# Die magnetische Wirkung als Folge der geschwindigkeitsabhängigen Veränderung des elektrischen Feldes (Der Winkel φ des elektrischen Feldes)

Abriss: Ich beschreibe bzw. erkläre die Entstehung der magnetischen Wirkung auf neue Weise. Dazu genügen das elektrische Feld und die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Ich zeige, in welcher Weise sich das elektrische Feld verändert, wenn sich die felderzeugende Ladung mit einer Geschwindigkeit bewegt. Die magnetische Wirkung ergibt sich in ganz einfacher Weise aus dieser Veränderung. Die magnetische Wirkung lässt sich hier sehr leicht berechnen. Auch in dieser Beschreibung bleibt die magnetische Wirkung abhängig vom Beobachter. Die Transformationen zwischen Inertialsystemen werden ganz normal mit der speziellen Relativität durchgeführt.

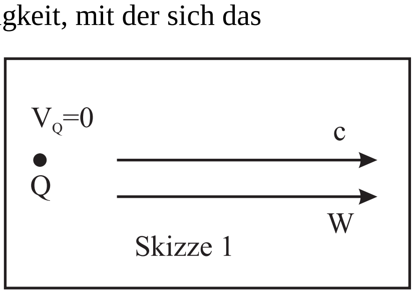
## 1. Vorwort/Einleitung

Die magnetische Wirkung kann sehr gut berechnet werden. Auch die Transformationen in andere Bezugssysteme können mit der speziellen Relativität sehr gut erklärt werden.
Aber wie entsteht die magnetische Wirkung?
Obwohl offensichtlich ist, dass die magnetische Wirkung mit der elektrischen Wirkung zusammenhängt, lässt sich nicht erkennen, wie dieser Zusammenhang zustande kommt.
Ich habe einen sehr einfachen und neuen Weg gefunden, die Entstehung der magnetischen Wirkung zu beschreiben bzw. zu erklären. Ich benötige hierzu einzig und allein die elektrische Wirkung, die als gegeben betrachtet wird. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit [1] wird vorausgesetzt.

Das elektrische Feld entfernt sich mit Lichtgeschwindigkeit ($\vec{c}$) von seiner Ladung. Wenn man dies verallgemeinert, dann kann man das Feld über die Geschwindigkeit, mit der es sich von seiner Ladung entfernt, darstellen. Aus diesem einfachen Ansatz ergibt sich eindeutig und zwingend die magnetische Wirkung.
Allerdings müssen noch einige zusätzliche Gegebenheiten genauer betrachtet werden...
Um falsche Erwartungen zu verhindern: Ich erkläre in dieser Arbeit hier nur das Zustandekommen der magnetischen Wirkung in Abhängigkeit vom Beobachter. Die magnetische Wirkung bleibt also auch hier Geschwindigkeitsabhängig. Die Transformationen in andere Inertialsysteme erfolgen ganz normal mit der speziellen Relativität.

## 2. Stärke und Richtung des elektrischen Feldes

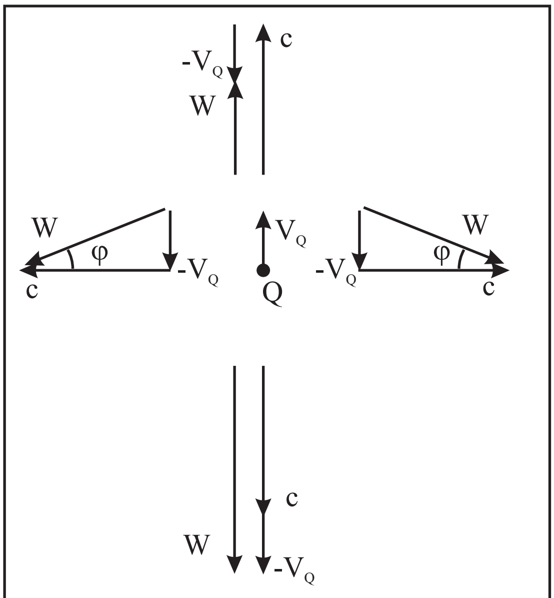
Das elektrische Feld einer elektrischen Ladung Q entfernt sich mit der Geschwindigkeit $\vec{c}$ von dieser Ladung. Man kann dies so verstehen, dass das elektrische Feld kontinuierlich (permanent) am Ort der Ladung neu entsteht.
Das elektrische Feld wirkt mit einer Kraft auf Ladungen. Die Stärke und Richtung dieser Kraft hängen vom elektrischen Feld ab. Die Kraftwirkung bedeutet, dass das Feld Energie auf Ladungen überträgt. Das Feld hat eine seiner Feldstärke entsprechende Energiedichte.
Die Feldstärke W (Wirkungsstärke) - genauer gesagt: die Stärke und Richtung des Feldes *bei seiner Entstehung* (am Ort der Ladung Q) - kann durch $\vec{c}$ (also durch die Geschwindigkeit, mit der sich das Feld von Q entfernt) dargestellt werden. (Skizze 1)
Hier werden also die Stärke und Richtung des Feldes einer Ladung an jedem Punkt des Feldes durch die Geschwindigkeit dargestellt, mit der sich das Feld bei seiner Entstehung von seiner Ladung entfernt. (Die Stärke des Feldes hängt natürlich mit $1/r^2$ vom Abstand zur Ladung ab.)



Skizze 1

Wenn dies so ist, dann muss natürlich auch die Geschwindigkeit $\vec{V}_Q$, mit der sich die felderzeugende Ladung Q bewegt, berücksichtigt werden. Wenn sich die Ladung Q mit der Geschwindigkeit $\vec{V}_Q$ bewegt, dann müssen sich in dieser Darstellung die Stärke und Richtung, also die Wirkung $\vec{W}$ des Feldes, dieser Ladung um $\vec{V}_Q$ ändern.

Genauer gesagt: Wenn $\vec{W}$ und $\vec{c}$ in die selbe Richtung zeigen sollen, dann muss für die Änderung von $\vec{W}$ das $-\vec{V}_Q$ genommen werden, da sich $\vec{c}$ von Q entfernt. (Die tatsächliche Wirkungsrichtung hängt natürlich von den Vorzeichen der jeweils miteinander wechselwirkenden Ladungen ab. –Dazu später mehr.)
In Skizze 2 sind die Zusammenhänge dargestellt:
Wenn $\vec{V}_Q$ und $\vec{c}$ gleichgerichtet sind, dann entfernt sich das Feld langsamer von seiner Ladung, dadurch hat es eine kleinere Wirkung ($\vec{W}$).
Wenn $\vec{V}_Q$ und $\vec{c}$ entgegengerichtet sind, dann wird die Wirkung $\vec{W}$ entsprechend größer.
Senkrecht zu $\vec{V}_Q$ ergibt sich zwischen der Ausbreitungsrichtung des Feldes, das sich mit $\vec{c}$ ausbreitet, und seiner Wirkungsrichtung (Richtung von $\vec{W}$) der Winkel $\varphi = \arctan \frac{V_Q}{c}$.



Skizze 2

**2.2 Quanten**
Die Stärke und Richtung der Wirkung des Feldes einer Ladung darf sich aber *nicht* auf Grund der Geschwindigkeit $\vec{V}_Q$ der Ladung ändern.
Das Problem löst sich, wenn man annimmt, dass das elektrische Feld gequantelt [2] ist.
Die Quanten des Feldes werden in alle Richtungen gleichmäßig und in gleichen Zeitabständen emittiert.
Betrachten wir zunächst die Richtung parallel zu $\vec{V}_Q$:
Wenn $\vec{V}_Q$ und $\vec{c}$ gleichgerichtet sind, dann sind die emittierten Quanten dichter zusammen.
Gleichzeitig wird im selben Maße die Wirkung $\vec{W}$ eines jeden Quants kleiner. Die Zahl der Quanten pro Strecke (also ihre Dichte) nimmt also mit $\vec{V}_Q$ zu und ihre Wirkungsstärke nimmt mit $\vec{V}_Q$ ab. Dies gleicht sich genau aus.
Analoges gilt, wenn $\vec{V}_Q$ und $\vec{c}$ entgegengerichtet sind. Dann nimmt die Zahl der Quanten pro Strecke (also ihre Dichte) mit $\vec{V}_Q$ ab, und ihre Stärke nimmt mit $\vec{V}_Q$ zu. Auch dies gleicht sich genau aus.
Die Feldstärke (die der Energiedichte des Feldes entspricht) ändert sich also in Richtung von $\vec{V}_Q$ nicht. Nur die Quantelung des Feldes ändert sich.
Anders gesagt: die normale elektrische Wirkung bleibt erhalten.
Betrachte wir jetzt die Richtung senkrecht zu $\vec{V}_Q$:
Hier ändert sich die Dichte der Quanten des elektrischen Feldes nicht. Dafür ändert sich aber die Richtung der Wirkung. Es gibt hier den Winkel φ zwischen der Wirkung $\vec{W}$ und der Ausbreitungsrichtung (mit $\vec{c}$) des Feldes. Dieser Winkel wird auch durch Nichts ausgeglichen und gehört zum Feld einer mit $\vec{V}_Q$ bewegten Ladung Q.
Da $\vec{V}_Q \perp \vec{c}$ ist, ändert sich die Wirkungsstärke in Richtung von $\vec{c}$ nicht. Es entsteht aber eine zusätzliche Wirkung in Richtung von $\vec{V}_Q$. Die Bedeutung dieser zusätzlichen Wirkung in Richtung von $\vec{V}_Q$ ist ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit und wird im weiteren Verlauf deutlich werden.

