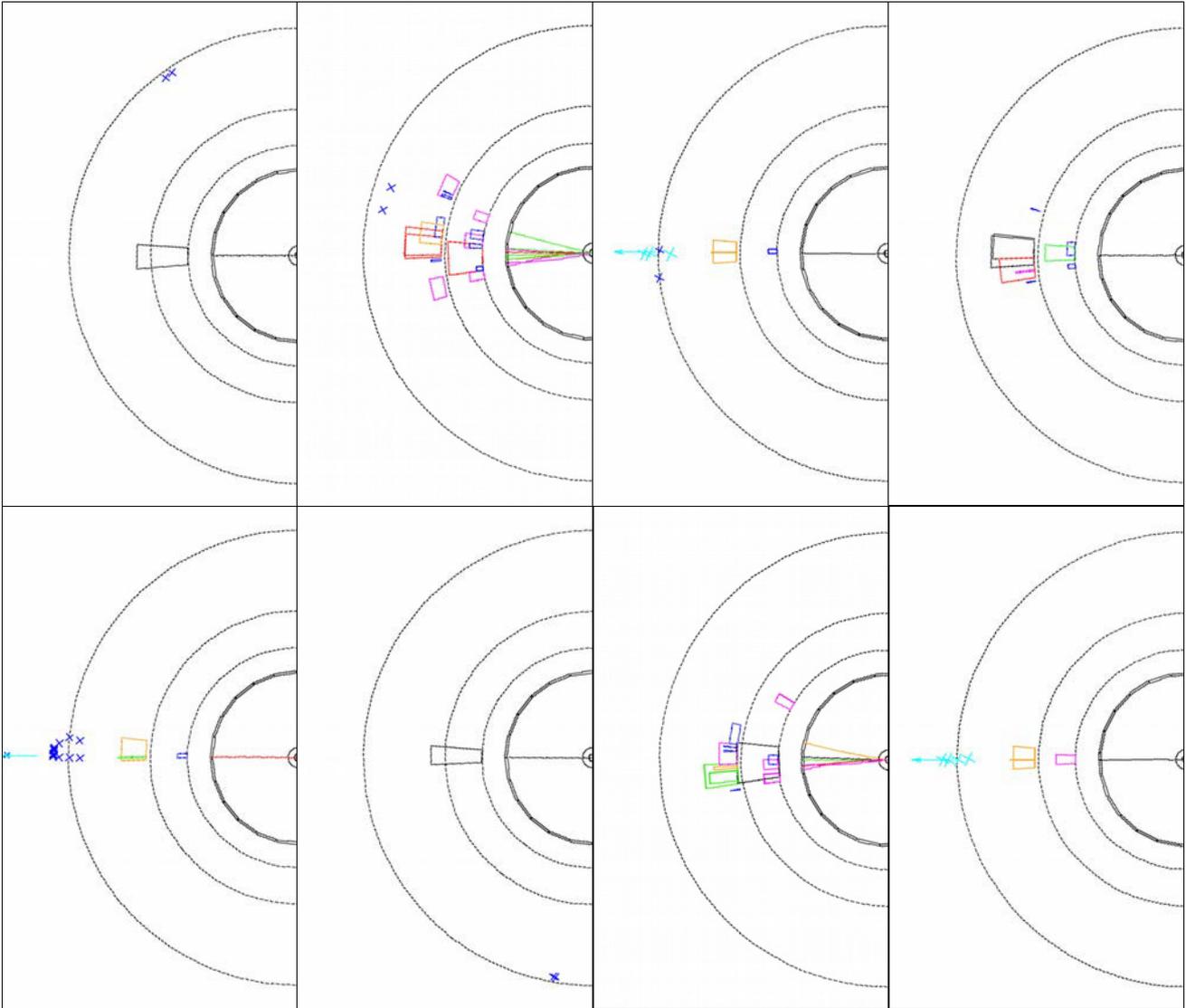
ERWARTUNGSBILD

A.9 Arbeitsmaterialien: Komplexe Übung zur Umwandlung von Z-Teilchen

Komplexe Übung zur Umwandlung von Z-Teilchen

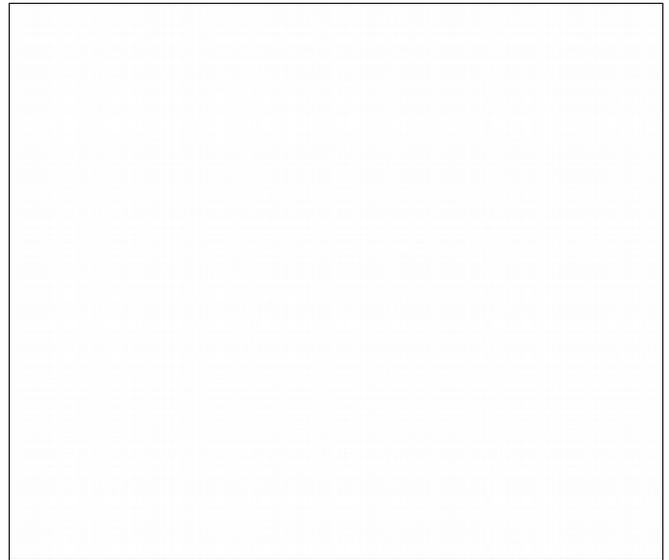
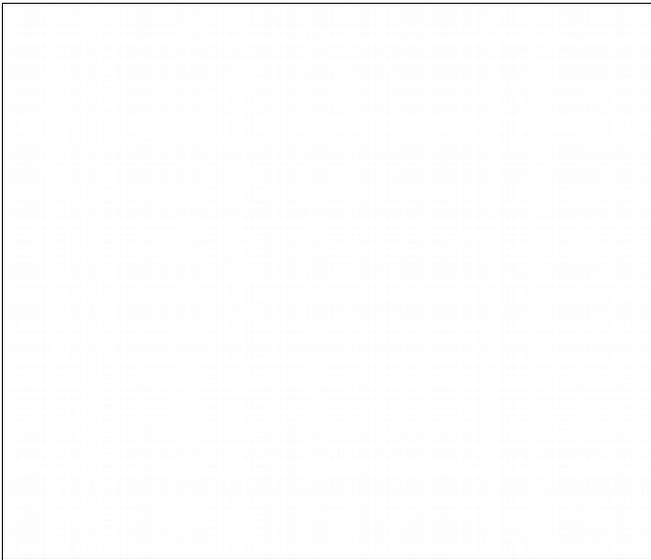
Die folgenden Abbildungen zeigen jeweils die Hälfte der Darstellung eines Ereignisses im OPAL-Eventdisplay. Bei den insgesamt vier Ereignissen handelte es sich um Umwandlungen von Z-Teilchen, wobei **jeweils ein anderer Umwandlungskanal** realisiert wurde.

Schneide die Abbildungen aus und füge sie zu vollständigen Darstellungen dieser Ereignisse zusammen. Klebe diese in die Felder auf dem beiliegenden Arbeitsblatt und zeichne unter die Abbildungen jeweils ein Feynman-Diagramm des zugehörigen Umwandlungskanals.



