

Feynman-Rhombino

Spiel zu Feynman-Diagrammen



Idee: Otmar Winkler

Entwicklung: Philipp Lindenau, Otmar Winkler, Claudia Behnke

Stand: Dezember 2020

Weiterverwendung und Lizenz: creative commons 2.0-by-nc-nd

Inhalt

Spielanleitung	3
Spielziel und Materialien	3
Symbolik der Rhombinos	4
Spielvorbereitung	4
Spielablauf	5
Die Vertex-Regeln	6
Spielende und Wertung	6
Punkteählung	7
Unlösbare Situationen	7
Falsches Legen	8
Spielmaterial	10
1. Rhombinos zum Ausschneiden	10
2. Übersicht wichtiger Teilcheneigenschaften	17
3. Übersicht aller erlaubten Vertices	20
4. Farbige Variante der Rhombinos zum Ausschneiden	23
Hinweise für Lehrkräfte	30
Einbettung in den Unterricht	30
Zielgruppe	30
Benötigtes Vorwissen	30
Lernziele	30
Spieldauer und erstes Spiel	30
Didaktische und methodische Hinweise	31
Farbladung	31
Interpretation der Liniengeometrie	31
Stochastischer Charakter der Teilchenphysik	31
Rhombinos mit farbig markierter Teilchengeneration	31
Kooperatives Spiel	32
Geplante Erweiterungen von Feynman-Rhombino	32
Feynman-Puzzle	32
Digitales Feynman-Rhombino	33
Feedback	33

Spielanleitung

Spielziel und Materialien.....	3
Symbolik der Rhombinos.....	4
Spielvorbereitung.....	4
Spielablauf.....	5
Die Vertex-Regeln	6
Spielende und Wertung	6
Unlösbare Situationen	7
Falsches Legen	8

Spielziel und Materialien

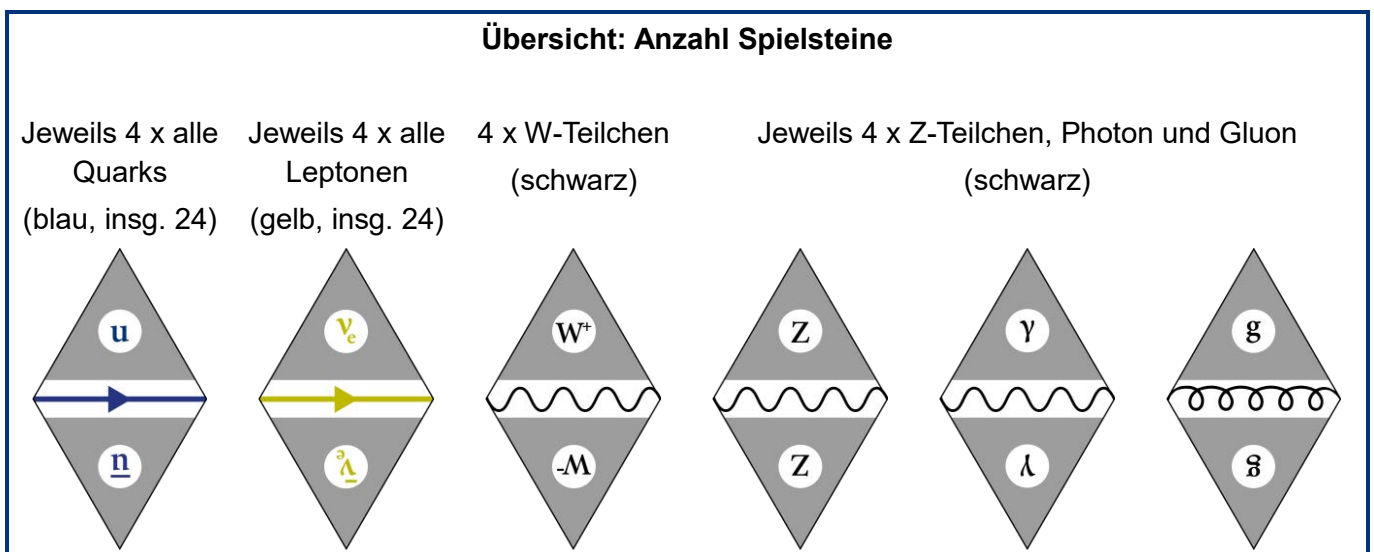
Ziel des Spiels: Es werden, ähnlich wie beim gewöhnlichen Domino, „Rhombinos“ (Elementarteilchen) aneinandergesetzt. Dabei müssen die Regeln der Feynman-Diagramme bzw. der Teilchen-Wechselwirkungen beachtet werden. Wer zuerst alle Rhombinos von der Hand abgelegt hat, gewinnt.

Spieler*innen: mindestens 2 (3 – 5 empfohlen)

Alter: ab 14 (Grundverständnis zu Feynman-Diagrammen vorausgesetzt)

Material:

- insgesamt 80 Teilchen-Rhombinos
- eine Übersicht „Teilcheneigenschaften“ für jede*n Mitspieler*in
- eine Übersicht aller erlaubten Vertices



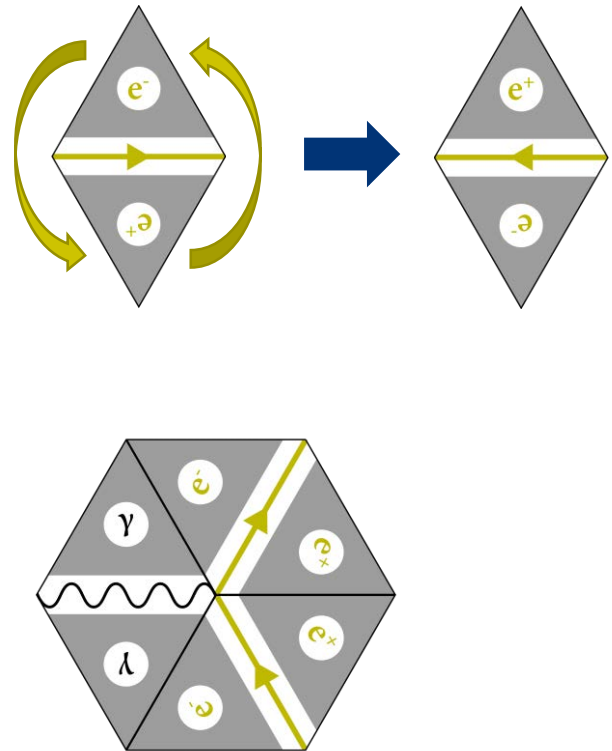
Symbolik der Rhombinos

Auf jedem Rhombino sind sowohl die Symbole für **Teilchen** als auch die der zugeordneten **Anti-Teilchen** abgedruckt. Durch Drehung der Rhombinos bzw. der Pfeilrichtung bei Materieteilchen um 180 Grad kann ein Rhombino beides repräsentieren. Die **Zeit** verläuft dabei, wie bei Feynman-Diagrammen üblich, von **links nach rechts**.

Beispiele

Ein Elektron wird durch Drehung um 180 Grad zum seinem Anti-Teilchen, dem Positron (siehe Abbildung rechts oben).

Im Beispiel rechts unten ist der Vertex der Paarerzeugung eines Elektron-Positron-Paares aus einem Photon sichtbar. Ein*e gegenüberstehende*r Mitspieler*in würde allerdings eine Paarvernichtung von Elektron und Positron in ein Photon sehen. Dies lässt sich leicht durch Drehen dieses Blattes nachvollziehen. Das müsst ihr natürlich beachten, wenn ihr euch über die gelegten Rhombinos unterhaltet. In jedem Fall sind erlaubte Kombinationen von Rhombinos immer in beiden Sichtweisen erlaubt und erfüllen die Regeln des Standardmodells!



Hinweise

- Es ist jeweils das Symbol oberhalb der Linie das zur Pfeilrichtung passende Teilchensymbol. Darauf muss bei schräg verlaufenden Linien besonders geachtet werden (siehe z. B. Paarerzeugung im Beispiel oben).
- Spieler*innen, die sich gegenüber sitzen, lesen einzelne Rhombinos und damit auch das komplette Spielfeld unterschiedlich. **Für die ersten Spiele** und bei wenigen Mitspieler*innen ist es daher einfacher, sich gemeinsam auf eine Seite des Spielfeldes zu setzen, um die Kommunikation zu erleichtern.

Spielvorbereitung

Mischt alle Rhombinos (Teilchen) und verteilt jeweils 5 an alle Mitspieler*innen. Diese werden für die anderen nicht sichtbar auf der Hand gehalten. Die restlichen Rhombinos bilden den verdeckten Nachziehstapel. Neben dem Nachziehstapel entsteht im Laufe des Spiels ein Ablagestapel (siehe Abschnitt „Die Vertex-Regeln“).

Deckt das oberste Rhombino des Nachziehstapels auf und legt es in die Tischmitte. Dieses ist das Start-Rhombino. Wessen Geburtstag am nächsten an dem von Richard Feynman (11. Mai) liegt, ist Startspieler*in.

Spielablauf

Wer an der Reihe ist, legt nun ein Rhombino am Spielfeld an. Die Linie auf dem Rhombino muss dabei an mindestens eine schon liegende Linie angefügt werden. Es sind nur Spielzüge erlaubt, bei denen die Regeln der Wechselwirkungen des Standardmodells der Teilchenphysik erfüllt sind. Dabei spielen die **Ruheenergien bzw. Massen** der Teilchen **keine Rolle**.

Rhombinos können sowohl links als auch rechts vom Start-Rhombino angelegt werden. Das Spielfeld kann sich dabei auch nach unten bzw. oben hin entwickeln.

Es besteht Anlegepflicht. Wer nicht anlegen kann, zieht ein Rhombino vom Nachziehstapel. Dieses darf in dieser Runde nicht mehr gelegt werden.

Nachdem ein Rhombino gelegt oder nachgezogen wurde, ist der bzw. die nächste Spieler*in im Uhrzeigersinn an der Reihe.

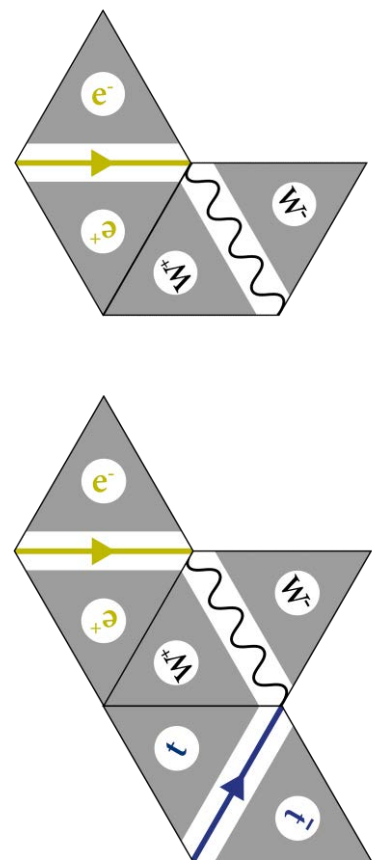
Beispiel

Linda wurde als Startspielerin bestimmt. Der Startstein ist ein Elektron.

Linda hält unter anderem ein Elektron-Neutrino, ein Photon und ein W^- -Teilchen auf der Hand. Alle drei Teilchen könnte sie gemäß den Regeln des Standardmodells sinnvoll anlegen. Sie entscheidet sich dafür, das W^- -Teilchen rechts so an das Elektron anzulegen, dass es die Abstrahlung eines W^- -Teilchens repräsentiert (siehe auch Hinweis unten)

Nun ist Andreas an der Reihe. Er weiß, dass sich ein Elektron bei der Abstrahlung eines W^- -Teilchens in ein Elektron-Neutrino umwandelt. Da er kein solches Rhombino auf der Hand hat, kann er die bisherigen Rhombinos nicht zu einem vollständigen Vertex (Zusammentreffen von 3 Linien) vervollständigen.

Er entscheidet sich dafür, sein Top-Quark von links an das W^- -Teilchen anzulegen, das die Absorption des W^- -Teilchens durch das Top-Quark.



Hinweis

Beim Legen von diagonalen Linien muss besonders auf die Orientierung geachtet werden. Da Elektronen nur W^- -Teilchen und keine W^+ -Teilchen abstrahlen können (dabei müsste nämlich ein doppelt negativ geladenes Elementarteilchen entstehen, was im Standardmodell nicht existiert), muss das Rhombino von Linda (Beispiel oben) so gelegt werden, dass sich das W^- -Symbol oberhalb der Linien befindet (siehe auch Abschnitt „Symbolik der Rhombinos“).