**2.3 Spannungszustand**

Um sich die Zusammenhänge besser vorstellen zu können, kann man sich die Wirkungs-Stärke und -Richtung der Quanten des elektrischen Feldes auch folgendermaßen erklären:
Wenn ein Punkt des Feldes die Ladung verlässt, entsteht auf Grund des Abstandes, der zwischen dem Feldpunkt und der Ladung entsteht, eine Art Spannungszustand. Je größer der Abstand zwischen Feldpunkt und Ladung ist, um so größer ist auch die Spannung. Da das Feld gequantelt ist, muss nach der Zeit $\Delta t_0$ ein neuer Feldpunkt genommen werden, der die Ladung verlässt, und der die Spannung erneut aufbaut. Man kann also einem Quantum des elektrischen Feldes eine (eindimensionale) Länge zuordnen. Für $\vec{V}_Q = 0$ ist diese Länge: $\Delta S_0 = \Delta t_0 * c$. Allgemein gilt: $\Delta S = \Delta t_0 * \left(\vec{c} + \vec{V}_Q\right)$.
Je größer $\Delta S$ ist, um so größer ist auch die Spannung. Die Quanten des elektrischen Feldes bewegen sich immer mit $\vec{c}$. Je größer $\Delta S$ ist, um so größer ist also auch die Zeit, die vergeht, bis ein solches Quantum einen Punkt, auf den es wirkt, passiert hat. Die Zahl der Quanten, die auf diesen Punkt (eine andere Ladung) wirken können, wird um so kleiner, je größer $\Delta S$ wird. Dies gleicht sich genau aus.
Je größer die Spannung eines Quantums des elektrischen Feldes ist, um so länger ist es auch, um so länger dauert es auch, bis es gewirkt hat. Man kann sich diese Wirkung des Quantums des elektrischen Feldes auf eine Ladung auch als "Absorption" vorstellen – je größer seine Länge ist, um so länger dauert auch seine Absorption.
In analoger Weise entsteht auch ein zusätzlicher Spannungszustand senkrecht zu $\vec{c}$, wenn $\vec{V}_Q$ senkrecht zu $\vec{c}$ ist; bzw. wenn ein $\vec{c}$ senkrecht zu $\vec{V}_Q$ betrachtet wird. (Das gleiche gilt natürlich auch, wenn eine auf $\vec{c}$ senkrechte Komponente von $\vec{V}_Q$ betrachtet wird.) Hieraus ergibt sich eine resultierende Wirkung $\vec{W}$, die den Winkel φ zu $\vec{c}$ hat.
Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die Feldstärke durch $\vec{V}_Q$ in Richtung von $\vec{c}$ *nicht* ändert, und dass sich der Winkel φ zwischen $\vec{W}$ und $\vec{c}$ ergibt, wenn $\vec{V}_Q$ eine zu $\vec{c}$ senkrechte Komponente hat.

(Kleinere Quanten haben weniger *Energie* dafür eine größere Dichte (man könnte sagen, dass jedes Quantum eine kleinere Feldstärke hat, es aber mehr davon gibt). Die *Stärke* des Feldes bleibt insgesamt also gleich. Es hat also die gleiche Gesamtenergie.)

Hinweis (Einschub): Für den Fall, dass das Feld nicht gequantelt wird (dass es also als homogen betrachtet werden kann), erhält man eine Stauchung bzw. Streckung der Feldstärke in bzw. entgegen der Richtung von $\vec{V}_Q$. Dies könnte für größere Ladungsansammlungen, die sich gemeinsam mit größerer Geschwindigkeit bewegen, relevant sein. Für die hier zu machenden Betrachtungen ist dies aber nicht relevant. Hie geht es vor allem um den Winkel φ.

Auf die Bedeutung, die der Winkel φ hat, wenn das Feld auf eine Ladung wirkt, wird im Folgenden besonderes Augenmerk gelegt.

Ein wichtiger Hinweis: die Geschwindigkeit $\vec{V}_Q$ ist natürlich vom Beobachter abhängig. Das bedeutet, dass auch φ vom Beobachter abhängt. Die Transformation in andere Bezugssysteme erfolgt ganz einfach über die spezielle Relativität.
Aus alltäglicher Sicht erscheint das ein wenig verwunderlich: könnte man den Winkel φ visualisieren, dann könnten zwei verschiedene Beobachter für das selbe elektrische Feld jeweils verschiedene Winkel sehen. Ihre Beobachtungen bezüglich des Winkels würden nicht übereinstimmen. Solche Unterschiede kennt man bereits aus der speziellen Relativitätstheorie. Sie ergeben sich letztlich alle aus der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Für den Winkel φ ist es genau so. Auch hier soll die Lichtgeschwindigkeit natürlich konstant sein. Tatsächlich ist die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit eine der

wichtigsten Voraussetzungen für dieses Konzept hier. Die Geschwindigkeit $\vec{V}_Q$ beeinflusst die $\vec{c}$ nicht. Da $\vec{V}_Q$ vom Beobachter abhängig ist und $\vec{c}$ nicht, ändert sich zwangsläufig φ.

### 3. Anti-Feld

Durch den Winkel φ ändert sich die Wirkungsrichtung ($\vec{W}$) des Feldes gegenüber seiner Ausbreitungsrichtung (mit $\vec{c}$). Es entsteht eine zu $\vec{c}$ senkrechte Wirkung. Dies darf aber nicht sein.
Das Problem löst sich ganz einfach, wenn man annimmt, dass zum Feld, wenn es auf eine Ladung wirkt, ein Anti-Feld entsteht. Genauer gesagt: zu jedem Feld-Quantum entsteht ein Anti-Quantum.
Was ist das Anti-Feld?
Das Anti-Feld ist ein Feld, dass genau in die entgegengesetzte Richtung wirkt wie das Feld. Zusätzlich bewegt es sich auch in die genau entgegengesetzte Richtung. Das Anti-Feld hat die gleiche Feldstärke wie das Feld. Der Winkel φ hat den selben Betrag, wird aber entsprechend dem, dass sich das Anti-Feld in die entgegengesetzte Richtung zum Feld bewegt, gespiegelt.
Wenn das Feld auf eine Ladung E wirkt, dann entsteht an dieser Ladung das Anti-Feld. Beide, sowohl das Feld als auch das Anti-Feld wirken auf die Ladung E. Das Anti-Feld wirkt genau in die entgegengesetzte Richtung zum Feld; da es sich aber auch in die entgegengesetzte Richtung bewegt, wirkt es resultierend in die selbe Richtung wie das Feld.
Die Wirkung des Feldes auf eine Ladung setzt sich also aus zwei Komponenten zusammen: die des Feldes und die des Anti-Feldes.
Genauer gesagt: Zu jedem Feld-Quantum entsteht an E ein Anti-Quantum. Die Wirkungen von Quantum und Anti-Quantum addieren sich zur Gesamtwirkung. Das Anti-Quantum des elektrischen Feldes entspricht durchaus einem Anti-Teilchen [3]. Die Energie, die das Feld auf die Ladung überträgt, addiert sich aus der Energie des Feldes plus der des Anti-Feldes bzw. aus der Energie des Quantums plus der des Anti-Quantums. In der Energie des Feldes ist also die Energie des Anti-Feldes bereits vorhanden.