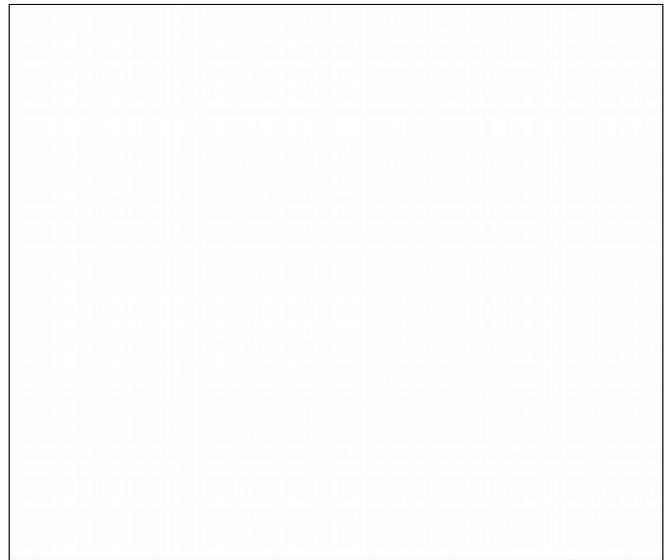
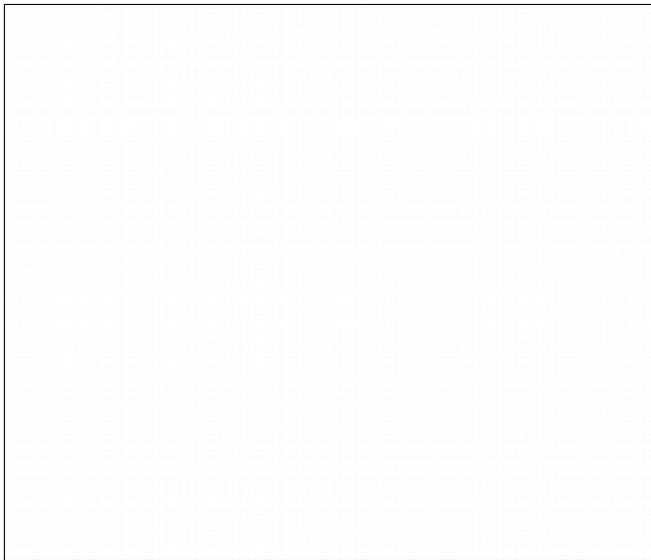
Name:

Datum:



Feynman-Diagramm:

Feynman-Diagramm:

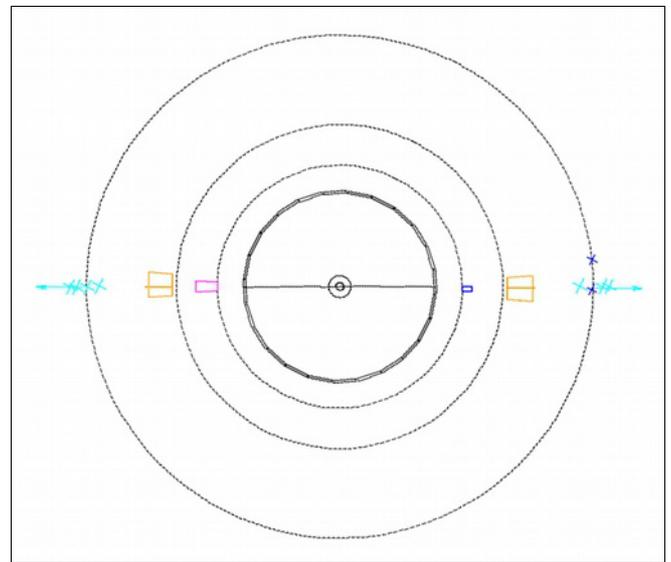
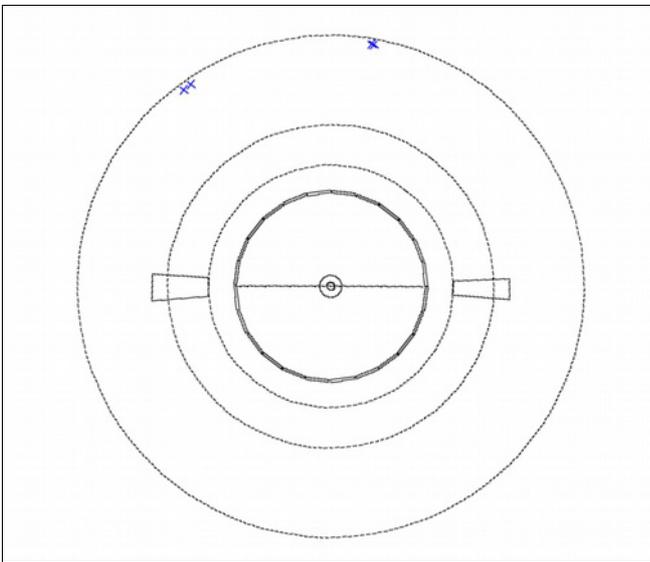


Feynman-Diagramm:

Feynman-Diagramm

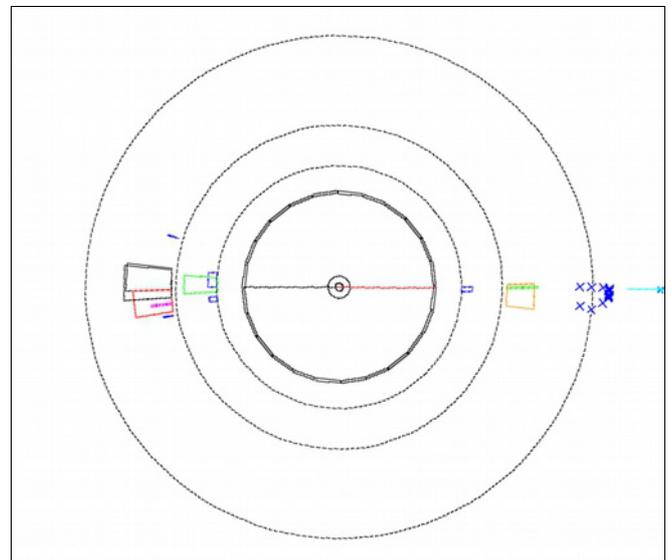
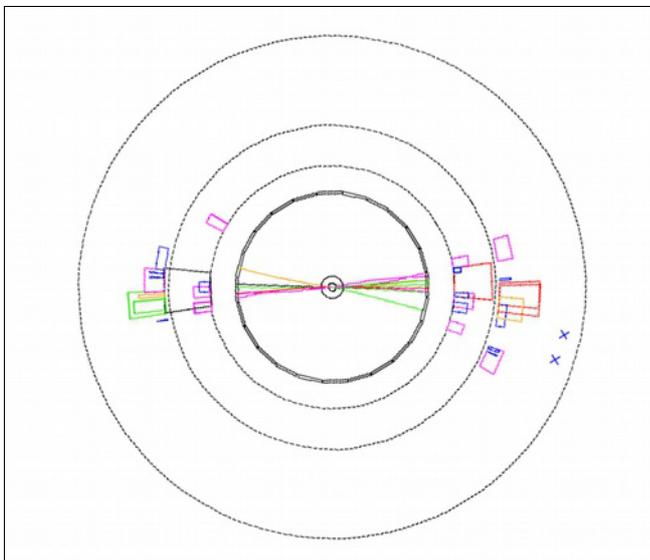
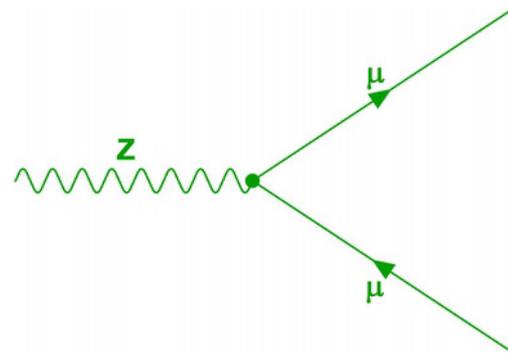
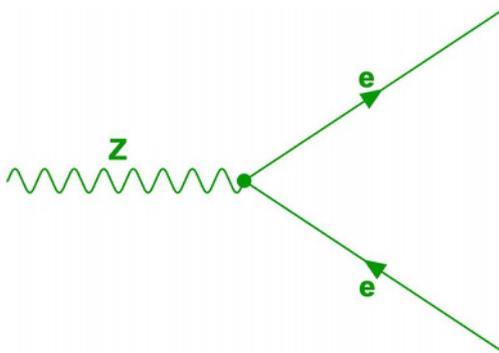
Name:

Datum:



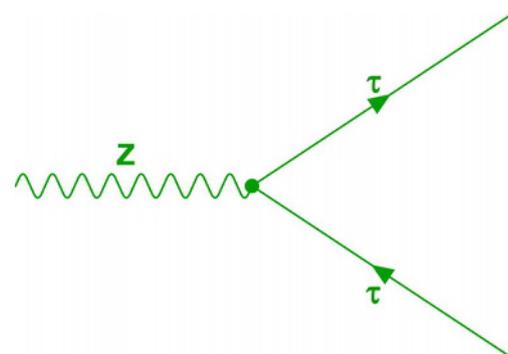
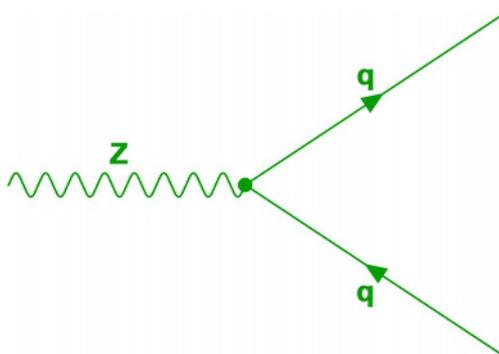
Feynman-Diagramm:

Feynman-Diagramm:



Feynman-Diagramm:

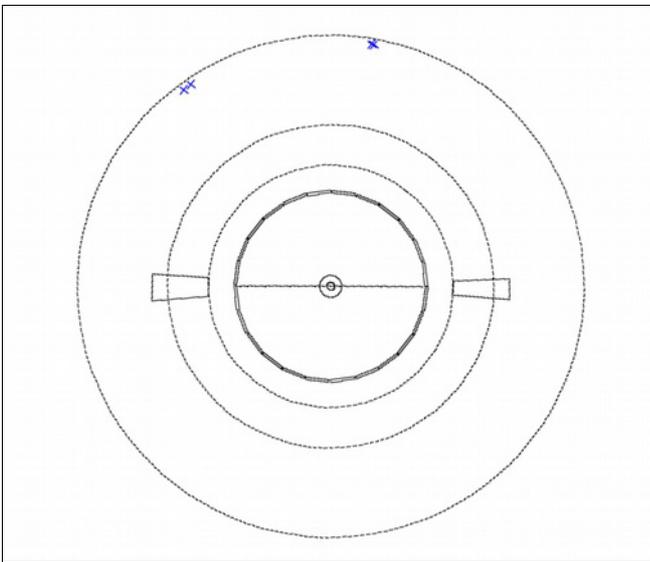
Feynman-Diagramm



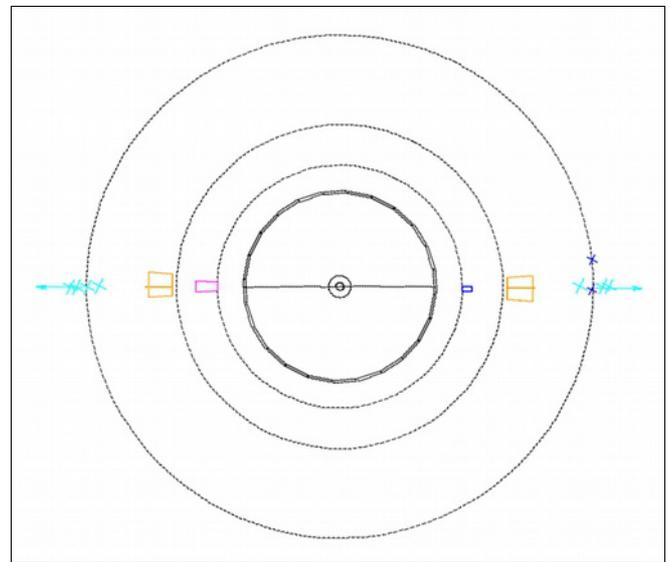
ERWARTUNGSBILD

Name:

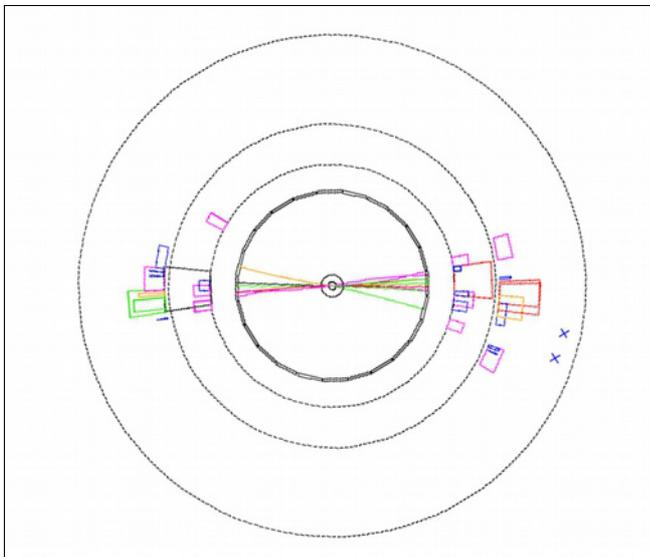
Datum:



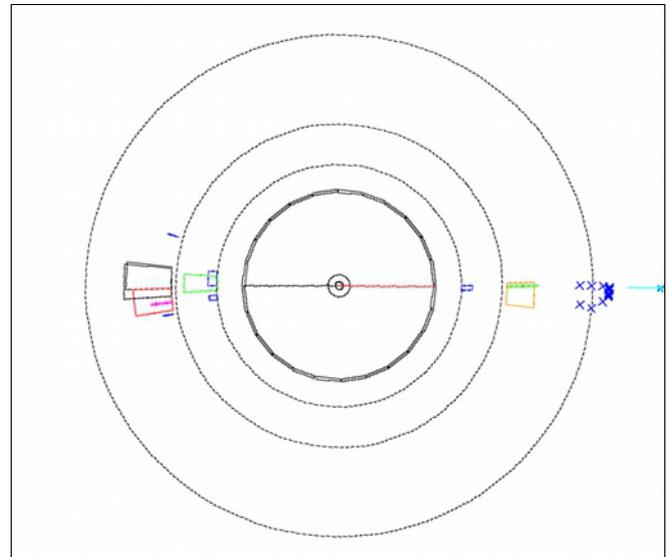
Feynman-Diagramm:



Feynman-Diagramm:



Feynman-Diagramm:

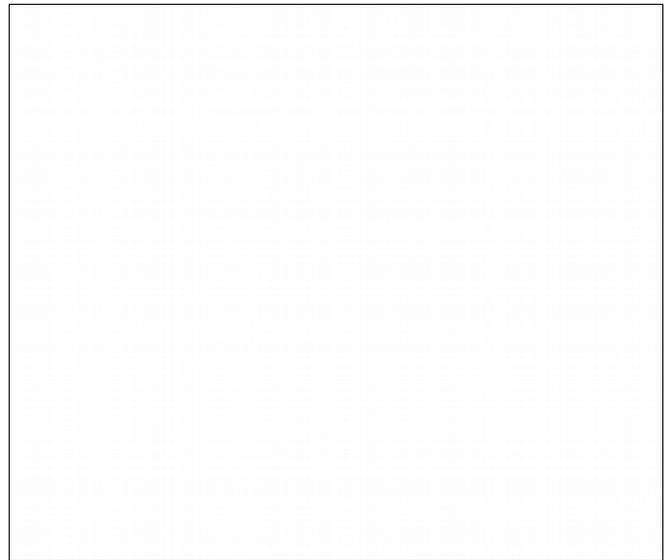
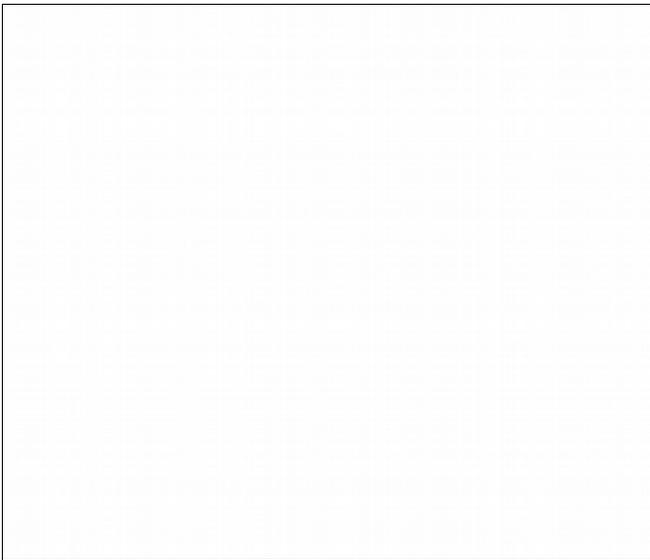


Feynman-Diagramm

HILFSTELLUNG

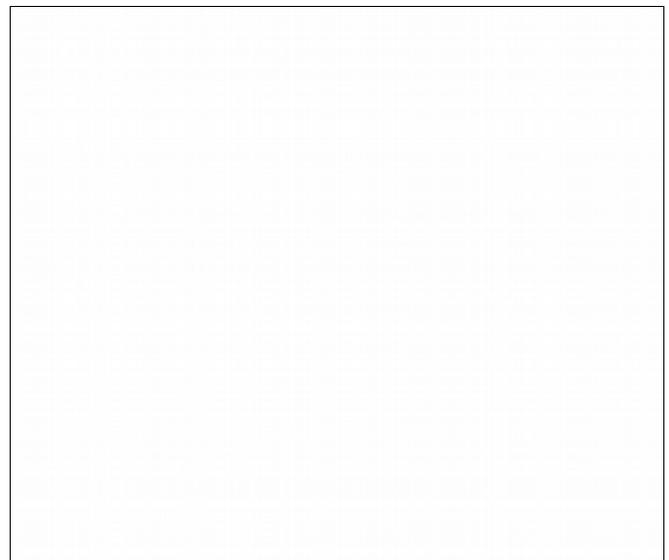
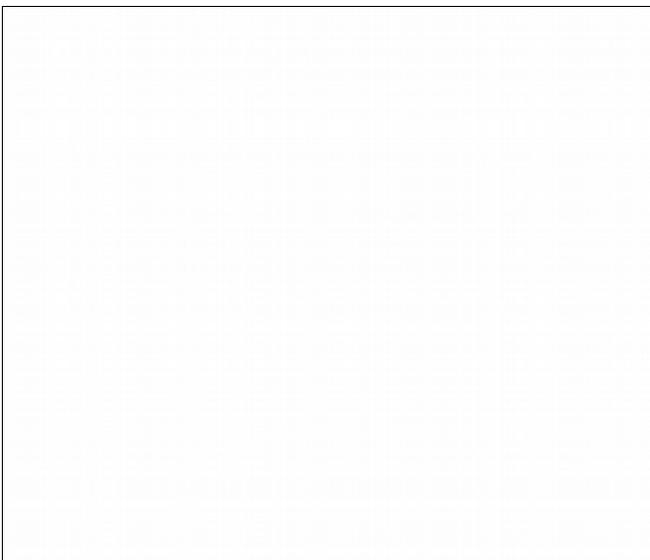
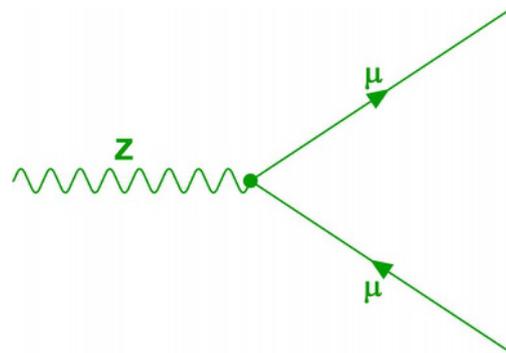
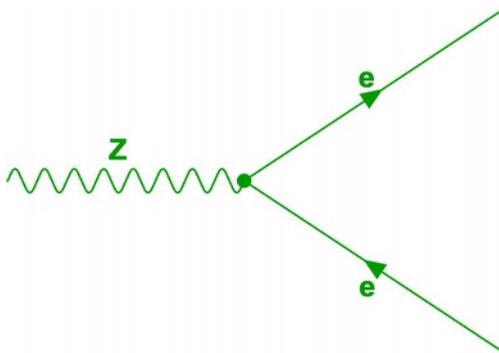
Name:

Datum:



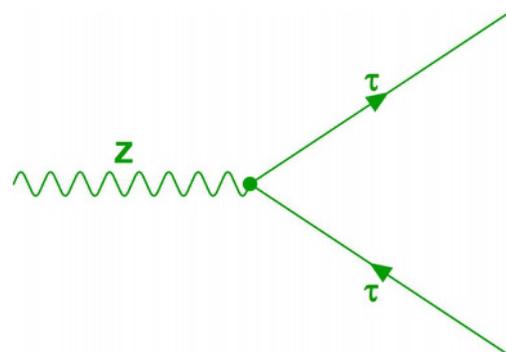
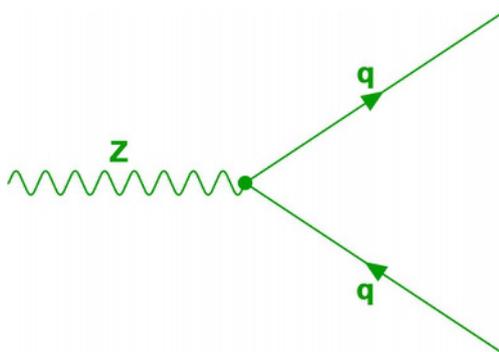
Feynman-Diagramm:

Feynman-Diagramm:



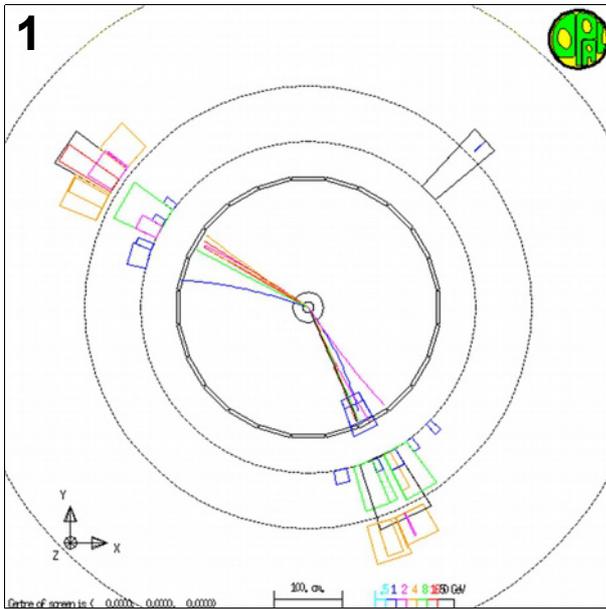
Feynman-Diagramm:

Feynman-Diagramm



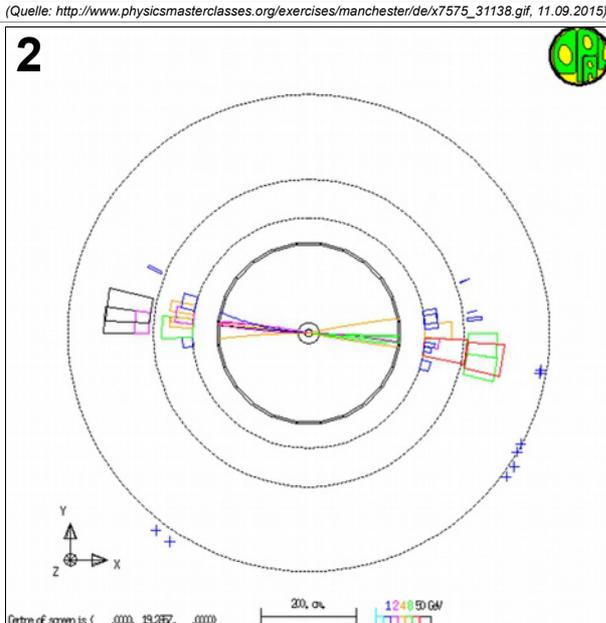
A.10 Arbeitsmaterialien: Abstrahlung von Botenteilchen

2. Die folgenden drei Abbildungen zeigen Ereignisse, bei denen sich ein Z-Teilchen in ein Quark-Anti-Quark-Paar umgewandelt hat. In zwei dieser Ereignisse wurde von einem beiden Anti-/Quarks ein Botenteilchen abgestrahlt wurde. Entscheide jeweils ob und wenn ja was für ein Botenteilchen abgestrahlt wurde. Vervollständige anschließend die zugehörigen Feynman-Diagramme. (Hinweis: Falls ein Botenteilchen abgestrahlt wurde, gibt es mehrere korrekte Feynman-Diagramme.)



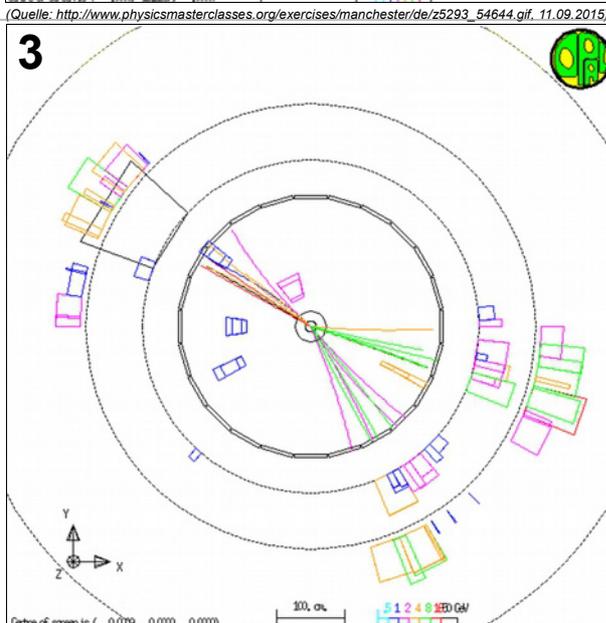
Abgestrahltes Botenteilchen:

Feynman-Diagramm:



Abgestrahltes Botenteilchen:

Feynman-Diagramm:



Abgestrahltes Botenteilchen:

Feynman-Diagramm:



(Quelle: http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/x7575_31138.gif, 11.09.2015)

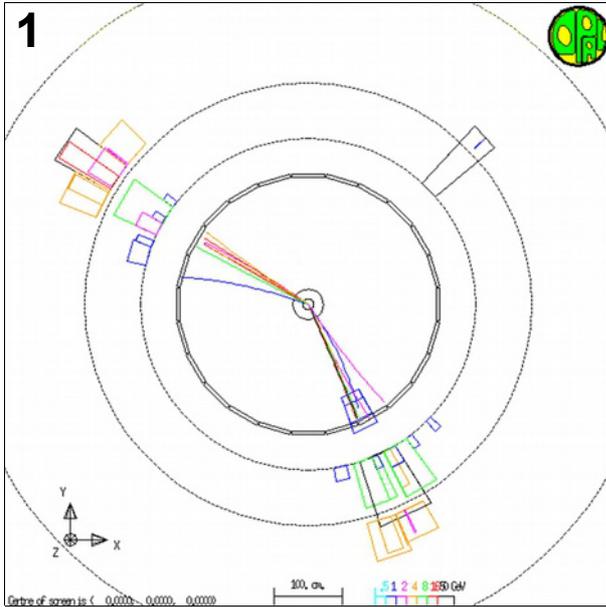
Abstrahlung von Botenteilchen

1. Bei der Umwandlung eines Z-Teilchens entsteht in etwa 70 Prozent der Fälle ein Quark-Anti-Quark-Paar. In einigen Fällen wird von einem der beiden entstandenen Anti-/Quarks ein Botenteilchen abgestrahlt, wobei die Art des Anti-/Quarks erhalten bleibt. Kreuze an, um welche der folgenden Teilchen es sich dabei handeln könnte. Begründe deine Entscheidung.