Die Vertex-Regeln

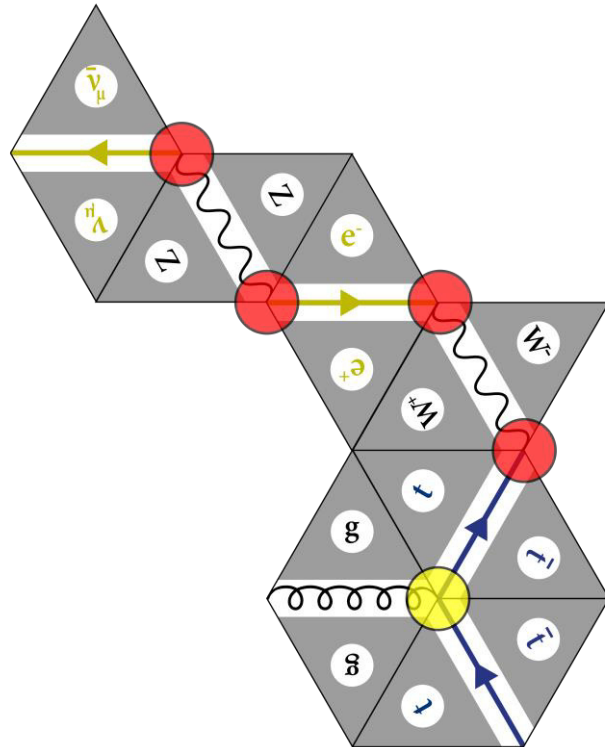
1. **Zu jedem Zeitpunkt dürfen maximal 4 unvollständige Vertices (siehe Beispiel) im Spiel sein.** Es darf also kein Rhombino gelegt werden, wenn dadurch ein fünfter unvollständiger Vertex entstehen würde
2. **Beim Vervollständigen eines Vertex darf zusätzlich ein beliebiges Rhombino aus der Hand auf den Ablagestapel gelegt werden.** Einen Vertex zu vervollständigen ist also in der Regel von Vorteil.

Beispiel

So wie rechts könnte das Spielfeld nach 4 weiteren Spielzügen aussehen.

Wir bezeichnen den Treffpunkt von 2 Linien als **unvollständigen Vertex**. Diese sind im Beispiel rot markiert. Ein Vertex mit 3 Linien, also ohne Lücke für ein weiteres Rhombino, heißt **vollständig**. Der einzige vollständige Vertex im Beispiel ist gelb markiert.

In diesem Beispiel darf nach Vertex-Regel 1 also nur ein Rhombino angelegt werden, wenn damit ein unvollständiger Vertex vervollständigt wird. Ist das nicht möglich, muss ein Rhombino vom Nachziehstapel gezogen werden.



Spielende und Wertung

1. Sobald ein*e Spieler*in **kein Rhombino mehr auf der Hand** hält, wird die laufende Runde zu Ende gespielt (der bzw. die Startspieler*in ist nicht erneut am Zug). Alle Spieler*innen, die am Ende der Runde keine Rhombinos mehr auf der Hand haben, sind gemeinsam die Gewinner*innen. Die übrigen Platzierungen können durch Punktezahlung (siehe unten) ermittelt werden
2. Das Spiel endet sofort, wenn das letzte Rhombino vom **Nachziehstapel** gezogen wurde. Der bzw. die Sieger*in wird durch Zählung der Punkte ermittelt.

Punktezahlung

Die Punktezahlung dient zur Ermittlung des Siegers bzw. der Siegerin in dem seltenen Fall, dass der Nachziehstapel aufgebraucht ist. Dabei gewinnt, wer die **wenigsten** Punkte hat.

Wenn mehrere Spiele gespielt werden, werden die Punktzahlen nach jedem Spiel notiert. Wer die meisten Punkte hat ist im nächsten Spiel Startspieler*in. Nach dem letzten Spiel gewinnt, wer insgesamt die **wenigsten** Punkte gesammelt hat.

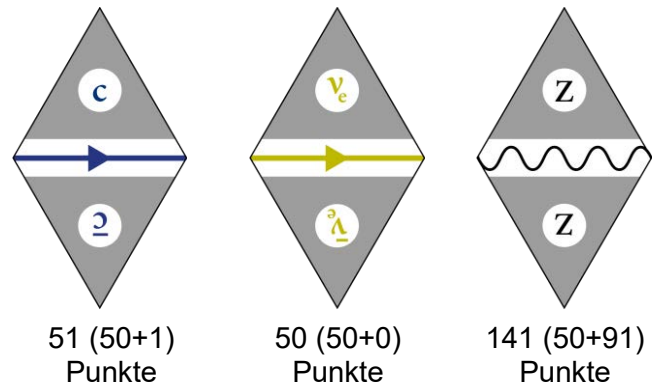
Für **jedes** Rhombino auf der Hand werden folgende Punkte vergeben:

- 50 Punkte
- Zuzüglich Punkte entsprechend der (gerundeten) Ruheenergie des Teilchens in GeV

Beispiel

Linda hält am Ende eines Spiels drei Rhombinos auf der Hand: ein Charm-Quark, ein Elektron-Neutrino sowie ein Z-Teilchen.

Dafür erhält sie 242 Punkte: 150 Punkte (3 mal 50), da es 3 Rhombinos sind und zusätzlich 92 Punkte für die Ruheenergien der Teilchen (1 Punkt für das Charm-Quark mit 1,2 GeV, 0 Punkte für das Elektronneutrino mit verschwindend kleiner Ruheenergie und 91 Punkte für das Z-Teilchen mit 91,2 GeV)



Unlösbare Situationen

Im Laufe des Spiels kann es zu Situationen kommen, in denen an bestimmten Stellen des Spielfeldes kein Rhombino eingefügt werden kann, welches die Regeln des Standardmodells erfüllt.

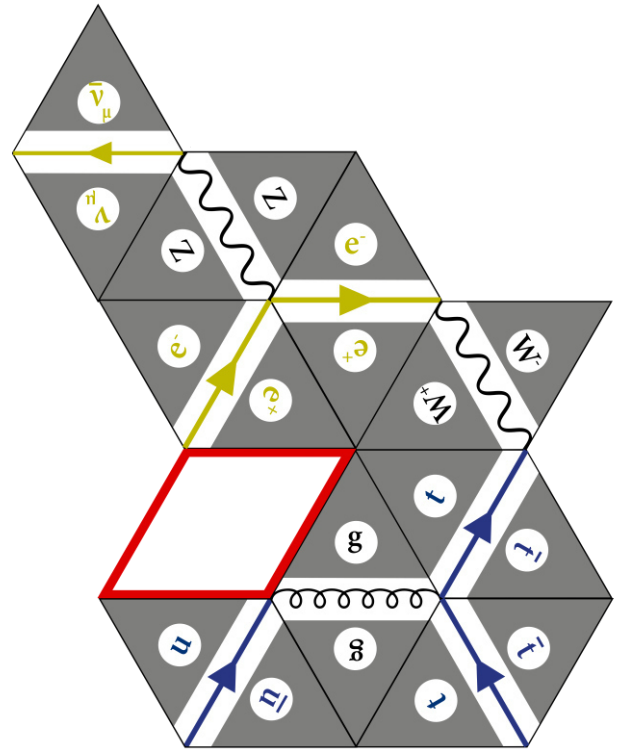
Identifiziert jemand während seines Zuges eine unlösbare Situation, darf er bzw. sie ein beliebiges Rhombino aus der Hand mit der Rückseite nach oben an die entsprechende Stelle legen. Vertices ohne offene Lücke (im Beispiel der Vertex mit Up-Quark und Gluon) gelten dann nicht mehr als unvollständig im Sinne der **Vertex-Regeln**. Es darf aber in diesem Fall **kein zusätzliches Rhombino** aus der Hand abgelegt werden, wie es beim regulären Vervollständigen eines Vertex der Fall ist.

Die Rückseite darf im weiteren Spiel als „**Joker**“ angesehen werden. An das Elektron oben kann also ein beliebiges Rhombino angelegt werden, was sich mit dem Elektron an einem gemeinsamen Vertex vorkommen kann. Beim Legen muss jedoch dazu gesagt werden, welches Teilchen sich nach den Regeln des Standardmodells an der Stelle des Jokers befinden müsste.

Beispiel

Ausgehend vom obigen Beispiel wurden nun zwei weitere Rhombinos (ein Up-Quark und ein Elektron) gelegt.

Die **rot markierte Stelle** kann durch kein Rhombino regelkonform gefüllt werden. Da Quarks die einzigen Materieteilchen mit Farbladung sind (also der starken Wechselwirkung unterliegen) und daher an einem Vertex mit einem Gluon lediglich Quarks vorkommen können, müsste an die markierte Stelle ein Quark-Rhombino gelegt werden (in diesem Beispiel ein Anti-Up-Quark). Allerdings gibt es keinen erlaubten Vertex, an dem sich Quarks gemeinsam mit Leptonen (hier einem Elektron an der Oberseite der roten Markierung) befinden, was leicht anhand der Ladungserhaltungssätze nachgeprüft werden kann.



Hinweis

Mit genügend Erfahrung und Weitblick ist es auch möglich, zu einem früheren Zeitpunkt oder sogar bei zwei noch fehlenden Rhombinos zu erkennen, dass die Situation nicht regelgerecht lösbar ist. In letzterem Fall können 2 Rhombinos aus der Hand mit der Rückseite nach oben an den entsprechenden Stellen abgelegt werden. Solche Fälle sollten allerdings umfassend gemeinsam überprüft werden. In den ersten Spielen bzw. bei unerfahrenen Mitspieler*innen sollte auf diese Möglichkeit verzichtet werden.

Falsches Legen

Beim Legen der Rhombinos müssen die Wechselwirkungsregeln des Standardmodells beachtet werden. Wird ein Rhombino gelegt, das diesen Regeln widerspricht, können die anderen Spieler*innen sofort durch Sagen des Wortes FEYNMAN widersprechen. Danach wird gemeinsam geprüft, ob das Rhombino tatsächlich nicht gelegt werden darf. Danach wird wie folgt verfahren:

a) Das Rhombino widerspricht den Regeln

Wer zuerst FEYNMAN gesagt hat, darf ein beliebiges Rhombino von der Hand auf den Ablagestapel legen. Es ist auch möglich, dadurch das Spiel zu gewinnen. Die Person, die das fehlerhafte Rhombino gelegt hat, nimmt es **zurück auf die Hand und zieht außerdem ein Rhombino vom Nachziehstapel**. Es darf in diesem Zug kein weiteres Rhombino gelegt werden. Anschließend geht es normal im Uhrzeigersinn weiter.

b) Das Rhombino entspricht den Regeln

Das Rhombino bleibt auf dem Spielfeld liegen. Alle Spieler*innen, die FEYNMAN gesagt haben, ziehen ein Rhombino vom Nachziehstapel. Danach wird das Spiel normal fortgesetzt.

Sollte ein falsch gelegtes Rhombino **erst im späteren Verlauf des Spieles erkannt** werden, so wird es nach der Überprüfung vom Spielfeld genommen und auf den Ablagestapel gelegt. Wer den Fehler erkannt hat, darf ein Rhombino aus der Hand auf den Ablagestapel legen. Es muss kein Straf-Rhombino gezogen werden.

Liegt schon an beiden Ende der Teilchenlinie des fehlerhaften Rhombinos ein weiteres Rhombino an, so bleibt das fehlerhafte Rhombino im Spiel und wird stattdessen umgedreht, sodass die Rückseite nach oben zeigt (siehe Abschnitt „Unlösbare Situationen“).