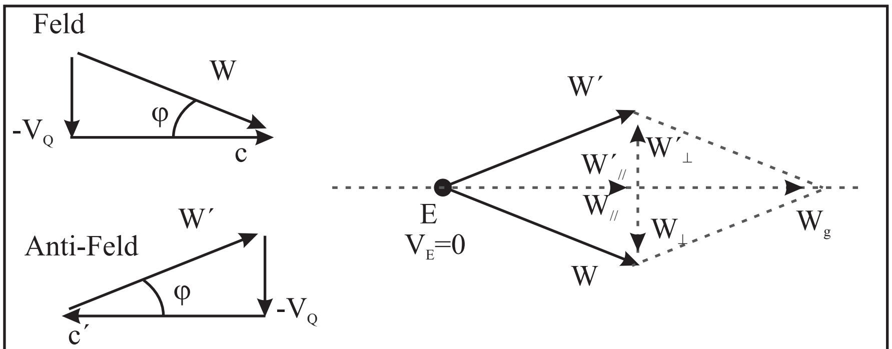
Einschub: Man kann sich die Entstehung des Anti-Feldes auch als eine Art Reflexion des Feldes an der Ladung (E) vorstellen. Wenn die Wirkung des Feldes einer Absorption entspricht, dann entspricht die Reflexion einer Emission. Die Emission entspricht einer Abstoßung und wirkt demnach in die selbe Richtung wie das ursprüngliche Feld. Dieser Vergleich funktioniert aber nicht immer besonders gut.

Wenn wir jetzt die Wirkung des Feldes bzw. der Feld-Quanten wieder durch $\vec{c}$ darstellen und folgerichtig die des Anti-Feldes bzw. der Anti-Quanten durch $\vec{c}' = -\vec{c}$, dann ergibt sich die Gesamtwirkung $\vec{W}_g$ des elektrischen Feldes auf eine ruhende Ladung E ($\vec{V}_E = 0$), wenn $\varphi = 0$ ist, zu

$\vec{W}_g = \vec{c} - (-\vec{c}') = 2 * |\vec{c}|$.

Dies ist die normale elektrische Wirkung zwischen zwei ruhenden Ladungen. Sie setzt sich grundsätzlich immer aus den Wirkungen von Feld und Anti-Feld zusammen.

Jetzt betrachten wir den Fall, dass $\varphi \neq 0$ ist mit $\vec{V}_E = 0$. Dies ist in Skizze 3 dargestellt.
Die Wirkung von W in Richtung von $\vec{c}$ ist $\vec{W}_{//} = \vec{c}$ und die Wirkung von W senkrecht zu $\vec{c}$ ist $\vec{W}_{\perp} = -\vec{V}_Q$.
Entsprechend gilt: $\vec{W}'_{//} = -\vec{c}' = \vec{c}$ und $\vec{W}'_{\perp} = -(-\vec{V}_Q) = +\vec{V}_Q$.



Skizze 3

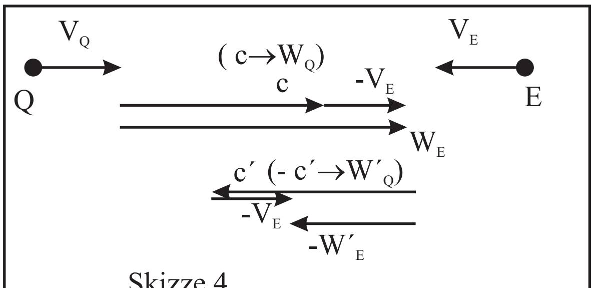
Dies bedeutet: $\vec{W}_{\perp}$ und $\vec{W}'_{\perp}$ heben sich gegenseitig auf, während $\vec{W}_{//} + \vec{W}'_{//} = 2 * |\vec{c}|$ ergibt.
Wir hatten ja ursprünglich das Problem, dass sich durch φ eine zu $\vec{c}$ senkrechte Wirkung ergibt. Wir erkennen jetzt hier, dass sich das Problem durch des Anti-Feld löst, weil sich die beiden zu $\vec{c}$ senkrechten Komponenten des Feldes und des Anti-Feldes genau gegenseitig aufheben. Gleichzeitig ergeben die beiden zu $\vec{c}$ parallelen Komponenten von Feld und Anti-Feld genau die normale elektrische Wirkung.

Bis jetzt war $\vec{V}_E = 0$. Wenn sich die Ladung E, auf die ein Feld wirkt, mit der Geschwindigkeit $\vec{V}_E$ bewegt ($\vec{V}_E \neq 0$), dann entsteht eine magnetische Wirkung, wenn auch $\vec{V}_Q \neq 0$ ist, wenn also $\varphi \neq 0$ ist. Im folgenden zeige ich, wie sich die magnetische Wirkung aus $\vec{V}_E$ und φ ergibt.

## 4. Die magnetische Wirkung

Bei der Entstehung des Feldes einer Ladung Q war die Geschwindigkeit $\vec{V}_Q$ der Ladung zu berücksichtigen. Die Wirkung $\vec{W}$ des Feldes wird durch $\vec{c}$ und $\vec{V}_Q$ dargestellt.
In analoger Weise muss auch die Geschwindigkeit $\vec{V}_E$ der Ladung E, auf die das Feld wirkt, berücksichtigt werden.
Hierbei ist es von entscheidender Bedeutung, auf die korrekte Anwendung der Vorzeichen zu achten.
Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Quantelung der Wirkung des Feldes auf die Ladung.

### 4.1. Parallele Geschwindigkeiten
Wir wollen uns den Gegebenheiten schrittweise nähern. Zu diesem Zweck betrachten wir zunächst den einfachen Fall, in dem sich die felderzeugende Ladung Q, die sich mit $\vec{V}_Q \neq 0$ bewegt, und die Ladung E, auf die das Feld wirkt, und die sich mit $\vec{V}_E \neq 0$ bewegt, auf der selben Geraden bewegen.
Man kann dies in Skizze 4 sehen.



Skizze 4

#### 4.1.1 Vorzeichen
Wir haben bereits gesehen, dass sich durch $\vec{V}_Q$ die Wirkung (bzw. die Feldstärke) des Feldes von Q in Richtung von $\vec{V}_Q$ nicht ändert. Nur die Quantelung ändert sich.
Die Wirkung $\vec{W}$ des Feldes kann also in Richtung von $\vec{V}_Q$ durch $\vec{c}$ dargestellt werden. $\vec{W}_Q \mathrel{\hat{=}} \vec{c}$.
In entsprechender Weise kann die Wirkung $\vec{W}'$ des Anti-Feldes durch $-\vec{c}'$ dargestellt werden, da Feld und Anti-Feld gleich stark wirken. $\vec{W}'_Q \mathrel{\hat{=}} -\vec{c}'$. (Zur Erinnerung: $\vec{c}'$ ist entgegengerichtet zu $\vec{c}$, das Anti-Feld wirkt aber in entgegengesetzter Richtung zum Feld. Deswegen ist das "-" vor $\vec{c}'$ nötig.)

Ganz analog zu dem, dass sich das Feld bei seiner Entstehung an Q durch $\vec{V}_Q$ ändert, soll sich nun die Wirkung des Feldes auf E durch $\vec{V}_E$ ändern.
Die Wirkung des Feldes an E ändert sich durch $\vec{V}_E$ in folgender Weise:
Wenn sich E auf Q zu bewegt, wenn also $\vec{c}$ und $\vec{V}_E$ entgegengerichtet sind, dann vergrößert sich die Wirkung um $\vec{V}_E$, da E hier dem Feld entgegeneilt. Wenn $\vec{c}$ und $\vec{V}_E$ gleichgerichtet sind, dann verkleinert sich die Wirkung um $\vec{V}_E$, da E hier dem Feld davoneilt.
Es gilt also:

$\vec{W}_E = \vec{c} + (-\vec{V}_E)$

$\vec{W}_E' = -(\vec{c}' + (-\vec{V}_E)) = -(-\vec{c} + (-\vec{V}_E))$

Also ist: $\vec{W}_E + \vec{W}_E' = \vec{c} - \vec{V}_E + \vec{c} + \vec{V}_E = 2 * \vec{c}$

Wie erkennen hier, dass sich die Wirkungs-Änderungen, die sich durch $\vec{V}_E$ am Feld und am Anti-Feld ergeben, genau gegenseitig aufheben. Es ergibt sich resultierend genau die normale elektrische Wirkung. (In diesem hier beschriebenen einfachen Fall.)