 Z-Teilchen Photon W⁺-Teilchen Gluon W⁻-Teilchen Elektron-Neutrino

Es können nur Teilchen abgestrahlt werden, für deren Erzeugung das Anti-/Quark ausreichend viel Energie besitzt. Da es sich um Quark-Anti-Quark-Paare aus einer Umwandlung des Z-Teilchens handelt, besitzen diese in keinem Fall eine ausreichende Energie um ein Z-Teilchen abzustrahlen. W⁻- und W⁺-Teilchen haben zwar eine geringere Masse als das Z-Teilchen, allerdings wäre in diesen Fällen die Erhaltung der elektrischen Ladung verletzt, da die Art des Quarks erhalten bleiben soll. Elektron-Neutrinos entfallen ebenfalls, da es sich bei diesen nicht um Botenteilchen handelt. Lediglich Photonen und Gluonen als masselose Botenteilchen erfüllen die nötigen Voraussetzung für eine Abstrahlung. Quarks bzw. Anti-Quarks besitzen sowohl eine elektrische als auch eine starke Ladung, weswegen sowohl Photonen als auch Gluonen an diese koppeln können.

2. Die folgenden drei Abbildungen zeigen Ereignisse, bei denen sich ein Z-Teilchen in ein Quark-Anti-Quark-Paar umgewandelt hat. In zwei dieser Ereignisse wurde von einem beiden Anti-/Quarks ein Botenteilchen abgestrahlt wurde. Entscheide jeweils ob und wenn ja was für ein Botenteilchen abgestrahlt wurde. Vervollständige anschließend die zugehörigen Feynman-Diagramme. (Hinweis: Falls ein Botenteilchen abgestrahlt wurde, gibt es mehrere korrekte Feynman-Diagramme.)

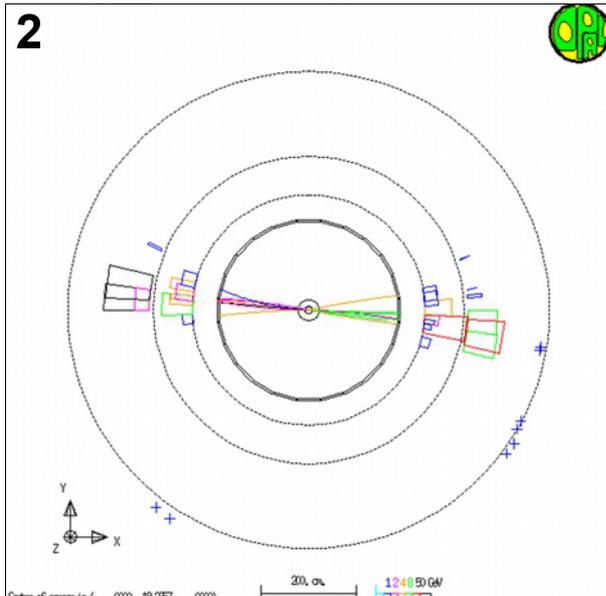
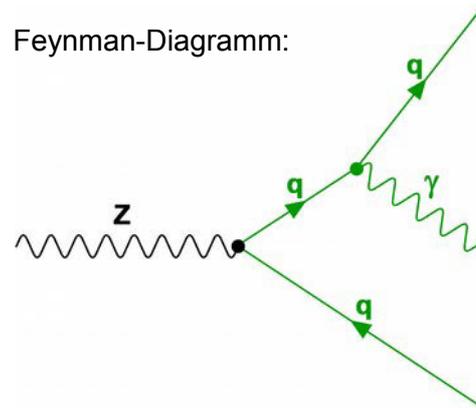


(Quelle: http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/x7575_31138.gif, 11.09.2015)

Abgestrahltes Botenteilchen:

Photon

Feynman-Diagramm:

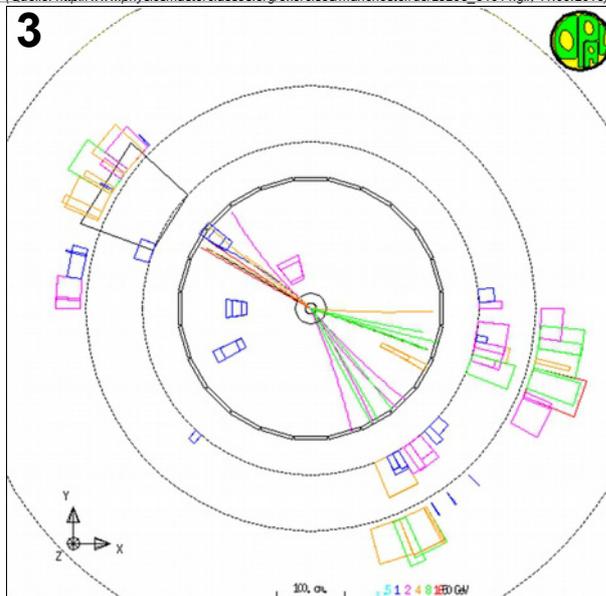
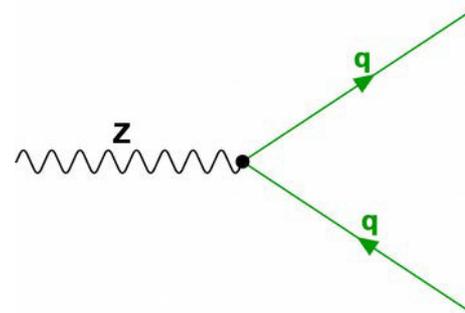


(Quelle: http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/z6293_54644.gif, 11.09.2015)

Abgestrahltes Botenteilchen:

Es wurde kein Botenteilchen abgestrahlt.

Feynman-Diagramm:

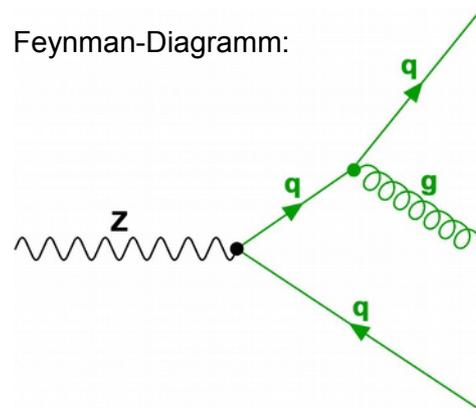


(Quelle: http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/x7579_6540.gif, 11.09.2015)

Abgestrahltes Botenteilchen:

Gluon

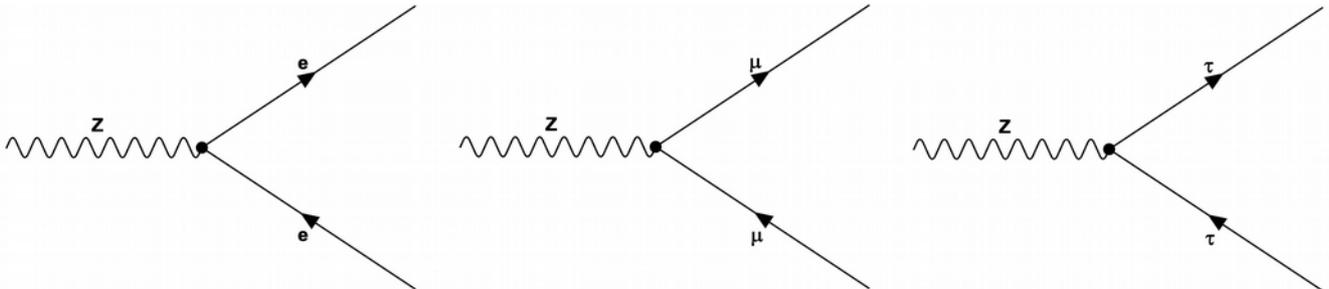
Feynman-Diagramm:



A.11 Arbeitsmaterialien: Ergebnisse der LEP-Forschung

Ergebnisse der LEP-Forschung: Die Leptonenuniversalität

Bereits vor den Experimenten am Large Electron-Positron Collider (LEP) gab es deutliche Hinweise darauf, dass die elektrisch geladenen Leptonen die gleichen elektrischen, schwachen und starken Ladungen besitzen. Bei den LEP-Messungen hoffte man, diese Annahme bestätigen zu können.