Hinweise

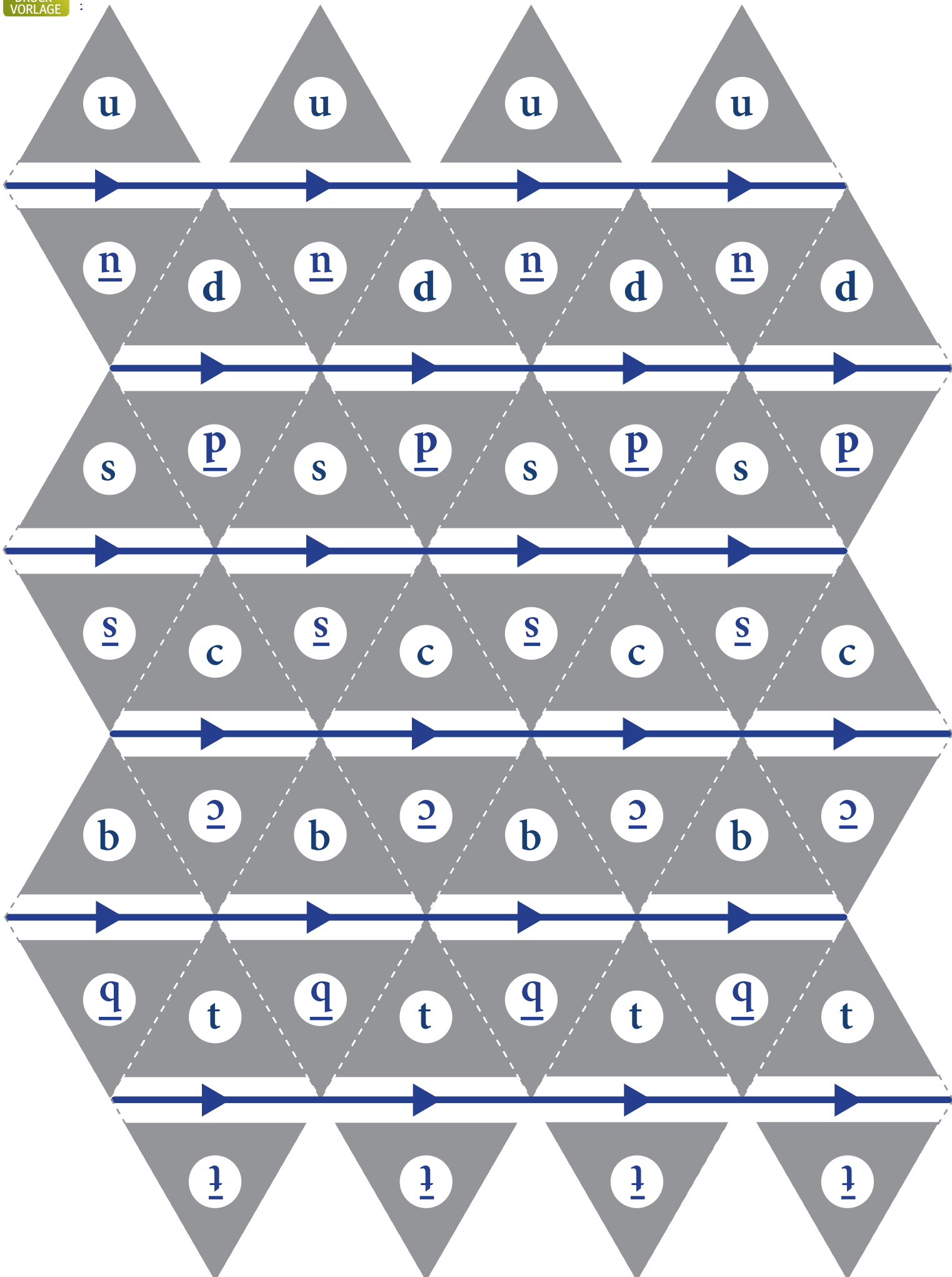
- Auf das Ziehen von Rhombinos bei falschem Anlegen kann **in den ersten Spielen**, bzw. wenn unerfahrene Personen mitspielen, verzichtet werden. Stattdessen muss das Rhombino zurück auf die Hand genommen werden und der Zug ist damit beendet.
- Manchmal ist nicht sofort einfach zu erkennen, dass ein Rhombino den Regeln widerspricht. Es kann zum Beispiel nur erkannt werden, dass ein Elektron kein W^+ -Teilchen abstrahlen kann (siehe Beispiel im Abschnitt „Spielablauf“), wenn man bedenkt, in welches Teilchen es sich dabei umwandeln müsste.

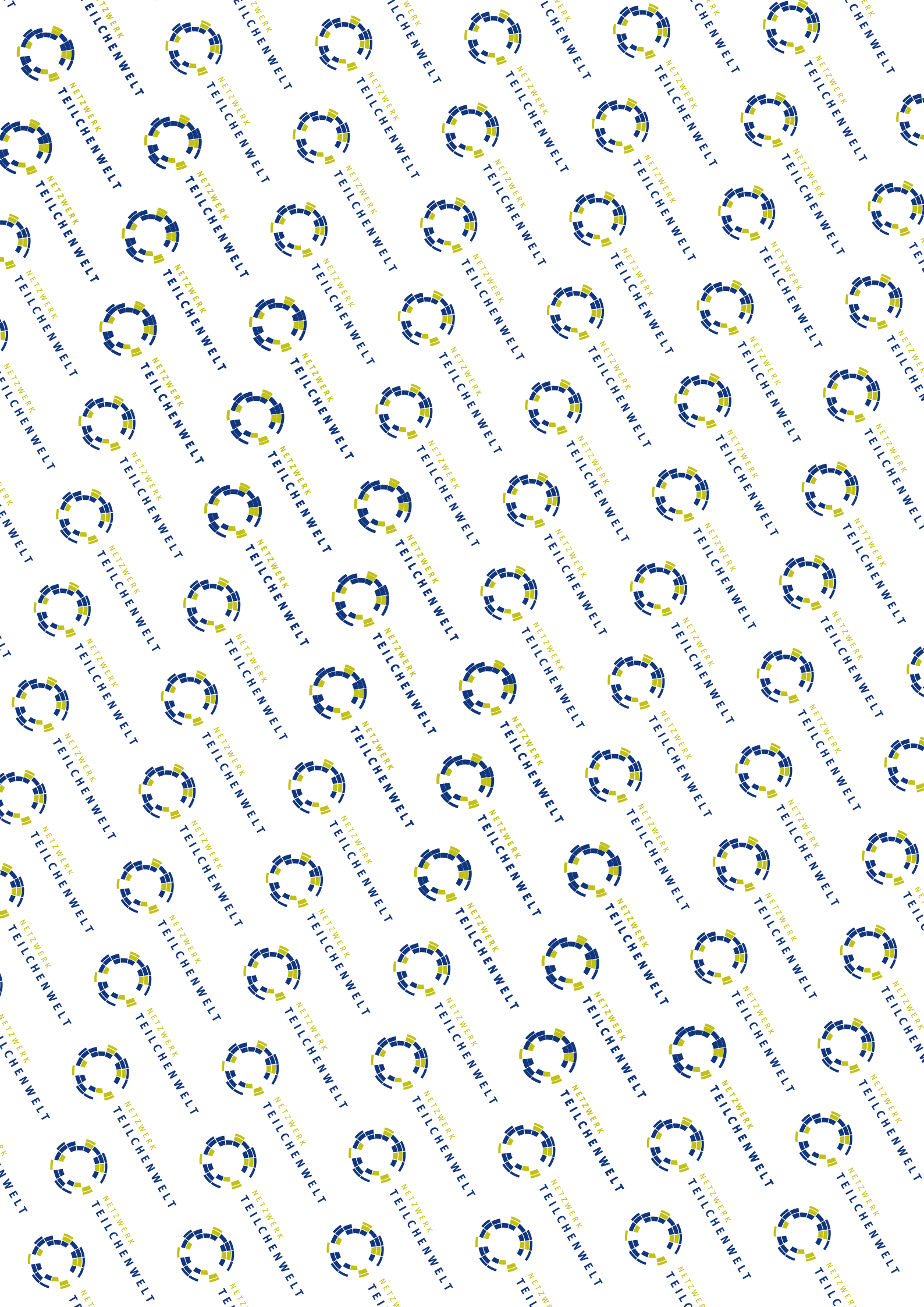
Spielmaterial

1. Rhombinos zum Ausschneiden

Die Druckvorlage ist für einen doppelseitigen Ausdruck ausgelegt. Es bietet sich ein Druck auf etwas dickerem Papier an. Die Rhombinos müssen anschließend an den gestrichelten Linien ausgeschnitten werden.

Alternativ kann die Variante mit farbiger Kennzeichnung der Teilchengenerationen (Spielmaterial 4) verwendet werden.