### 4.1.2 Quanten

Wie verhält es sich mit den Quanten?

Wir hatten festgestellt, dass die Quantelung des Feldes von $\vec{V}_Q$ abhängt. Jedem Quant konnte eine (eindimensionale) Länge $\Delta S$ zugeordnet werden. Das $\Delta S$ bewegt sich mit der Geschwindigkeit $\vec{c}$. Die Zeit, die E zum durchlaufen von $\Delta S$ benötigt, ändert sich durch $\vec{V}_E$ natürlich (in Skizze 4 wird sie kleiner). Man könnte jetzt denken, dass sich folglich die Zahl der Quanten, die auf E wirken, durch $\vec{V}_E$ ändert. Dies ist aber nicht so.

Hier gilt es, folgendes zu beachten: ein Quantum definiert sich durch seine Wirkung bzw. durch seine Energieübertragung. Die Wirkung eines Quantums setzt sich aber immer aus der Addition der Wirkungen des Quantums *plus* der des Anti-Quantums zusammen. Das Anti-Quantum bewegt sich aber in entgegengesetzter Richtung zum Quantum.

Die Wirkung bzw. die Energieübertragung auf E in einer Zeiteinheit $\Delta t_0$ ergibt sich also aus der Addition der Quanten plus der Anti-Quanten. Da sich durch $\vec{V}_E$ die Wirkung der Anti-Quanten in genau entgegengesetzter Weise zur Wirkung der Quanten *ändert*, ergibt sich nach der Zeit $\Delta t_0$ immer die selbe Gesamtwirkung ($W_g$), ganz unabhängig von $\vec{V}_E$.

Die Zahl der Quanten ($W_g$), die auf E wirken, ist also unabhängig von $\vec{V}_E$. Dies gilt natürlich im besonderen, wenn $\vec{V}_E \perp \vec{c}$ ist.

Jedes Quantum ergibt sich immer zu einem Quantum und einem Anti-Quantum. Dies bedeutet, dass sich sowohl die Zahl der Quanten als auch die der Anti-Quanten durch $\vec{V}_E$ nicht ändert.

Jedes Quantum bzw. Anti-Quantum des Feldes von Q kann durch $\vec{c}$ bzw. $-\vec{c}'$ dargestellt werden.

Die Wirkung eines jeden Quantums bzw. Anti-Quantums ändert sich dementsprechend durch $\vec{V}_E$ um $\vec{c} + (-\vec{V}_E)$ bzw. $-(\vec{c}' + (-\vec{V}_E))$.

Dies entspricht genau den Verhältnissen, die man auch bei der Betrachtung des Feldes vorfindet.

Einschub: Entscheidend dafür, dass die Verhältnisse des Feldes denen der Quanten in dieser einfachen Weise entsprechen, ist, dass sich die Zahl der Quanten durch $\vec{V}_E$ nicht ändert. Wenn man die Entstehung des Anti-Feldes als *Reflexion* betrachten möchte, dann ändern sich die Zahlen der Quanten durch $\vec{V}_E$, was zu sehr komplizierten Verhältnissen führen kann. Dies wird in dieser Arbeit hier nicht gemacht.

Im folgenden kann auf die Betrachtung der Quanten verzichtet werden. Statt dessen genügt es, das Feld und das Anti-Feld zu betrachten.

## 4.2 Allgemeiner Fall

Wir haben bisher gesehen:

Solange sich Q und E auf der selben Geraden bewegen, ergibt sich keine zusätzliche Wirkung zur normalen elektrischen Wirkung, also keine magnetische Wirkung.

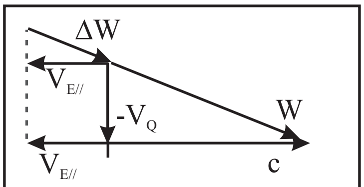
Eine solche zusätzliche Wirkung, die der magnetischen Wirkung entspricht, ergibt sich erst, wenn das Feld den Winkel φ hat, zwischen seiner Ausbreitungsrichtung mit $\vec{c}$ und seiner Wirkungsrichtung, und wenn sich E mit einer Geschwindigkeit $\vec{V}_E \neq 0$ bewegt. Dass der Winkel φ bei $\vec{V}_E = 0$ keine zusätzliche Wirkung zur normalen elektrischen Wirkung ergibt, wurde bereits gezeigt. Dass eine $\vec{V}_E \neq 0$ bei $\varphi = 0$ keine zusätzliche Wirkung ergibt, wurde im Prinzip auch schon gezeigt, da eine $\vec{V}_E \perp \vec{c}$ die Zahl der Quanten nicht ändert, dies wird aber in den jetzt folgenden Betrachtungen noch deutlicher werden.

Zum besseren Verständnis nähern wir uns den Zusammenhängen am besten, in dem wir uns zunächst zwei Spezialfälle ansehen, bevor wir dann im nächsten Kapitel den allgemeinen Fall *berechnen*.
Die beiden Spezialfälle sind:
1.) $\vec{V}_Q \perp \vec{c}$ und $\vec{V}_E \,//\, \vec{c}$
2.) $\vec{V}_Q \perp \vec{c}$ und $\vec{V}_E \perp \vec{c}$

Zunächst aber beschreibe ich die allgemeine Vorgehensweise (ohne Berechnungen), bevor ich diese dann auf diese beiden Spezialfälle anwende.

### 4.2.1 Allgemeine Vorgehensweise

Solange sich Q und E bzw. $\vec{c}$ und $\vec{V}_E$ auf der selben Geraden bewegt haben, war die Bedeutung von $\vec{V}_E$ leicht zu verstehen.
Sobald sich aber durch $\vec{V}_Q \perp \vec{c}$ der Winkel φ für die Wirkungsrichtung ergibt, muss darauf geachtet werden, die $\vec{V}_E$ korrekt anzuwenden.
Als erstes macht es Sinn, die $\vec{V}_E$ in zwei Komponenten zu zerlegen: eine Komponente parallel zu $\vec{c}$, das ist $\vec{V}_{E//}$, und eine Komponente senkrecht zu $\vec{c}$, das ist $\vec{V}_{E\perp}$.
Für die Komponente parallel zu $\vec{c}$, das ist $\vec{V}_{E//}$, gilt im Prinzip das gleiche wie in dem Fall, in dem $\vec{c}$ und $\vec{V}_E$ auf der selben Geraden sind. Hier, allerdings, bewegt sich Q mit $\vec{V}_Q$ senkrecht zu dieser Geraden, so dass für $\vec{W}$ der Winkel φ entsteht. Das $\vec{V}_{E//}$ wird also zu $\vec{c}$ dazuaddiert, so dass sich $\vec{W}$ entsprechend ändert. Die Wirkungs*änderung* $\Delta\vec{W}$ hat dabei den selben Winkel wie $\vec{W}$.
In Skizze 5 ist dies für ein $\vec{V}_{E//}$ dargestellt, das der $\vec{c}$ entgegengerichtet ist, so dass die Wirkung $\vec{W}$ um $\Delta\vec{W}$ *größer* wird.
Zur Erinnerung: wenn $\vec{V}_E$ und $\vec{c}$ entgegengerichtet sind, dann vergrößert sich die Wirkung und wenn $\vec{V}_E$ und $\vec{c}$ gleichgerichtet sind, dann verkleinert sich die Wirkung. Dies gilt natürlich auch dann, wenn die Wirkung $\vec{W}$ einen Winkel φ zu $\vec{c}$ hat.

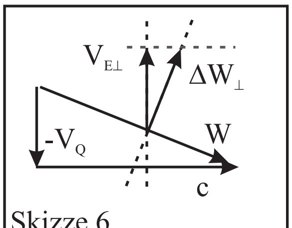


Skizze 5

Für das Anti-Feld gilt das natürlich auch in analoger Weise. Für das Anti-Feld wird aber anstelle von $\vec{c}$ das $\vec{c}'$ genommen, da sich das Anti-Feld mit $\vec{c}'$ bewegt (in entgegengesetzter Richtung zu $\vec{c}$). Wenn also $\vec{V}_E$ und $\vec{c}'$ entgegengerichtet sind, dann wird die Wirkung $\vec{W}'$ des Anti-Feldes größer. Dabei gilt es zu beachten, dass das Anti-Feld resultierend in die selbe Richtung wirkt wie das Feld, da sich seine eigentlich entgegengesetzte Wirkungsrichtung mit seiner entgegengesetzten Bewegungsrichtung wider aufhebt. Wenn also die $\vec{V}_E$ und die $\vec{c}'$ entgegengerichtet sind, dann hat die $\Delta\vec{W}'$ die selbe Richtung wie $\vec{W}'$. Und schließlich, wenn $\vec{V}_E$ und $\vec{c}'$ gleichgerichtet sind, dann wird $\vec{W}'$ kleiner.