Die Auswertung der experimentellen Daten hat ergeben, dass die Umwandlungskanäle $Z \rightarrow e^- + e^+$, $Z \rightarrow \mu^- + \mu^+$ und $Z \rightarrow \tau^- + \tau^+$ (siehe obige Feynman-Diagramme) mit gleicher Wahrscheinlichkeit realisiert werden. Jeder der drei Umwandlungskanäle wurde in etwa 3,4 Prozent der insgesamt beobachteten Z-Umwandlungen realisiert. Das Z-Teilchen koppelt sowohl an die elektrische als auch an die schwache Ladung. Die Wahrscheinlichkeit der Erzeugung bestimmter Anti-/Teilchen bei einer Umwandlung des Z-Teilchens ist also abhängig von deren elektrischer und schwacher Ladungszahl.

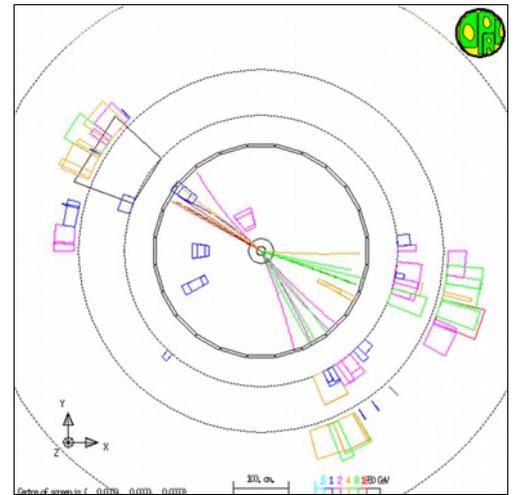
Bereits vor den LEP-Experimenten war bekannt, dass Elektronen, Myonen und Tauonen dieselbe elektrische Ladung besitzen und farbneutral bezüglich der starken Ladung sind (gleiches gilt für die entsprechenden Anti-Teilchen). Die Tatsache, dass die drei Umwandlungskanäle des Z-Teilchens in geladene Leptonen mit gleicher Häufigkeit beobachtet wurden, lässt den Schluss zu, dass Elektronen, Myonen und Tauonen ebenfalls dieselbe schwache Ladung besitzen. Gleiches gilt entsprechend auch für die zugehörigen Anti-Teilchen.

Elektronen, Myonen und Tauonen verhalten sich demnach bei Wechselwirkungen identisch. Gleiches gilt entsprechend für die zugehörigen Anti-Teilchen. Dieser Sachverhalt wird als *Leptonenuniversalität* bezeichnet. Der einzige Unterschied besteht in den Massen der Anti-/Teilchen. Da diese jedoch sehr klein gegenüber der Masse des Z-Teilchens sind, spielte dieser Aspekt bei den Experimenten am LEP keine Rolle. Die Bestätigung der Leptonenuniversalität ist eines der wichtigsten Ergebnisse der LEP-Forschung.

Ergebnisse der LEP-Forschung:

Bestimmung des starken Kopplungsparameters

Eines der Forschungsziele am Large Electron-Positron Collider (LEP) war die Bestimmung des starken Kopplungsparameters α_s . Dieser Parameter ist unter anderem ein Maß dafür, mit welchen Wahrscheinlichkeiten Prozesse der starken Wechselwirkung stattfinden. α_s ist abhängig von der Energie der Anti-/Teilchen, die an der Wechselwirkung beteiligt sind. Das Standardmodell der Teilchenphysik sagt den funktionellen Zusammenhang zwischen dem Kopplungsparameter und der Energie voraus, nicht jedoch dessen tatsächlichen Wert bei bestimmten Energien. Kennt man den Wert von α_s bei einer bestimmten Energie, lassen sich die Werte für andere Energien aus den theoretischen Vorhersagen berechnen. Um zu überprüfen, ob diese Vorhersagen stimmen, muss man den Wert des Kopplungsparameters bei verschiedenen Energien experimentell bestimmen. Anschließend kann man diese Werte mit Hilfe der vorausgesagten Energieabhängigkeit auf eine Referenzenergie umrechnen und untereinander vergleichen. Als Referenzenergie wird üblicherweise die Energie des Z-Teilchens ($E_Z=91,2$ GeV) gewählt. Sofern die Vorhersagen des Standardmodells stimmen, sollten sich aus unterschiedlichen Experimenten bzw. durch unterschiedliche Auswertungsmethoden dieselben Werte für $\alpha_s(E_Z)$ ergeben.

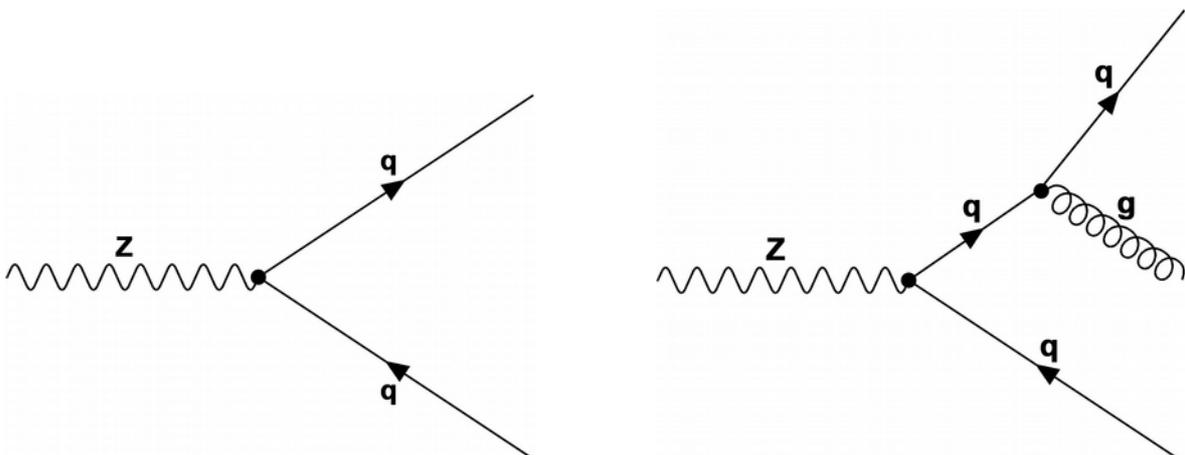


(Quelle: http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/manchester/de/x7579_6540.gif, 11.09.2015)

Da nur Anti-/Quarks und Gluonen eine starke Ladung besitzen, kann der Wert von α_s nur durch die Untersuchung von Prozessen bestimmt werden, bei denen diese Anti-/Teilchen beteiligt sind

Bei den Umwandlungen der am LEP erzeugten Z-Teilchen entstanden häufig Quark-Anti-Quark-Paare. Gelegentlich kam es vor, dass eines der entstandenen Anti-/Quarks ein Gluon abstrahlte. Dieser Prozess wird auch als *Gluon-Bremmsstrahlung* bezeichnet. Das emittierte Gluon bildete genau wie das Quark und das Anti-/Quark einen Jet. Bei Ereignissen mit Gluon-Bremmsstrahlung waren im Eventdisplay also drei anstatt zwei Jets zu erkennen. Ein solches Ereignis ist in der obigen Abbildung des OPAL-Eventdisplays zu sehen.