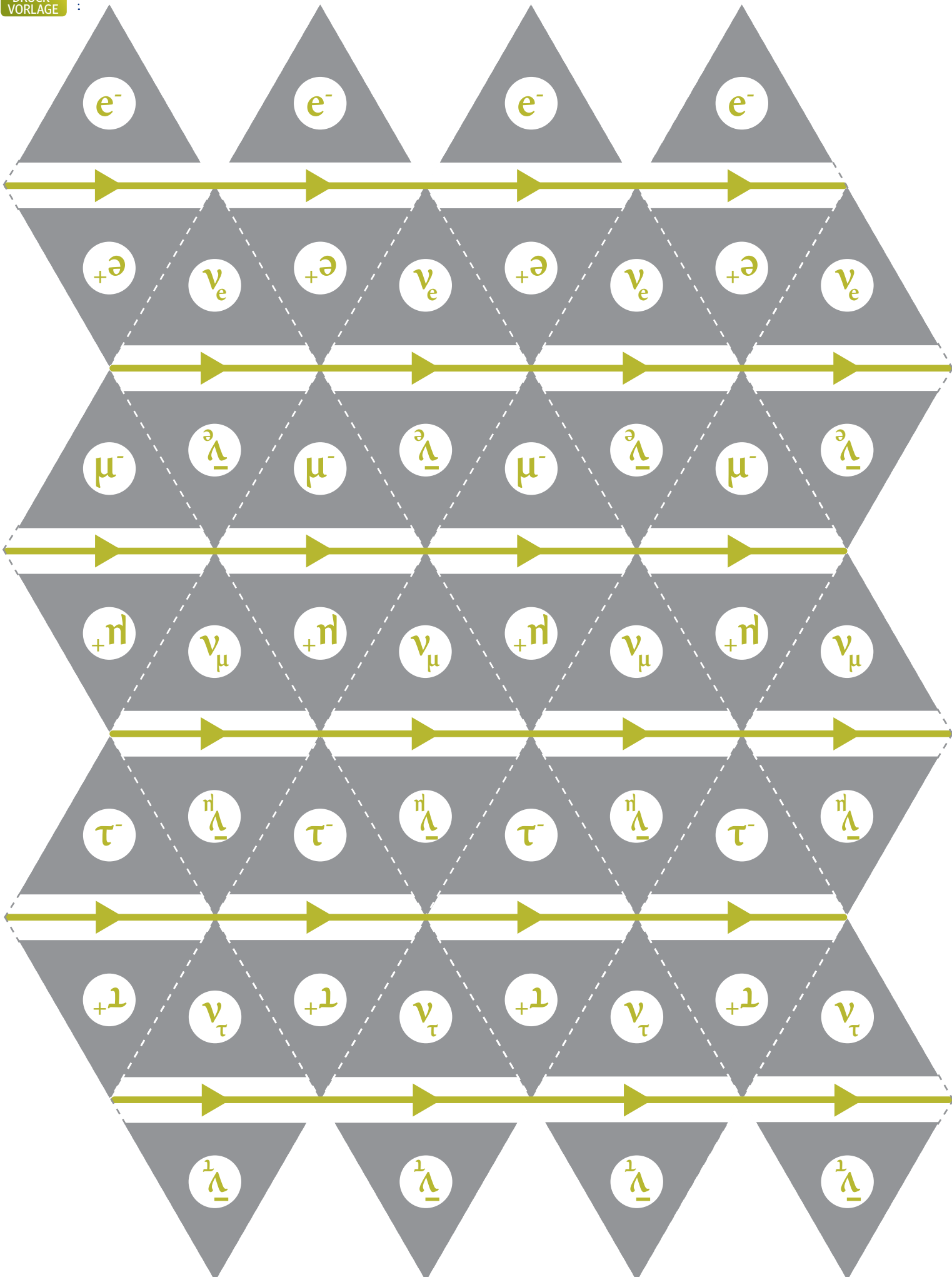


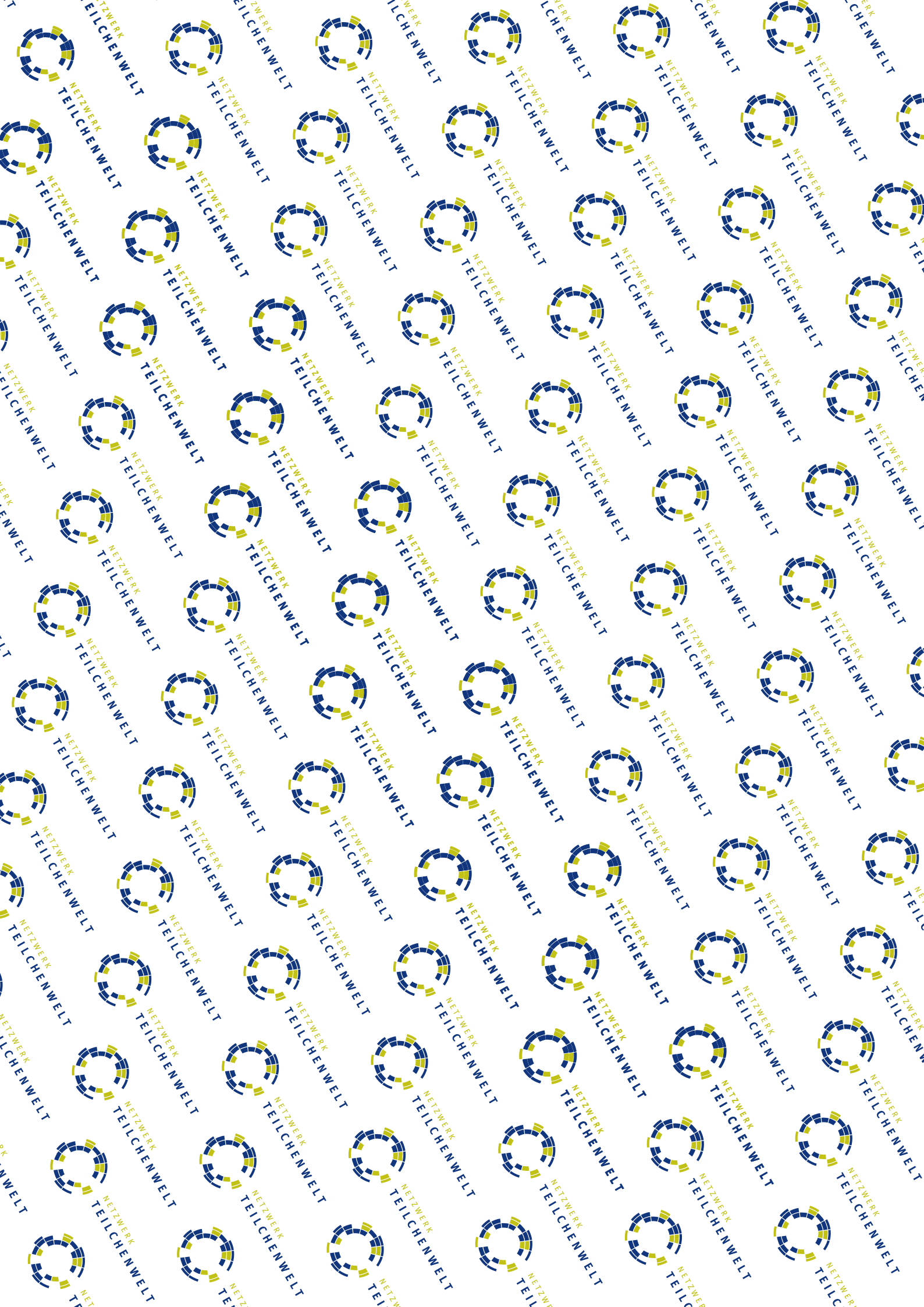
DRUCK-
VORLAGE

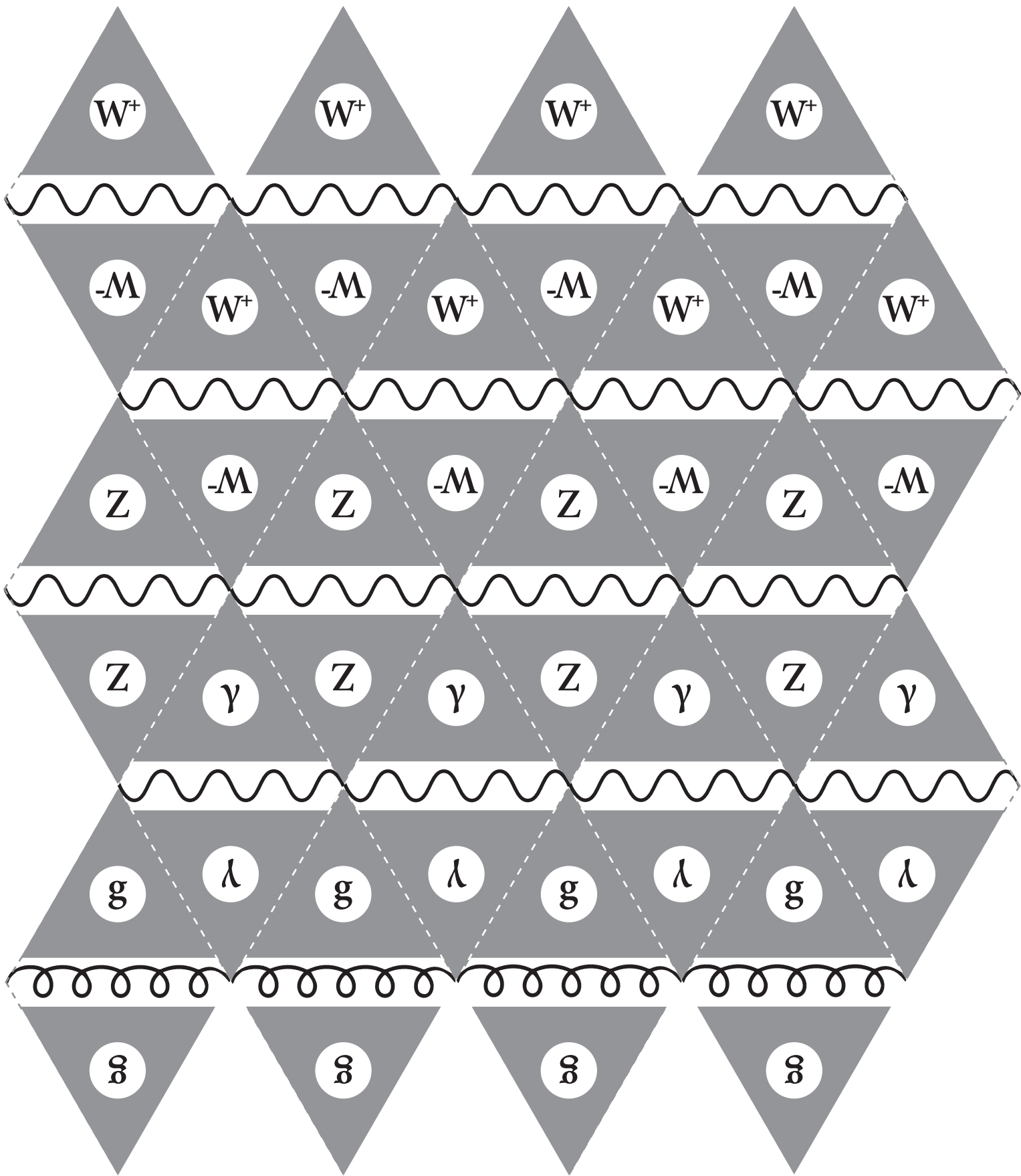
FEYNMAN-RHOMBINO

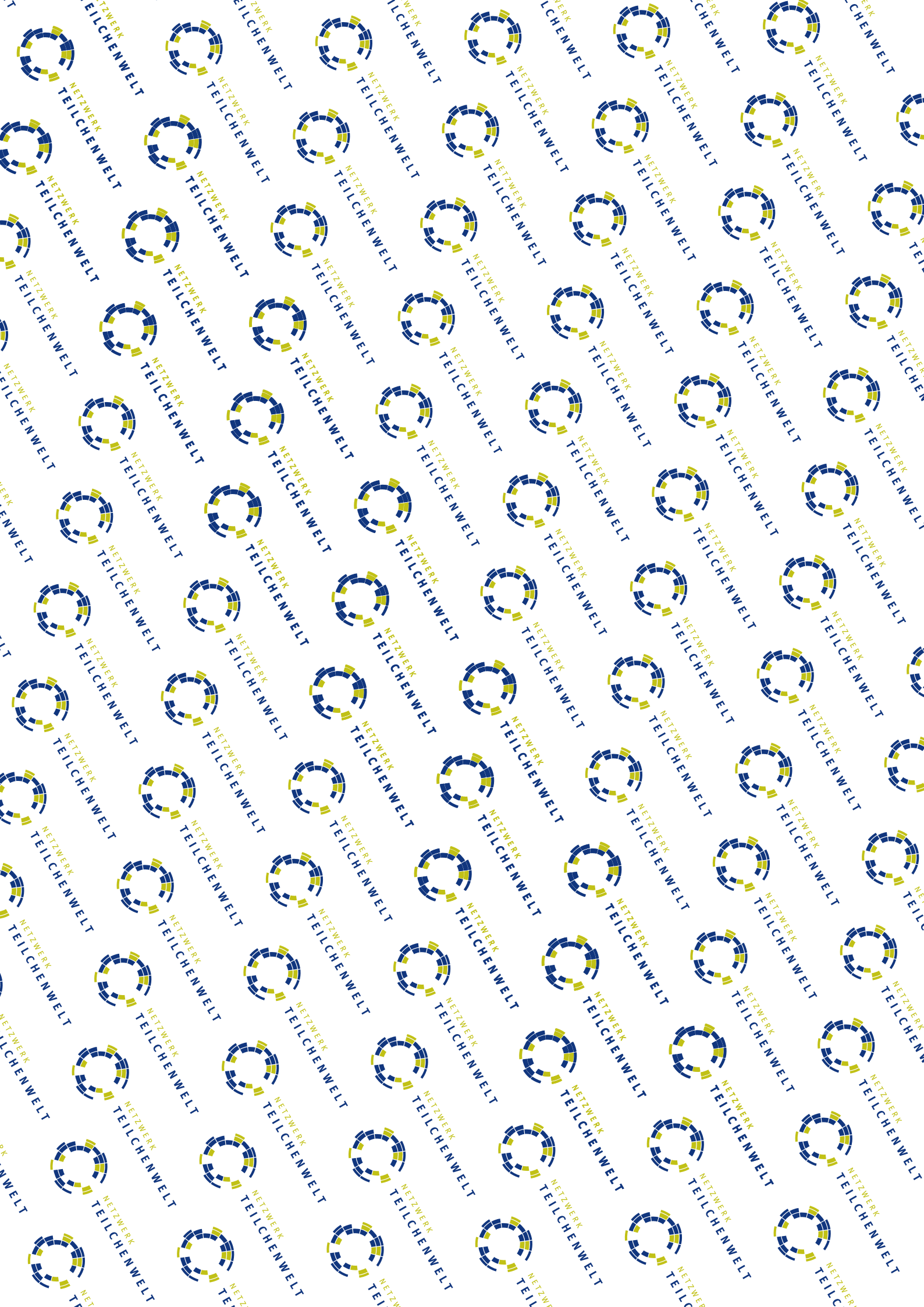


NETZWERK
TEILCHENWELT









2. Übersicht wichtiger Teilcheneigenschaften

Diese Übersicht kann einmal oder auch für jede*n Mitspieler*in ausgedruckt werden und dient als Hilfestellung, um erlaubte Spielzüge zu finden. Anhand der Teilcheneigenschaften kann auch gut überprüft werden, ob ein gelegtes Rhombino die Regeln des Standardmodells erfüllt.

ÜBERSICHT WICHTIGER TEILCHENEIGENSCHAFTEN

MATERIETEILCHEN

Name	Symbol	Schwache Ladungszahl I	Elektrische Ladungszahl Z	Farbladung	Ruheenergie in GeV	Teilchengeneration
Up-Quark Nachweis 1969	u	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	vorhanden	~0,002	1. Generation
Down-Quark Nachweis 1969	d	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	vorhanden	~0,005	1. Generation
Charm-Quark Nachweis 1974	c	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	vorhanden	~1,3	2. Generation
Strange-Quark Nachweis 1969	s	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	vorhanden	~0,1	2. Generation
Top-Quark Nachweis 1995	t	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	vorhanden	~173	3. Generation
Bottom-Quark Nachweis 1977	b	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	vorhanden	~4,2	3. Generation
Elektron-Neutrino Nachweis 1956	ν_e	$+\frac{1}{2}$	0	keine	<0,000 000 000 1	1. Generation
Elektron Nachweis 1897	e^-	$-\frac{1}{2}$	-1	keine	0,000 511	1. Generation
Myon-Neutrino Nachweis 1962	ν_μ	$+\frac{1}{2}$	0	keine	<0,000 000 000 1	2. Generation
Myon Nachweis 1937	μ^-	$-\frac{1}{2}$	-1	keine	0,106	2. Generation
Tau-Neutrino Nachweis 2000	ν_τ	$+\frac{1}{2}$	0	keine	<0,000 000 000 1	3. Generation
Tauon Nachweis 1975	τ^-	$-\frac{1}{2}$	-1	keine	1,777	3. Generation

ANTI-MATERIETEILCHEN

Name	Symbol	Schwache Ladungszahl I	Elektrische Ladungszahl Z	Farbladung	Ruheenergie in GeV	Teilchengeneration
Anti-Up-Quark Nachweis 1969	\bar{u}	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}$	vorhanden	~0,002	1. Generation
Anti-Down-Quark Nachweis 1969	\bar{d}	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$	vorhanden	~0,005	1. Generation
Anti-Charm-Quark Nachweis 1974	\bar{c}	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}$	vorhanden	~1,3	2. Generation
Anti-Strange-Quark Nachweis 1969	\bar{s}	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$	vorhanden	~0,1	2. Generation
Anti-Top-Quark Nachweis 1995	\bar{t}	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}$	vorhanden	~173	3. Generation
Anti-Bottom-Quark Nachweis 1977	\bar{b}	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$	vorhanden	~4,2	3. Generation
Anti-Elektron-Neutrino Nachweis 1956	$\bar{\nu}_e$	$-\frac{1}{2}$	0	keine	<0,000 000 000 1	1. Generation
Positron Nachweis 1932	e^+	$+\frac{1}{2}$	+1	keine	0,000 511	1. Generation
Anti-Myon-Neutrino Nachweis 1962	$\bar{\nu}_\mu$	$-\frac{1}{2}$	0	keine	<0,000 000 000 1	2. Generation
Anti-Myon Nachweis 1937	μ^+	$+\frac{1}{2}$	+1	keine	0,106	2. Generation
Anti-Tau-Neutrino Nachweis 2000	$\bar{\nu}_\tau$	$-\frac{1}{2}$	0	keine	<0,000 000 000 1	3. Generation
Anti-Tauon Nachweis 1975	τ^+	$+\frac{1}{2}$	+1	keine	1,777	3. Generation