Kurz gesagt: für Feld und Anti-Feld gilt immer: wenn sich E auf ein Feld zu bewegt, dann wird die Wirkung größer und wenn sich E mit einem Feld mitbewegt, dann wird die Wirkung kleiner.
Die Komponente parallel zu $\vec{c}$ erzeugt also eine zusätzliche Wirkung (mit Vorzeichen) in Richtung von $\vec{W}$ (bzw. $\vec{W}'$). Es entsteht also eine zusätzliche Wirkung parallel zu $\vec{W}$.

Für die Komponente von $\vec{V}_E$, die senkrecht zu $\vec{c}$ ist (das ist $\vec{V}_{E\perp}$), ist es etwas anders. Die $\vec{V}_{E\perp}$ erzeugt eine eigene Wirkung, die senkrecht zur Wirkung $\vec{W}$ (bzw. $\vec{W}'$) ist. Das die $\vec{V}_{E\perp}$ eine eigene Wirkung erzeugt, ist logisch, da das Feld senkrecht zu $\vec{W}$ noch keine Wirkung hat. Wir haben ja bereits festgestellt, dass die Wirkung des Feldes durch die Geschwindigkeit entsteht, mit der sich das Feld von Q entfernt. Und durch die $\vec{V}_Q$ entsteht eine entsprechende zusätzliche Wirkung. Die $\vec{V}_{E\perp}$ wird also ebenfalls eine zusätzliche Wirkung senkrecht zu $\vec{W}$ erzeugen. Die $\vec{V}_{E//}$ stärkt oder schwächt eine bereits vorhandene Wirkung. Für die $\vec{V}_{E\perp}$ ergibt sich die Wirkung aus dem Feld heraus, relativ zu dem sie sich bewegt. Dabei ist zu beachten, dass beim Anti-Feld $-\vec{V}_{E\perp}$ genommen werden muss. Es ist klar, dass für die Wirkungsrichtung der zusätzlichen Wirkung, die durch $\vec{V}_{E\perp}$ entsteht, die Wirkungsrichtung des Feldes, relativ zu dem die $\vec{V}_{E\perp}$ betrachtet wird, genommen werden muss. Und das Anti-Feld wirkt in entgegengesetzter Richtung zum Feld. Anders aber als bei $\vec{V}_{E//}$ hebt sich die entgegengesetzte Wirkungsrichtung bei $\vec{V}_{E\perp}$ *nicht* durch eine entgegengesetzte Bewegungsrichtung wider auf.
Durch $\vec{V}_{E\perp}$ entsteht also eine neue, zusätzliche Wirkung $\Delta\vec{W}_\perp$, für die ebenfalls das φ des Feldes zu berücksichtigen ist. Das $\Delta\vec{W}_\perp$ ist also senkrecht zu $\vec{W}$. In Skizze 6 ist dies für das Feld $\vec{W}$ dargestellt. Für das Anti-Feld $\vec{W}'$ müsste $-\Delta\vec{W}'_\perp$ genommen werden.

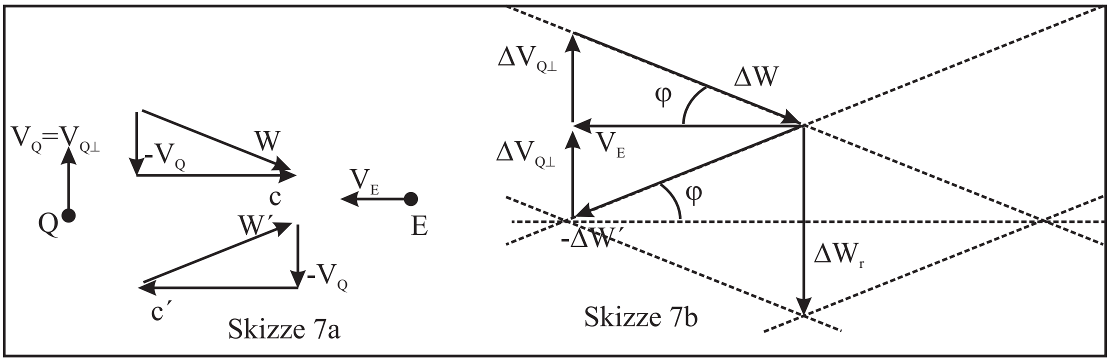


Skizze 6

Noch ein Wort zur Darstellung: solange $\varphi = 0$ war, hat es genügt, die Wirkung des Feldes einfach durch $\vec{c}$ darzustellen. Dies lag daran, dass eine Geschwindigkeit von Q in Richtung von $\vec{c}$ (mit $\vec{V}_{Q\perp} = 0$) zwar die Art der Quantelung geändert hat, nicht aber die Stärke des Feldes. Es gab keine zusätzliche Wirkung (wie ja festgestellt wurde). Wenn es aber einen Winkel $\varphi \neq 0$ gibt, dann muss die Wirkung durch die vektorielle Addition von $\vec{c}$ und $-\vec{V}_Q$ dargestellt werden, denn hier bewirkt die $\vec{V}_Q$ eine *zusätzliche* Wirkung . – Genau genommen entsteht diese zusätzliche Wirkung (also der Winkel φ) durch die Komponente von $\vec{V}_Q$ senkrecht zu $\vec{c}$, das ist $\vec{V}_{Q\perp}$. Dazu sage ich später noch etwas.

Zur Verdeutlichung wenden wir jetzt die beschriebene Vorgehensweise auf die beiden genannten Spezialfälle an.

1.) $\vec{V}_Q \perp \vec{c}$ und $\vec{V}_E // \vec{c}$ (Skizze 7a)
Da $\vec{V}_E // \vec{c}$ ist, ist $\vec{V}_{E\perp} = 0$ und $\vec{V}_E = \vec{V}_{E//}$. Die Wirkungsänderungen, die sich aus $\vec{V}_E = \vec{V}_{E//}$ ergeben, sind in Skizze 7b dargestellt. Für das Feld ist dies $\Delta\vec{W}$ und für das Anti-Feld $\Delta\vec{W}'$.
Da $\vec{V}_{E//}$ der $\vec{c}$ entgegeneilt, ist die $\Delta\vec{W}$ der $\vec{W}$ gleichgerichtet.
Da $\vec{V}_{E//}$ der $\vec{c}'$ davoneilt, ist die

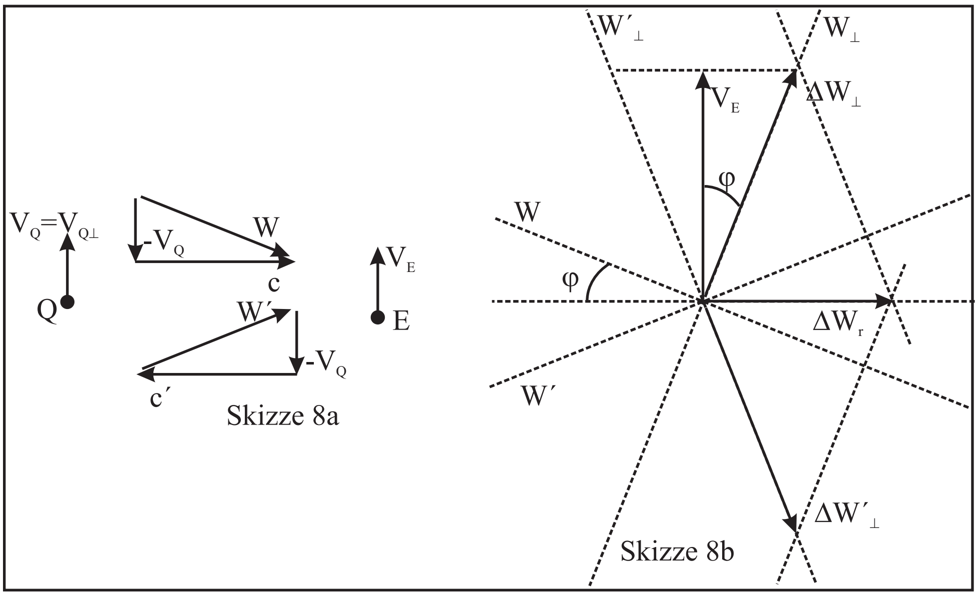


Skizze 7a
Skizze 7b

$\Delta\vec{W}'$ der $\vec{W}'$ entgegengerichtet.
Die Beträge von $\left|\Delta\vec{W}\right|$ und $\left|\Delta\vec{W}'\right|$ sind gleich groß. Die Addition von $\Delta\vec{W}$ und $\Delta\vec{W}'$ ergibt $\Delta\vec{W}_r$.
Wenn man Skizze 7b betrachtet, erkennt man bereits einzig und allein an der Geometrie, ganz ohne irgendwelche Berechnungen durchzuführen, dass $\Delta\vec{W}_r$ senkrecht zu $\vec{V}_E$ ist.
Eine Wirkungsänderung in Richtung von $\vec{V}_E$ (also parallel zu $\vec{V}_E$) ergibt sich nicht.
Die Senkrechte zu $\vec{V}_E$ habe ich in Skizze 7b $\Delta\vec{V}_{Q\perp}$ genannt. Es gilt:

$$\frac{V_{Q\perp}}{c} = \frac{\Delta V_{Q\perp}}{V_E} \Rightarrow \Delta\vec{V}_{Q\perp} = \frac{V_{Q\perp} * V_E}{c}.$$

Man erkennt in Skizze 7b, dass $\Delta W_r = 2 * \Delta V_{Q\perp} = 2 * \frac{V_{Q\perp} * V_E}{c}$ gilt.
Die genauen Berechnungen zeige ich im nächsten Kapitel bei der Berechnung des allgemeinen Falles.
Später wird dann auch deutlich, dass $\Delta\vec{W}_r$ tatsächlich genau der magnetischen Wirkung entspricht.
Dieses Beispiel hier dient vor allem der Veranschaulichung.




Der zweite Spezialfall, der zu betrachten war, ist:
2.) $\vec{V}_Q \perp \vec{c}$ und $\vec{V}_E \perp \vec{c}$ (Skizze 8a)
Da $\vec{V}_E \perp \vec{c}$ ist, ist $\vec{V}_{E//} = 0$ und $\vec{V}_{E\perp} = \vec{V}_E$.
Hier erzeugt die $\vec{V}_E = \vec{V}_{E\perp}$ ihre eigene Wirkung und zwar senkrecht zu $\vec{W}$ und senkrecht zu $\vec{W}'$, also in die Richtungen $\vec{W}_\perp$ und $\vec{W}'_\perp$ (Skizze 8b). Ich bezeichne auch diese beiden Wirkungen mit einem "$\Delta$" (also mit $\Delta\vec{W}_\perp$ und $\Delta\vec{W}'_\perp$), da auch sie eine Änderung darstellen, gegenüber der Situation, in der $\vec{V}_E = 0$ ist.
Die Wirkung in Richtung von $\vec{W}_\perp$ behält ihr Vorzeichen, während das Anti-Feld in die entgegengesetzte Richtung wirkt.
Man erkennt auch hier sofort, dass $\Delta\vec{W}_r$ senkrecht zu $\vec{V}_E$ ist. Außerdem gilt auch hier:

$$\Delta W_r = 2 * \frac{V_{Q\perp} * V_E}{c}.$$

Die beiden Spezialfälle hier haben auf anschauliche Weise gezeigt, dass das Prinzip funktioniert, da eine beliebige $\vec{V}_E$ immer in die Komponenten $\vec{V}_E \mathbin{//} \vec{c}$ und $\vec{V}_E \perp \vec{c}$ zerlegt werden kann.

Es hatte sich die Frage ergeben, ob sich eine zusätzliche Wirkung zur normalen elektrischen Wirkung ergibt, wenn zwar $\varphi = 0$ ist (also $\vec{V}_Q = 0$ ist), aber E sich mit $\vec{V}_E \neq 0$ bewegt. Man erkennt an diesen beiden Beispielen (Spezialfällen) sehr schön, dass sich für $\varphi = 0$ die Komponenten von $\vec{V}_E$ zum Feld und zum Anti-Feld immer genau gegenseitig aufheben. Eine $\vec{V}_E$ alleine (also mit $\varphi = 0$ bzw. $\vec{V}_Q = 0$) erzeugt also keine zusätzliche Wirkung.

## 5. Berechnungen des allgemeinen Falles

Bevor jetzt die allgemeinen Berechnungen durchgeführt werden können, müssen noch zwei Sachverhalte geklärt werden:
1.) Spiegelung und 2.) Die Bedeutung von $\vec{V}_{Q\perp}$

### 5.1 Zu 1.) (Spiegelung)

Wenn das Feld auf die Ladung E wirkt, dann bewegt es sich mit der Geschwindigkeit $\vec{c}$ an E vorbei. Wenn sich E mit der Geschwindigkeit $\vec{V}_E$ bewegt, dann kann $\vec{V}_E$ in zwei Komponenten zerlegt werden: in eine Komponente parallel zu $\vec{c}$, das ist $\vec{V}_{E//}$, und in eine Komponente senkrecht zu $\vec{c}$, das ist $\vec{V}_{E\perp}$.

Für die Wirkungsänderung, die sich durch $\vec{V}_{E//}$ ergibt, genügt es, die $\vec{V}_{E//}$ einfach zu $\vec{c}$ dazu zu addieren.

Senkrecht zu $\vec{c}$ hat das Feld keine Geschwindigkeit. Durch $\vec{V}_{E\perp}$ entsteht eine solche Geschwindigkeit. Die Wirkung, die sich daraus ergibt, entspricht der Geschwindigkeit, mit der sich *das Feld* in dieser Richtung an E vorbeibewegt. Diese Geschwindigkeit ist $-\vec{V}_{E\perp}$. Es muss also $-\vec{V}_{E\perp}$ und nicht $\vec{V}_{E\perp}$ genommen werden.

Aus $\vec{V}_{E//}$ und $-\vec{V}_{E\perp}$ ergibt sich die Spiegelung von $\vec{V}_E$ an $\vec{c}$.

Erst *nachdem* $\vec{V}_E$ an $\vec{c}$ gespiegelt wurde, werden die Wirkungen (bzw. die Wirkungsänderungen), also die Vorzeichen, ermittelt.

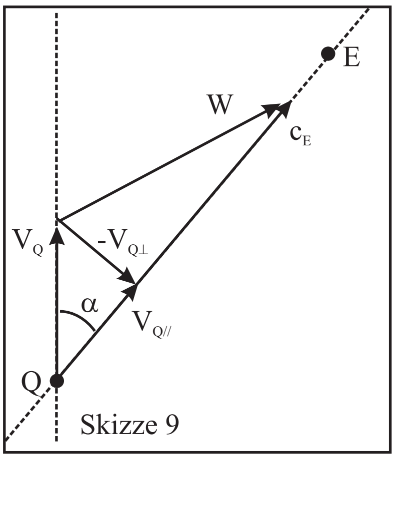
Hier sei noch einmal erwähnt, dass $\vec{c}\,'$ immer genau entgegengerichtet zu $\vec{c}$ ist. Da also $\vec{c}$ und $\vec{c}\,'$ parallel sind, ist es egal, ob $\vec{V}_E$ an $\vec{c}$ oder an $\vec{c}\,'$ gespiegelt wird.

Anmerkung: In den beiden Spezialfällen des vorherigen Kapitels ($\vec{V}_Q \perp \vec{c}$ mit $\vec{V}_E // \vec{c}$, und $\vec{V}_Q \perp \vec{c}$ mit $\vec{V}_E \perp \vec{c}$) war das Problem mit der Spiegelung auf Grund der Symmetrie nicht aufgefallen; man sollte die Spiegelung aber dennoch durchführen, um immer korrekte Vorzeichen zu erhalten.

Die Spiegelung von $\vec{V}_E$ an $\vec{c}$ findet natürlich unabhängig von φ (also $\vec{V}_Q$) statt.