Im Feynman-Diagramm unten links ist die Umwandlung eines Z-Teilchens in ein Quark-Anti-Quark-Paar dargestellt. Das rechte Feynman-Diagramm zeigt den selben Prozess nur mit der anschließenden Emission eines Gluons durch eines der Anti-/Quarks.



Das rechte Feynman-Diagramm unterscheidet sich vom linken Diagramm durch den zusätzlichen Vertex, an dem das Gluon abgestrahlt wird. Jeder zusätzliche Vertex in einem Feynman-Diagramm beeinflusst die Wahrscheinlichkeit für die Realisierung des Prozesses. Pro Vertex tritt bei der Berechnung der Wahrscheinlichkeit ein zusätzlicher Faktor auf, der direkt proportional zum Kopplungsparameter der am Vertex stattfindenden Wechselwirkung ist. In dem hier betrachteten Fall ist dieser Faktor also proportional zum starken Kopplungsparameter α_s .

Zwischen den Wahrscheinlichkeiten (P) für 2-Jet- und 3-Jet-Ereignisse besteht also folgender Zusammenhang:

$$P(3\text{-Jet}) = k \cdot \alpha_s(E_Z) \cdot P(2\text{-Jet})$$

Daraus folgt:

$$\alpha_s(E_Z) = \frac{P(3\text{-Jet})}{P(2\text{-Jet}) \cdot k}$$

In die Konstante k gehen zum Beispiel die gemessenen Energien des abstrahlenden Anti-/Quarks und des Gluons ein. Diese Energien lassen sich aus der Summe der Energien der in den entstandenen Jets enthaltenen Anti-/Teilchen bestimmen. Weiterhin gehen eine Vielzahl komplizierter Korrekturen ein, die sich aus dem Standardmodell ergeben.

Bei den Experimenten am LEP wurden Millionen von Z-Umwandlungen in Anti-/Quarks beobachtet. Aufgrund dieser großen Zahl kann aus den beobachteten relativen Häufigkeiten von 2-Jet- und 3-Jet-Ereignissen sehr genau auf die zugrunde liegenden Wahrscheinlichkeiten geschlossen werden. Die Bestimmung des Verhältnisses der Anzahl der 3-Jet-Ereignisse zu der Anzahl der 2-Jet-Ereignisse ermöglichte also eine sehr präzise Berechnung des starken Kopplungsparameters.

Durch Vergleich mit den Werten des starken Kopplungsparameters, die bei vorangegangenen Experimenten bzw. am LEP durch andere Untersuchungsmethoden gewonnen wurden, konnte die vom Standardmodell vorhergesagte Energieabhängigkeit bestätigt werden.

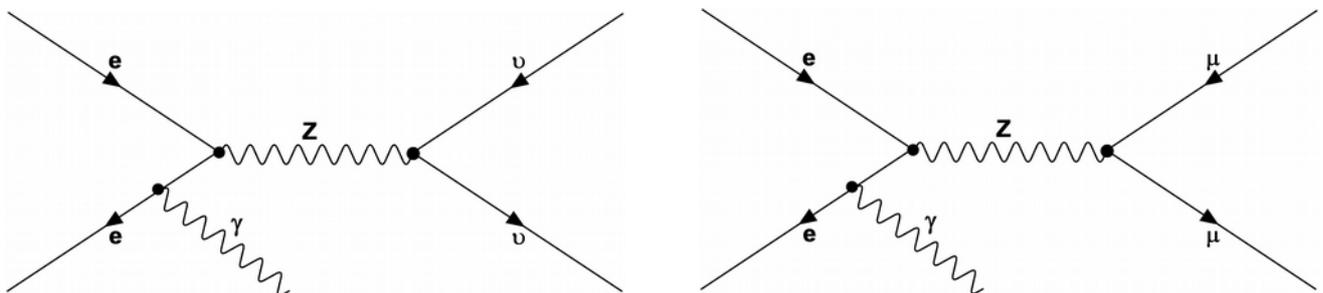
Ergebnisse der LEP-Forschung: Die Anzahl der Neutrinogenerationen

In den Experimenten am Large Electron-Positron Collider (LEP) wollten die Wissenschaftler unter anderem überprüfen, wie viele unterschiedliche Arten von Anti-/Neutrinos existieren. Das Problem dabei war, dass Anti-/Neutrinos mit den Detektoren nicht direkt nachweisbar waren, was die Untersuchung dieser elementaren Anti-/Materieteilchen erschwerte.

Das Standardmodell sagt voraus, wie das Verhältnis der Anzahl der Umwandlungen des Z-Teilchens in ein Neutrino-Anti-Neutrino-Paar zur Anzahl der Umwandlungen in ein Paar aus geladenen Leptonen sein müsste, wenn wie angenommen nur die drei bekannten Arten leichter Anti-/Neutrinos existieren. Wie konnte dieses Verhältnis aber bestimmt werden, wenn man die Zahl der Umwandlungen von Z-Teilchen in Anti-/Neutrinos nicht zählen konnte?

Unter bestimmten Umständen war es möglich, auf die Umwandlung eines Z-Teilchens in ein Neutrino-Anti-Neutrino-Paar zu schließen, auch wenn die Anti-/Neutrinos für die Detektoren unsichtbar blieben.

Die Z-Teilchen wurden am LEP durch die Kollision von Elektronen und Positronen erzeugt. Manchmal kam es vor, dass eines dieser Anti-/Teilchen vor der Kollision ein Photon abstrahlte, welches im Detektor registriert werden konnte. Wandelte sich das entstandene Z-Teilchen anschließend in ein Neutrino-Anti-Neutrino-Paar um, so war im Detektor nur die Signatur des Photons sichtbar. So konnten diese Ereignisse gezählt werden. Der gesamte Prozess ist im linken Feynman-Diagramm dargestellt. Das rechte Feynman-Diagramm beschreibt einen ähnlichen Prozess, nur dass sich das Z-Teilchen dabei in ein Myon-Anti-Myon-Paar umwandelt. Derartige Ereignisse konnten am LEP leicht identifiziert und gezählt werden



Das ermittelte Verhältnis aus Umwandlungen des Z-Teilchens in ein Neutrino-Anti-Neutrino-Paar zu den Umwandlungen in ein Myon-Anti-Myon-Paar wurde mit den Vorhersagen des Standardmodells verglichen, die sich ergeben, wenn man annimmt, dass genau die drei bisher bekannten leichten Neutrinos existieren. Es hat sich gezeigt, dass die experimentellen Ergebnisse sehr genau mit den Vorhersagen übereinstimmen. Mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit existieren also tatsächlich nur drei Arten leichter Anti-/Neutrinos.

Dass eventuell schwere Neutrinos existieren, die eine zu große Masse besitzen um bei der Umwandlung eines Z-Teilchens entstehen zu können, kann anhand der experimentellen Daten allerdings nicht ausgeschlossen werden.