ÜBERSICHT WICHTIGER TEILCHENEIGENSCHAFTEN

BOTENTEILCHEN

ELEKTROMAGNETISCHE WECHSELWIRKUNG

Name	Symbol	Schwache Ladungszahl I	Elektrische Ladungszahl Z	Farbladung	Ruheenergie in GeV
Photon Nachweis 1905	γ	0	0	keine	0

SCHWACHE WECHSELWIRKUNG

Name	Symbol	Schwache Ladungszahl I	Elektrische Ladungszahl Z	Farbladung	Ruheenergie in GeV
W⁺-Teilchen Nachweis 1983	W⁺	+1	+1	keine	~80,4
W⁻-Teilchen Nachweis 1983	W⁻	-1	-1	keine	~80,4
Z-Teilchen Nachweis 1983	Z	0	0	keine	~91,2

STARKE WECHSELWIRKUNG

Name	Symbol	Schwache Ladungszahl I	Elektrische Ladungszahl Z	Farbladung	Ruheenergie in GeV
Gluon Nachweis 1979	g	0	0	vorhanden	0

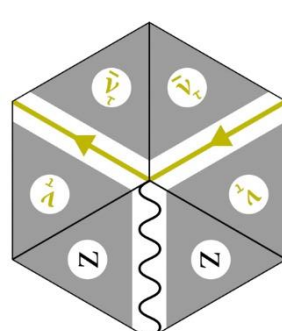
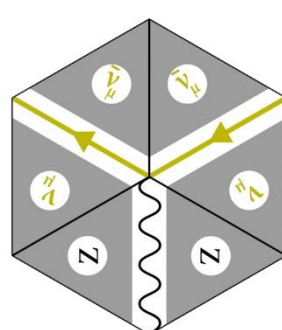
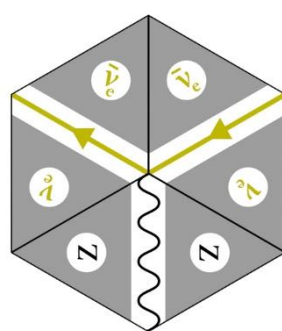
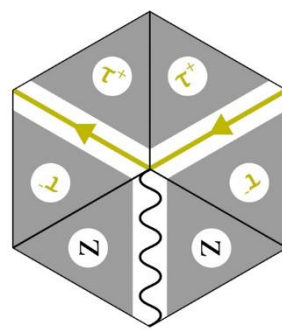
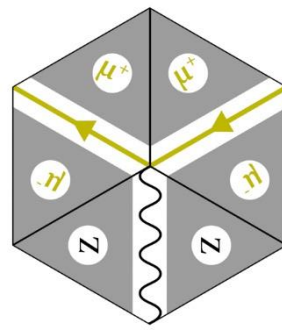
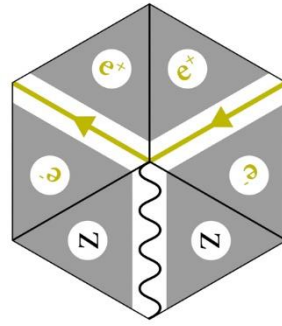
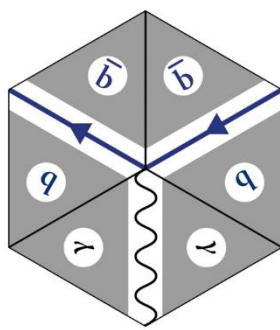
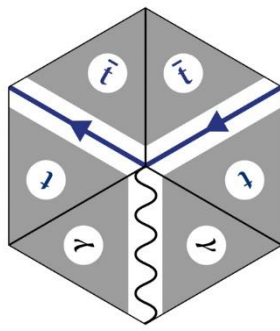
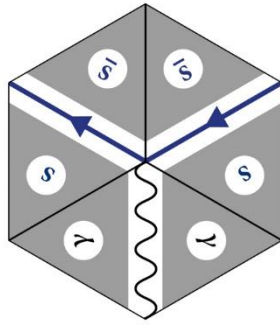
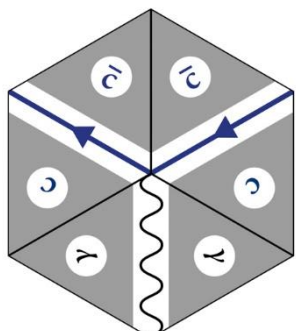
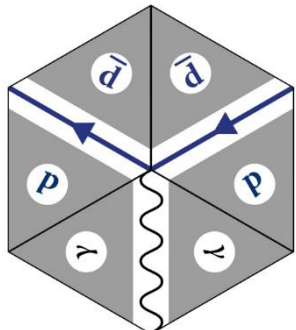
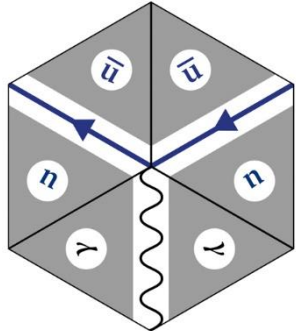
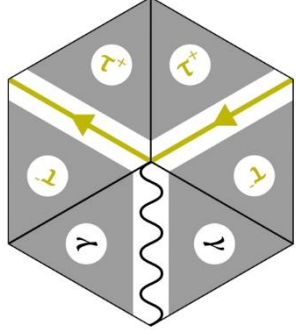
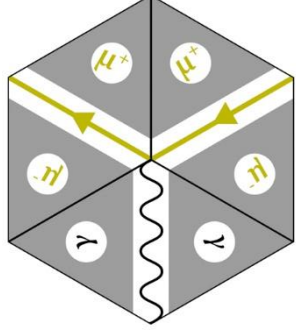
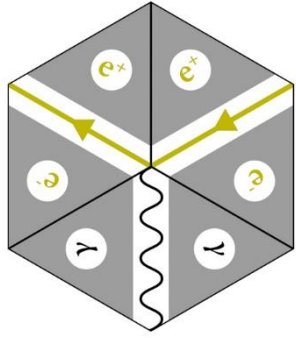
3. Übersicht aller erlaubten Vertices

Diese Übersicht kann einmal doppelseitig ausgedruckt und verwendet werden, um zu überprüfen, ob ein gelegtes Rhombino zu einem erlaubten Vertex des Standardmodells passt, wenn sich die Mitspieler*innen nicht einig sind. Prinzipiell sollte aber erst versucht werden, die Korrektheit des Spielzuges anhand der bekannten Regeln des Standardmodells und mit Hilfe der „Übersicht wichtiger Teilcheneigenschaften“ selbst nachzuprüfen und zu diskutieren.

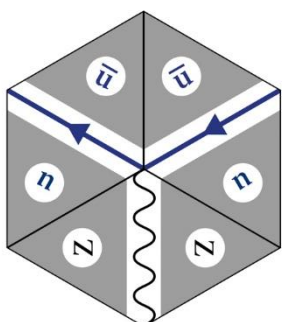
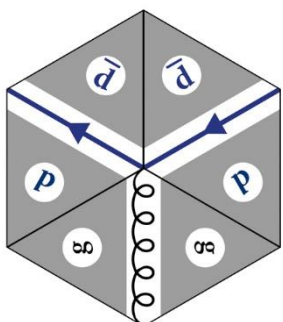
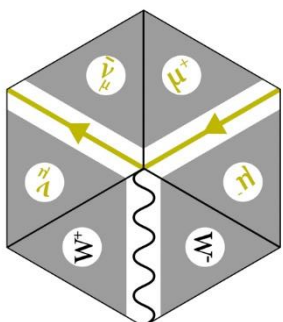
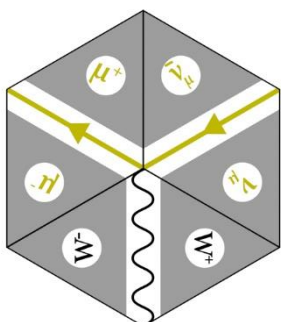
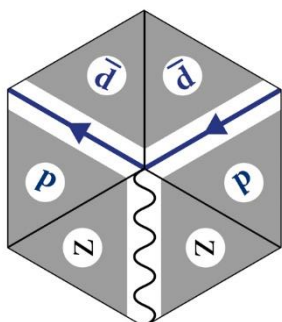
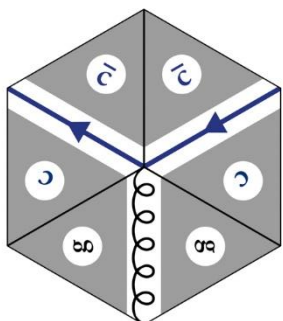
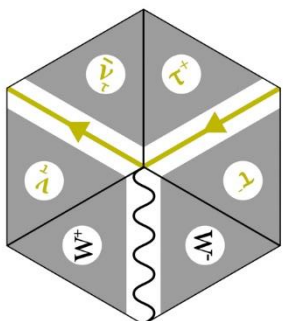
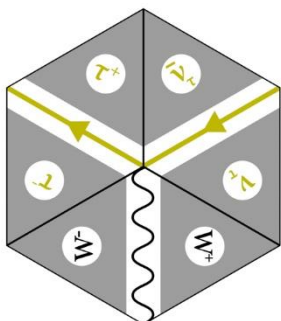
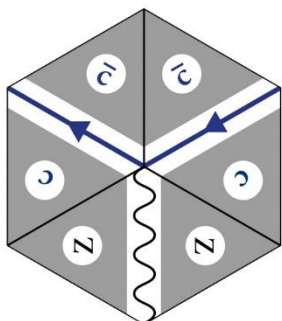
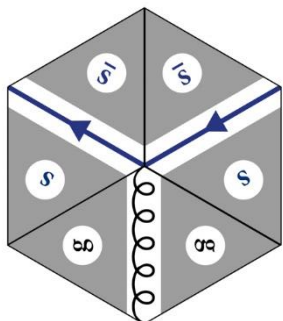
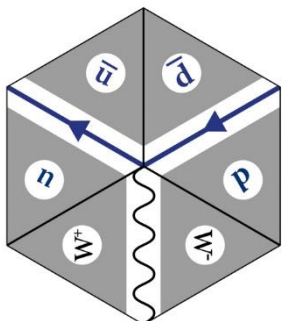
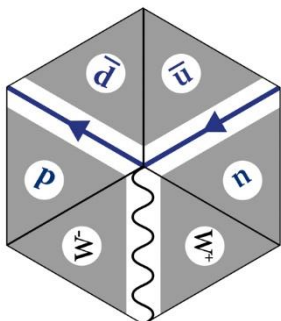
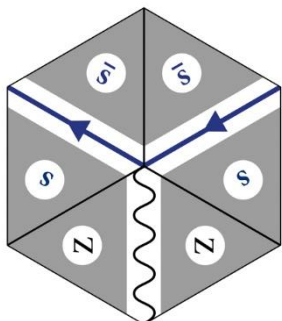
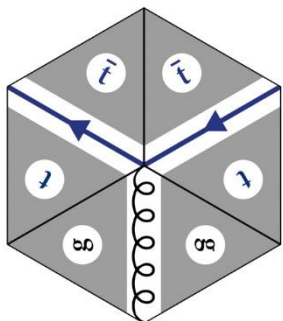
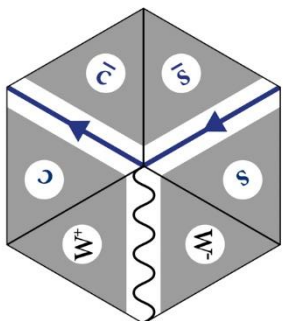
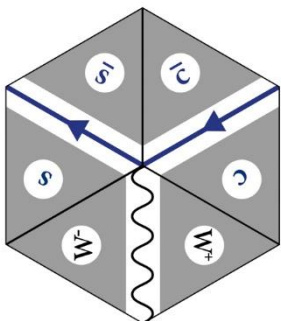
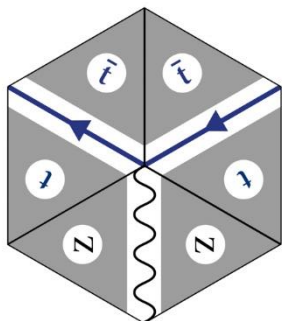
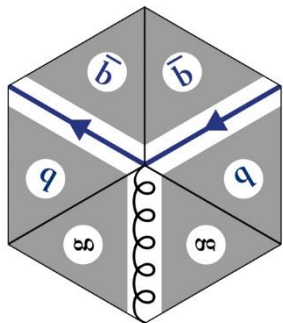
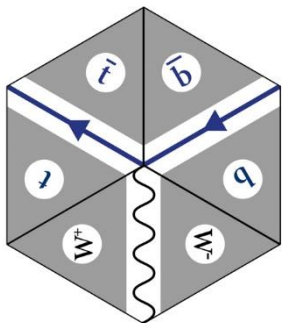
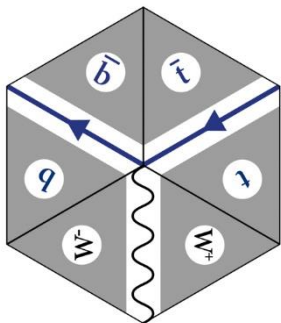
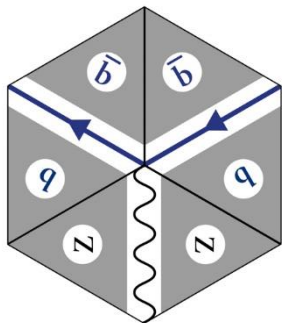
Übersicht aller erlaubten Vertices

Auf diesem Blatt sind alle erlaubten Vertices der Paarzeugung geordnet nach beteiligten Botenteilchen abgedruckt. Durch Drehen der Vertices bzw. des Blattes erhält man außerdem alle erlaubten Vertices der Botenteilchen-Emission, -Absorption sowie der Paarvernichtung.