Jetzt muss noch der zweite Sachverhalt, den ich zu Beginn dieses Kapitels nannte, geklärt werden:

### 5.2 Zu 2.) (Die Bedeutung von $\vec{V}_{Q\perp}$)



Skizze 9

Zwischen der Geschwindigkeit $\vec{V}_Q$ der Ladung Q und der Geschwindigkeit $\vec{c}_E$ des Feldes in Richtung von E (siehe Skizze 9) gibt es im allgemeinen einen Winkel, das ist α. Man kann jetzt $\vec{V}_Q$ in zwei Komponenten zerlegen: eine in Richtung von $\vec{c}_E$, das ist $\vec{V}_{Q//}$, und eine senkrecht zu $\vec{c}_E$, das ist $\vec{V}_{Q\perp}$.

Für die Komponente $\vec{V}_{Q//}$ ist $\varphi = 0$. Das bedeutet, dass durch $\vec{V}_{Q//}$ keinerlei Wirkungsänderung stattfindet. Die Wirkung des Feldes ändert sich durch $\vec{V}_{Q//}$ nicht. Die $\vec{V}_{Q//}$ kann also ignoriert werden.

Anders ist es mit $\vec{V}_{Q\perp}$. Die $\vec{V}_{Q\perp}$ ändert die Wirkung des Feldes genau um den

Betrag, der $\vec{V}_{Q\perp}$ entspricht. Die Wirkung des Feldes ($\vec{W}$) ergibt sich aus der Addition von $\vec{c}$ plus $-\vec{V}_{Q\perp}$.

Die Richtung der Wirkung $\vec{W}$ ergibt sich ausschließlich aus $\vec{V}_{Q\perp}$ und $\vec{c}$. Die $\vec{V}_{Q//}$ beeinflusst die Richtung von $\vec{W}$ ebenso wenig wie den Betrag von $\vec{W}$.

### 5.3 Berechnung des allgemeinen Falles

Jetzt können wir die allgemeine Berechnung durchführen.

Als erstes wird $\vec{V}_E$ an $\vec{c}$ gespiegelt. Das ergibt $|\vec{V}_E$ (der senkrechte Strich soll $\vec{V}_E$-gespiegelt symbolisieren).

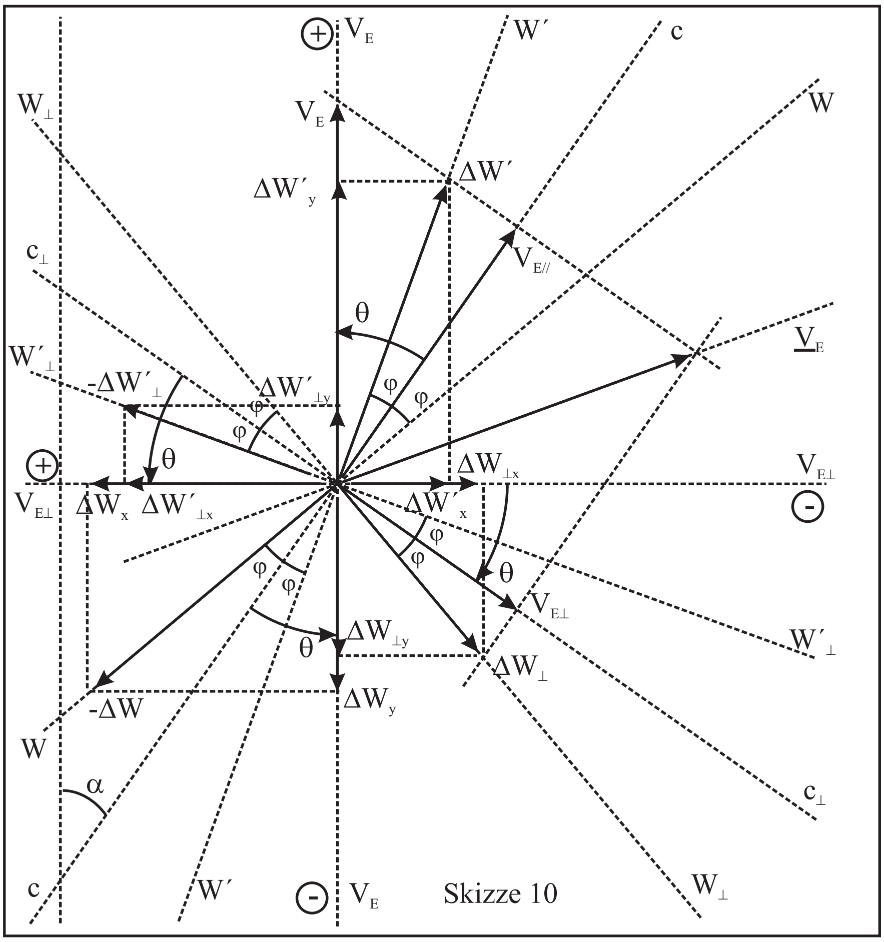
Dann wird $\vec{V}_E$ in ihre Komponenten parallel und senkrecht zu $\vec{c}$ zerlegt, das sind $\vec{V}_{E//}$ und $\vec{V}_{E\perp}$.

Aus dieser Zerlegung ergeben sich die Wirkungskomponenten zum Feld, das sind $\Delta\vec{W}$ und $\Delta\vec{W}_\perp$, und die zum Anti-Feld, das sind $\Delta\vec{W}'$ und $\Delta\vec{W}'_\perp$.

Dann werden die Vorzeichen der Wirkungsänderungen bestimmt.

Für $\Delta\vec{W}_\perp$ und $\Delta\vec{W}'_\perp$ ist dies leicht. Die $\Delta\vec{W}_\perp$ behält ihr Vorzeichen und für das Anti-Feld muss $-\Delta\vec{W}'_\perp$ genommen werden.

Für $\Delta\vec{W}$ und $\Delta\vec{W}'$ ist es genau umgekehrt: Die $\Delta\vec{W}'$ behält ihr Vorzeichen und für das Feld wird $-\Delta\vec{W}$ genommen. Das erklärt sich folgendermaßen: Die Richtung von $\vec{c}$ wird als die positive Richtung definiert. Wenn $\vec{c}$ und $\vec{V}_{E//}$ gleichgerichtet sind, dann schwächt das die Wirkung, also muss $-\Delta\vec{W}$ genommen werden. Wenn $\vec{c}$ und $\vec{V}_{E//}$ entgegengerichtet sind, dann stärkt das die Wirkung. Die $\vec{V}_{E//}$ ist hier aber negativ. Das ergäbe eine Schwächung der Wirkung. Also muss wieder $-\Delta\vec{W}$ genommen werden.




Skizze 10

Für das Anti-Feld gelten ähnliche Überlegungen. Dabei ist zu beachten, dass hier $\vec{c}'$ negativ ist, während das Anti-Feld in die selbe Richtung wirkt wie das Feld. Das hebt sich gegenseitig auf, so dass $+\Delta\vec{W}'$ genommen werden muss.

Als nächstes werden die Wirkungskomponenten ($\Delta\vec{W}$, $\Delta\vec{W}_\perp$, $\Delta\vec{W}'$ und $\Delta\vec{W}'_\perp$) auch noch einmal zerlegt. Wir wollen wissen, ob sich eine Wirkung (durch $\vec{V}_E$) in Richtung von $\vec{V}_E$ (also parallel zu $\vec{V}_E$) ergibt. Außerdem wollen wir wissen, wie groß die Wirkung senkrecht zu $\vec{V}_E$ ist. Also zerlegen wir die Wirkungskomponenten in Komponenten senkrecht zu $\vec{V}_E$, das sind $\Delta\vec{W}_x$, $\Delta\vec{W}_{\perp x}$, $\Delta\vec{W}'_x$ und $\Delta\vec{W}'_{\perp x}$, und in Komponenten parallel zu $\vec{V}_E$, das sind $\Delta\vec{W}_y$, $\Delta\vec{W}_{\perp y}$, $\Delta\vec{W}'_y$ und $\Delta\vec{W}'_{\perp y}$.