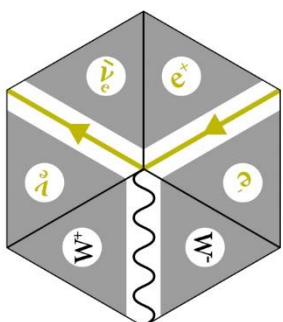
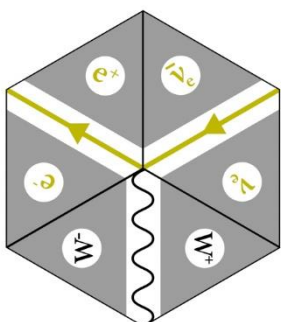
Vertices mit Photonen



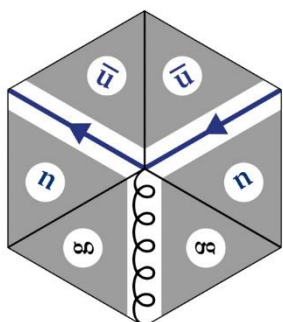
Vertices mit Z-Teilchen



Vertices mit W-Teilchen



Vertices mit Gluonen

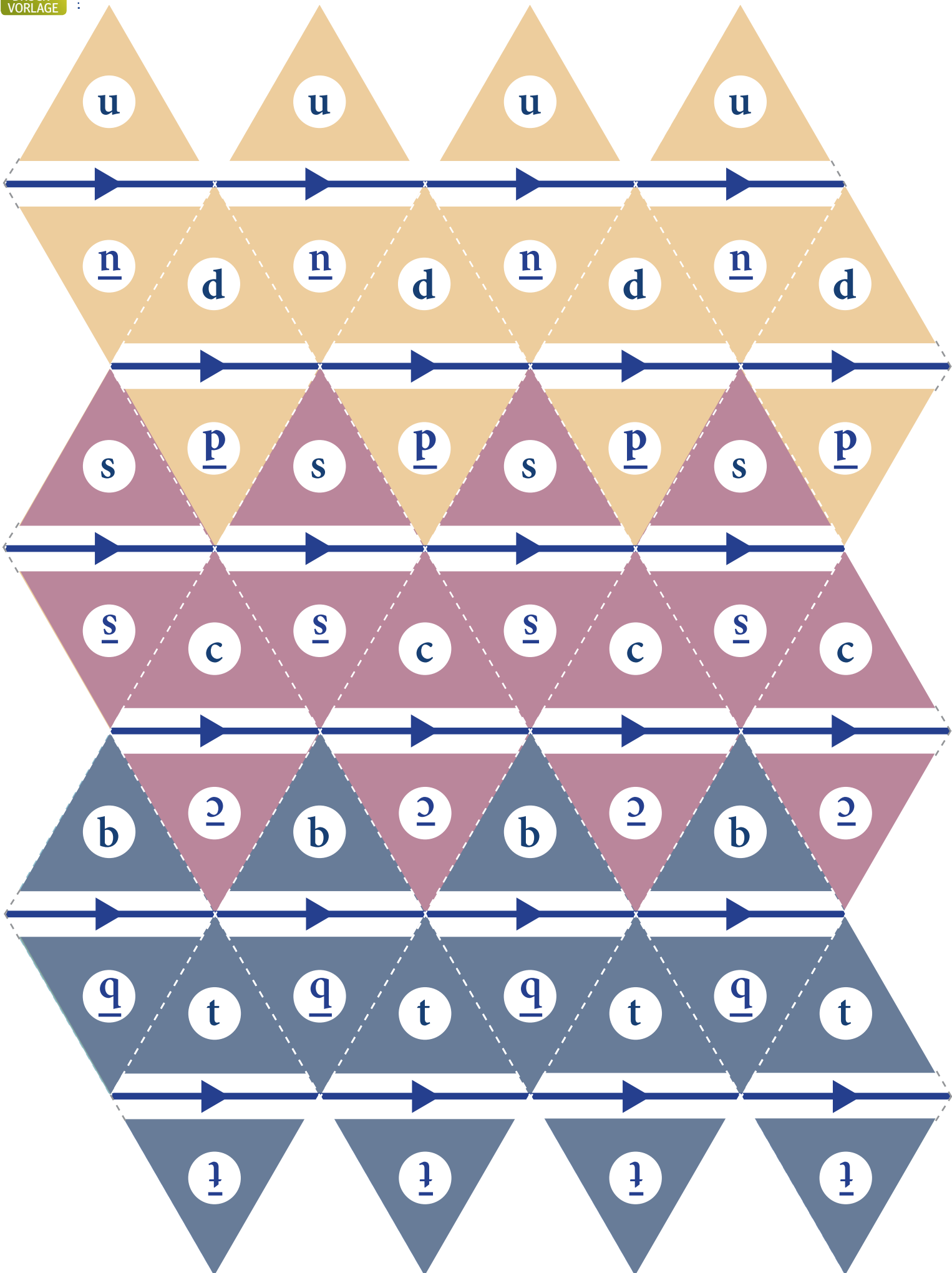


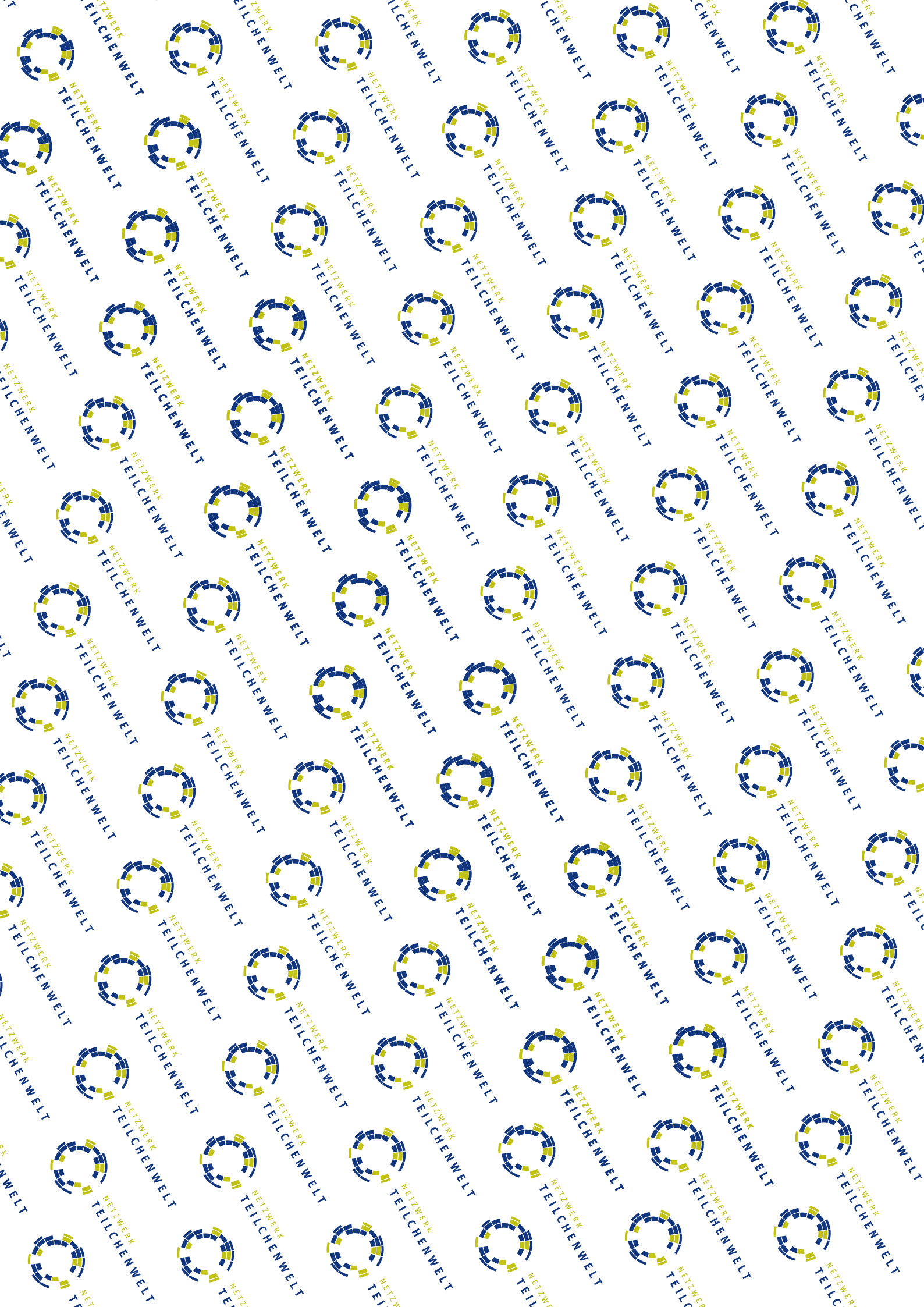
4. Farbige Variante der Rhombinos zum Ausschneiden

In dieser Variante ist die Generation der Materieteilchen durch die Farbgebung der Rhombinos visualisiert. Die Rhombinos der Botenteilchen sind weiterhin grau.

Die Druckvorlage ist für einen doppelseitigen Ausdruck ausgelegt. Es bietet sich ein Druck auf etwas dickerem Papier an. Die Rhombinos müssen anschließend an den gestrichelten Linien ausgeschnitten werden.

Achtung: Es wird **entweder** mit diesen Rhombinos **oder** mit denen aus Spielmaterial 1 gespielt.





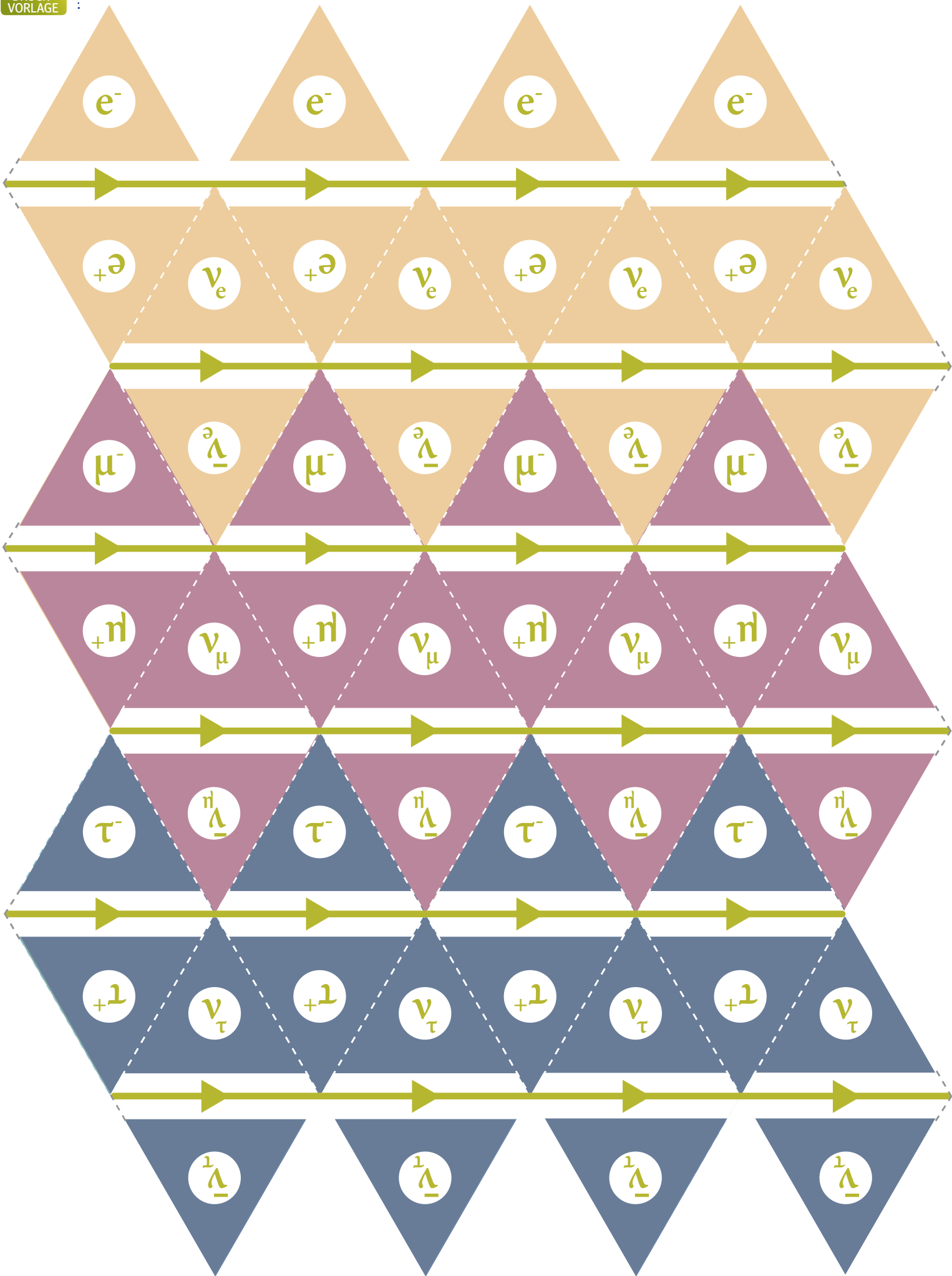


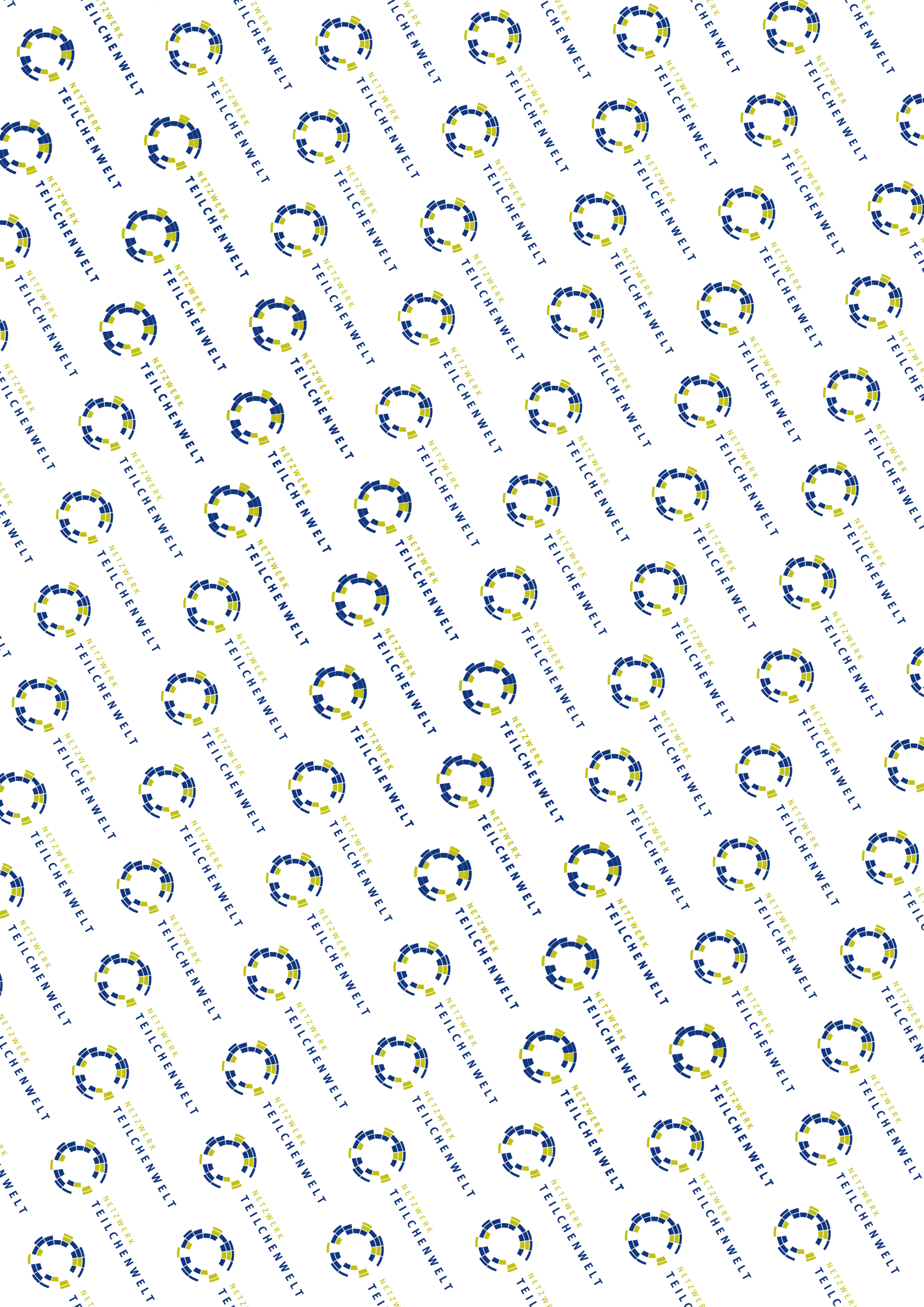
DRUCK-
VORLAGE

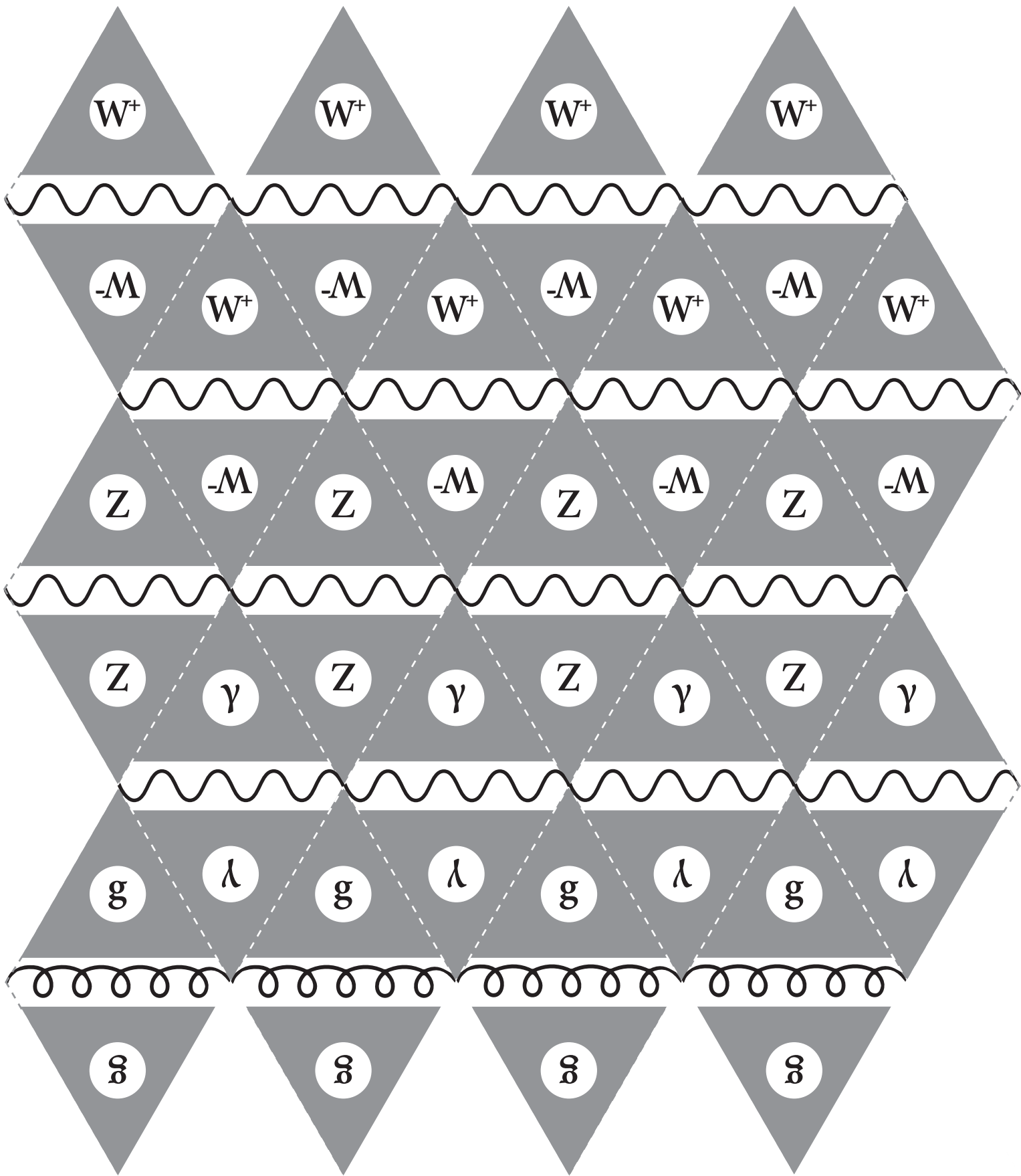
FEYNMAN-RHOMBINO

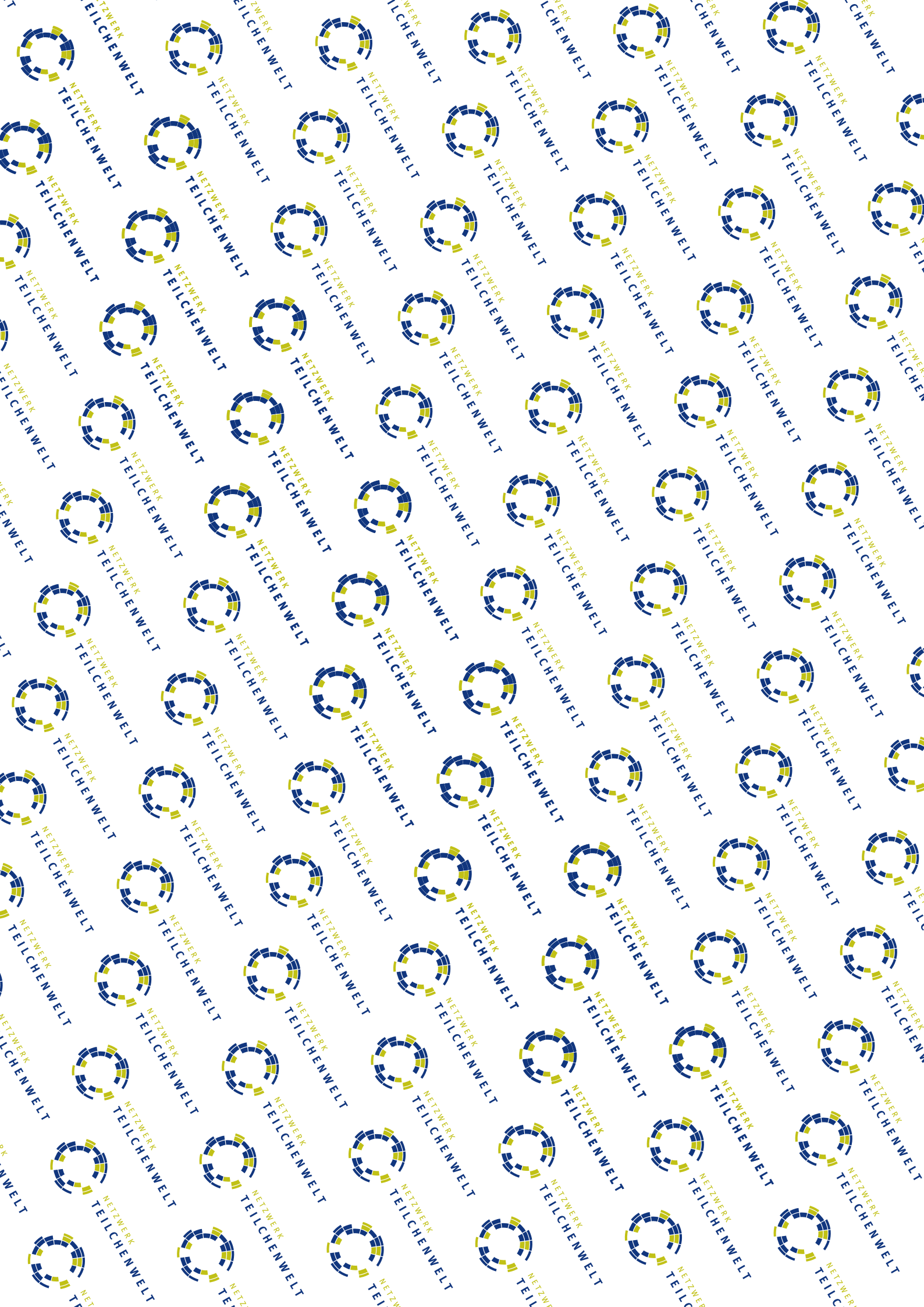


NETZWERK
TEILCHENWELT









Hinweise für Lehrkräfte

Einbettung in den Unterricht

Feynman-Rhombino ist ein dominoartiges und kompetitives Spiel, mit dem die Grundregeln der fundamentalen Wechselwirkungen des Standardmodells der Teilchenphysik sowie die Symbolik von Feynman-Diagrammen spielerisch gefestigt werden können.

Zielgruppe

Die primäre Zielgruppe sind Lernende der Sekundarstufe II. Sofern das benötigte Vorwissen bereits früher sichergestellt ist, kann Feynman-Rhombino natürlich auch eher eingesetzt werden. Die Komplexität der Spielmechaniken selbst ist auch für etwas jüngere Lernende angemessen.

Benötigtes Vorwissen

Feynman-Rhombino ist hauptsächlich zur Festigung von Kenntnissen zum Botenteilchen-Modell und Feynman-Diagrammen gedacht. Damit Feynman-Rhombino wie vorgesehen gespielt werden kann, ist daher ein solides Vorwissen zu den folgenden Punkten nötig:

- Materie- und Botenteilchen des Standardmodells der Teilchenphysik
- Elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung und deren Ladungen mit zugehörigen Erhaltungssätzen (die starken Ladungen bzw. Farbladungen der Quarks und Gluonen müssen nicht explizit bekannt sein, da diese in Feynman-Rhombino nicht auftauchen)
- Symbolik von Feynman-Diagrammen, insbesondere Bedeutung der Pfeilrichtung
- Fundamentale Prozesse und deren Vertices (Emission und Absorption von Botenteilchen sowie Paarerzeugung und Paarvernichtung)

Lernziele

Die Schülerinnen und Schüler:

- festigen ihre Kenntnisse zur Symbolik von Feynman-Diagrammen und den fundamentalen Vertices.
- wenden Erhaltungssätze für schwache und elektrische Ladung an, um erlaubte und verbotene Wechselwirkungen zu identifizieren.
- entwickeln ein Gefühl für den stochastischen Charakter der Elementarteilchenphysik.

Spieldauer und erstes Spiel

Bei der empfohlenen Spielerzahl von 3-5 Spieler*innen ist eine Dauer von etwa **10-20 Minuten** zu erwarten.

Die Dauer eines Spiels hängt dabei maßgeblich vom teilchenphysikalischen Vorwissen der Spieler*innen ab. Bei geringerem Vorwissen wird mehr Bedenkzeit sowie Zeit zum Prüfen von Spielzügen benötigt. Außerdem muss beim ersten Spiel Zeit für die Verinnerlichung der Regeln und der Symbolik von Feynman-Rhombino eingeplant werden. Bei eher unerfahrenen Spieler*innen sollten für das erste Spiel mindestens 20 Minuten zuzüglich des Lesens der Spielanleitung eingeplant werden. Weiterhin steigt die Spieldauer mit steigender Spielerzahl. Für das erste Spiel (oder die ersten Spiele) kann es hilfreich sein, besonders interessierte bzw. erfahrenere Spieler*innen als **Spielleiter bzw. Schiedsrichterin** zu bestimmen. Diese spielen

im ersten Spiel nicht mit, sondern helfen bei Regelfragen oder beim Prüfen der Spielzüge. Das setzt natürlich ein vorheriges gründliches Studium der Spielanleitung durch diese Personen voraus.

Es bietet sich gerade in der ersten Runde an, dass sich alle Mitspielenden auf einer **Seite des Spielfeldes** befinden, da so die Kommunikation über die gelegten Spielsteine erleichtert wird (siehe Spielanleitung: „Symbolik der Rhombinos“).

Außerdem kann es gerade beim ersten Spielen nützlich sein, Feynman-Rhombino als **kooperative und offene Variante** zu spielen (siehe unten).

Didaktische und methodische Hinweise

Farbladung

Beim Design der Rhombinos wurde auf Festlegung der Farbladung der Quarks (und Gluonen) verzichtet, da es ansonsten zu viele Quark- und Gluon-Rhombinos geben müsste und die erlaubten Legemöglichkeiten extrem eingeschränkt wären. Die Überprüfung von Farbladungserhaltung ist daher nicht explizit möglich. Dies erlaubt es aber zugleich, dass das Spiel gespielt werden kann, ohne dass die möglichen Farbladungen von Quarks und Gluonen im Vorfeld ausführlich thematisiert wurden. Dennoch sollte auf diese Vereinfachung hingewiesen werden, damit das Regelwerk des Standardmodells an dieser Stelle nicht inkonsistent erscheint.

Interpretation der Liniengeometrie

Die Assoziation der Linien mit Teilchenbahnen bzw. die Zuordnung von Impulsen anhand der Liniengeometrie in Feynman-Diagrammen stellen erfahrungsgemäß häufige Fehlinterpretationen der Diagramme dar. Bei Feynman-Rhombino sind, unabhängig davon, welche Teilchenlinien an einem Vertex vorliegen, die Winkel sowie die Längen der Linien durch die Form der Rhombinos festgelegt und immer gleich. Entsprechende Interpretationen werden daher nicht unnötig suggeriert und können außerdem reflektiert werden, da die Lernenden keine Möglichkeit haben, derartige Informationen beim Spielen zu kodieren.

Stochastischer Charakter der Teilchenphysik

Im Laufe des Spiels und insbesondere nach mehreren Spielen kann ersichtlich werden, dass sich das Spielfeld, ausgehend von einer bestimmten Konfiguration, in der Regel sehr unterschiedlich entwickelt. Bei größeren Lerngruppen können die entstehenden Spielfelder bei vorgegebenem Start-Rhombino bzw. Start-Rhombinos (standardmäßig wird das Start-Rhombino zufällig bestimmt) verglichen werden, um diesen Aspekt deutlich zu machen. Dabei kann der Bezug zur Datenauswertung bei teilchenphysikalischen Experimenten oder den Ummwandlungsmöglichkeiten instabiler Teilchen hergestellt werden, die ebenfalls im Allgemeinen nicht eindeutig sind.

Rhombinos mit farbig markierter Teilchengeneration

In den Spielmaterialien steht eine Variante der Rhombinos als Druckvorlage zur Verfügung, bei der die Spielsteine der Materieteilchen gemäß deren Teilchengeneration farbig gekennzeichnet sind. Da an einem Vertex lediglich Materieteilchen bzw. Anti-Teilchen der gleichen Teilchengeneration vorkommen, erleichtert dies die Identifikation gültiger Vertices. Diese Regel ergibt sich theoretisch aus den sogenannten Teilchen-Multipletts, die beschreiben,

welche Teilchen sich durch die fundamentalen Wechselwirkungen ineinander umwandeln können. In der Fachliteratur findet man in Feynman-Diagrammen teilweise auch generationsübergreifende Vertices. Dabei sind quantenmechanische Zustandsmischungen von Teilchen bereits berücksichtigt. Weitere Informationen dazu sind z. B. im Band 1: „Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen“ der Unterrichtsmaterialien von Netzwerk Teilchenwelt in den fachlichen Hinweisen unter dem Punkt „Generationsübergreifende Teilchenumwandlungen“ zu finden (<https://www.teilchenwelt.de/material/band1>).

Kooperatives Spiel

Diese Variante wurde von uns bis jetzt (Stand Dezember 2020) noch nicht ausführlich getestet!

Beim kooperativen Feynman-Rhombino legen alle Mitspieler*innen ihre **Rhombinos offen** vor sich ab. Die Mitspieler*innen können sich vor jedem Zug gemeinsam beraten. Das Ziehen von Rhombinos bei falschem Legen (siehe Spielanleitung) entfällt.

Ziel ist es, die Gesamtzahl der Rhombinos der Spieler*innen zu reduzieren. Wenn diese Anzahl nur noch der Anzahl der Mitspielenden entspricht, bevor der Nachziehstapel leer ist, gewinnen alle gemeinsam. Dabei ist es egal, wie diese Anzahl auf die Mitspielenden verteilt ist.

Spieler*innen, die ihr letztes Rhombino gelegt haben, nehmen für den Rest des Spiels nur noch als Berater*innen an den Diskussionen teil.

Diese Variante bietet sich auch bei heterogenen Lerngruppen an, da die unerfahreneren Spieler*innen direkt von den Erklärungen der Anderen in den Diskussionen profitieren können.

Als weitere taktische Komponente kommt bei dieser Variante hinzu, dass die Spielenden gemeinsam vorausschauend planen können. Die Spielzüge sollten bestenfalls so gewählt werden, dass auch der bzw. die nachfolgende Mitspieler*in einen erlaubten Spielzug machen kann.

Geplante Erweiterungen von Feynman-Rhombino

Feynman-Puzzle

Die Rhombinos können für ein Feynman-Puzzle genutzt werden. Dabei werden ein Anfangs- und Endzustand vorgegeben und links bzw. rechts auf einem vorgedruckten Gitter positioniert. Die Lernenden erhalten abhängig von den Zuständen bestimmte Rhombinos, sodass mit diesen der Anfangszustand auf eindeutige Weise in den Endzustand überführt werden kann. Diese Konfiguration gilt es zu finden. Je nach Anzahl der Teilchen in Anfangs- und Endzustand sowie deren Position auf dem Gitter (größerer oder kleinerer Abstand) können so Puzzle mit stark variierendem Schwierigkeitsgrad entstehen. Als Hilfestellung oder zur Differenzierung können die Positionen der einzufügenden Rhombinos durch Markierungen auf dem Raster vorgegeben werden. Durch diese Variante kann zudem gezeigt werden, dass die Anfangs- und Endzustände auf verschiedene Arten verbunden werden können. Dafür erhalten verschiedene Gruppen zwar gleiche Anfangs- und Endzustände, allerdings andere Rhombinos, um diese zu verbinden. Durch den Vergleich kann deutlich gemacht werden, dass einzelne Diagramme lediglich als Repräsentanten für beobachtbare physikalische Prozesse (Übergang von einem Anfangs- zu einem Endzustand) aufgefasst werden können.

Sobald verschiedene Szenarien getestet wurden, werden diese dem vorliegenden Dokument zusammen mit methodischen Hinweisen beigelegt.

Digitales Feynman-Rhombino

Weiterhin wird die Idee geprüft, auch eine digitale Version des Rhombinos zur Verfügung zu stellen indem dieses in das Open-Source-Programm FeynGame (<https://web.physik.rwth-aachen.de/~harlander/software/feyngame/>) eingebettet wird. **FeynGame** ist ein komfortables **Tool zum Zeichnen von Feynman-Diagrammen** mit vielen Individualisierungsmöglichkeiten und der Möglichkeit, gezeichnete Diagramme unter vorgegebenen Modellen (zum Beispiel dem Standardmodell) oder auch nach selbst erstellten Kriterien auf Richtigkeit überprüfen zu lassen. Außerdem ist in FeynGame, wie bereits der Name des Programms vermuten lässt, ein Spielmodus implementiert. Die Spielidee entspricht dabei im Wesentlichen der des oben skizzierte Feynman-Puzzles, nur, dass dort die Überführung von Anfangs- in Endzustände prinzipiell vollständig frei vorgenommen werden kann.

Feedback

Die Spielmechaniken von Feynman-Rhombino wurden in mehreren Überarbeitungszyklen angepasst. Dabei floss Feedback ein, welches wir beim Test mit Lehrkräften bei Fortbildungen sowie von Lehramtsstudierende an der TU Dresden erhalten haben. Wir danken allen Tester*innen für die erhaltenen Rückmeldungen!

Natürlich sind wir sehr an weiterem Feedback und insbesondere an Erfahrungsberichten zum Einsatz im Schulunterricht interessiert! Dafür sind wir per E-Mail via mail@teilchenwelt.de erreichbar. Vielen Dank für Ihre Unterstützung!