In Skizze 10 werden diese Schritte durchgeführt.
Die Geraden $W$ und $W'$ (gestrichelte Linien) sind die Wirkungsrichtungen des Feldes und des Anti-Feldes. Die Geraden $W_{\perp}$ und $W'_{\perp}$ sind die dazu senkrechten Richtungen. Die Gerade $V_{E\perp}$ (gestrichelte Linie, nicht mit der zu $\vec{c}$ senkrechten Geschwindigkeit $V_{E\perp}$ zu verwechseln) ist die zu $\vec{V}_E$ senkrechte Richtung. Die $c_{\perp}$ ist die zu $\vec{c}$ senkrechte Richtung.
Wir definieren die Richtung von $\vec{c}$ als die positive Richtung. Das ist am einfachsten. Die Vorzeichen der $\Delta\vec{W}_x$, $\Delta\vec{W}_{\perp x}$, $\Delta\vec{W}'_x$, $\Delta\vec{W}'_{\perp x}$, $\Delta\vec{W}_y$, $\Delta\vec{W}_{\perp y}$, $\Delta\vec{W}'_y$ und $\Delta\vec{W}'_{\perp y}$ ergeben sich entsprechend.
Der Winkel θ ist der Winkel *von* $\vec{c}$ *zu* $\vec{V}_E$ (Vorzeichen beachten). Die korrekten Vorzeichen der Wirkungskomponenten parallel und senkrecht zu $\vec{V}_E$ ergeben sich aus der korrekten Ermittlung der Winkel (mit Vorzeichen) dieser Komponenten. (Alternativ dazu kann man auch einfach immer mit den Beträgen rechnen und dann die korrekten Vorzeichen der Skizze 10 entnehmen.)
Es gilt:

$$\cos\theta = \frac{V_{E//}}{V_E} \Rightarrow V_{E//} = V_E * \cos\theta$$

$$\cos\theta = \frac{V_{E\perp}}{V_E} \Rightarrow V_{E\perp} = V_E * \sin\theta$$

Durch die Spiegelung von $\vec{V}_E$ ergibt sich:

$$V_{E\perp} = -V_E * \sin\theta$$

Der Winkel zwischen $\vec{V}_{E//}$ und $\vec{c}$ ist Null.
Der Winkel zwischen $V_{E\perp}$ und $\vec{c}$ ist 90°.
Der Winkel zwischen $-V_{E\perp}$ und $\vec{c}$ ist 270°.
Es gelten:

$$\cos\varphi = \frac{V_{E\perp}}{\Delta W_{\perp}} \Rightarrow \Delta W_{\perp} = \frac{V_{E\perp}}{\cos\varphi} = \frac{V_E * si\theta}{\cos\varphi}$$ Der Winkel zu $\vec{c}$ ist $270-\varphi$.

$$\cos\varphi = \frac{V_{E\perp}}{\Delta W'_{\perp}} \Rightarrow \Delta W'_{\perp} = \frac{V_{E\perp}}{\cos\varphi} = \frac{V_E * si\theta}{\cos\varphi}$$ Der Winkel zu $\vec{c}$ ist $270+\varphi$.

Die Beträge von $\Delta W_{\perp}$ und $\Delta W'_{\perp}$ sind gleich groß. Für die Ermittlung des Winkels muss $-V_{E\perp}$ genommen werden. (Daraus ergibt sich der Winkel 270° zu $\vec{c}$.) Zwischen $\vec{c}$ und $\vec{W}$ ist der Winkel $-\varphi$ und zwischen $\vec{c}$ und $\vec{W}'$ ist der Winkel $+\varphi$. Dementsprechend muss auch hier zu $\Delta\vec{W}_{\perp}$ das $-\varphi$ addiert werden und zu $\Delta\vec{W}'_{\perp}$ muss das $+\varphi$ addiert werden.
Für $\Delta\vec{W}'_{\perp}$ muss das $-\Delta\vec{W}'_{\perp}$ genommen werden, wie ja erklärt wurde. Demnach müssen +180° dazu addiert werden. Also ist:
Für $\Delta\vec{W}'_{\perp}$ ist der Winkel $270° + \varphi + 180° = 360° + 90° + \varphi = 90° + \varphi$.

Des weiteren gelten:

$$\cos\varphi = \frac{V_{E//}}{\Delta W} \Rightarrow \Delta W = \frac{V_{E//}}{\cos\varphi} = \frac{V_E * \cos\vartheta}{\cos\varphi}$$ Der Winkel zu $\vec{c}$ ist $-\varphi$.

$$\cos\varphi = \frac{V_{E//}}{\Delta W'} \Rightarrow \Delta W' = \frac{V_{E//}}{\cos\varphi} = \frac{V_E * \cos\vartheta}{\cos\varphi}$$ Der Winkel zu $\vec{c}$ ist $+\varphi$.

Die Beträge von $\Delta W$ und $\Delta W'$ sind gleich groß. Für die Ermittlung der Winkel wird $+\vec{V}_{E//}$ genommen.
Für $\Delta W$ muss das $-\Delta W$ genommen werden, wie ja erklärt wurde. Demnach müssen +180° dazu addiert werden. Also ist:

Für $\Delta W$ ist der Winkel $+180° - \varphi$.
Jetzt werden die Komponenten parallel ($W_y$, $W'_y$, $W_{\perp y}$ und $W'_{\perp y}$) und senkrecht ($W_x$, $W'_x$, $W_{\perp x}$ und $W'_{\perp x}$) zu $\vec{V}_E$ ermittelt. Hier müssen direkt die korrekten Winkel verwendet werden.
Allerdings beziehen sich die ermittelten Winkel auf $\vec{c}$, während wir die Komponenten zu $\vec{V}_E$ bzw. $V_{E\perp}$ ermitteln wollen.
Zwischen $\vec{c}$ und $\vec{V}_E$ ist der Winkel θ. Dieser Winkel muss jetzt noch von den ermittelten Winkeln subtrahiert werden. Dadurch erhält man die Winkel bezogen auf $\vec{V}_E$. Aus den Winkelfunktionen wissen wir:
Die Kosinusse dieser Winkel sind parallel zu $\vec{V}_E$ und die Sinusse dieser Winkel sind senkrecht zu $\vec{V}_E$.
Für die Richtung parallel zu $\vec{V}_E$ gilt also:

$$\cos(180 - \varphi - \vartheta) = \frac{\Delta W_y}{\Delta W} \Rightarrow \Delta W_y = \Delta W * \cos(180 - (\varphi + \vartheta)) = -\Delta W * \cos(\varphi + \vartheta)$$

$$\cos(+\varphi - \vartheta) = \frac{\Delta W'_y}{\Delta W'} \Rightarrow \Delta W'_y = \Delta W' * \cos(\varphi - \vartheta)$$

$$\cos(270 - \varphi - \vartheta) = \frac{\Delta W_{\perp y}}{\Delta W_\perp} \Rightarrow \Delta W_{\perp y} = \Delta W_\perp * \cos(270 - (\varphi + \vartheta)) = -\Delta W_\perp * \sin(\varphi + \vartheta)$$

$$\cos(90 + \varphi - \vartheta) = \frac{\Delta W'_{\perp y}}{\Delta W'_\perp} \Rightarrow \Delta W'_{\perp y} = \Delta W'_\perp * \cos(90 + (\varphi - \vartheta)) = -\Delta W'_\perp * \sin(\varphi - \vartheta)$$

Diese vier parallelen Komponenten werden addiert. Vorher werden noch $\Delta W$, $\Delta W'$, $\Delta W_\perp$ und $\Delta W'_\perp$ eingesetzt.
Es ergibt sich die Gesamtwirkung in paralleler Richtung, das ist $W_{//g}$:

$$W_{//g} = \frac{V_E}{\cos\varphi} * (-\cos\vartheta * \cos(\varphi + \vartheta) + \cos\vartheta * \cos(\varphi - \vartheta) - \sin\vartheta * \sin(\varphi + \vartheta) - \sin\vartheta * \sin(\varphi - \vartheta))$$

Wenn man den ersten mit den dritten Term in der Klammer und den zweiten mit den vierten addiert, ergibt sich:

$$W_{//g} = \frac{V_E}{\cos\varphi} * (\cos(\varphi) - \cos(-\varphi)) = \frac{V_E}{\cos\varphi} * 0 = 0.$$

Wie zu erwarten war, ergibt sich keine Wirkung in Richtung von $\vec{V}_E$.

Für die Richtung senkrecht zu $\vec{V}_E$ berechnen wir die Sinusse in gleicher Weise:

$$\sin(180 - \varphi - \vartheta) = \frac{\Delta W_x}{\Delta W} \Rightarrow \Delta W_x = +\Delta W * \sin(\varphi + \vartheta)$$

$$\sin(+\varphi - \vartheta) = \frac{\Delta W'_x}{\Delta W'} \Rightarrow \Delta W'_x = +\Delta W' * \sin(\varphi - \vartheta)$$

$$\sin(270 - \varphi - \vartheta) = \frac{\Delta W_{\perp x}}{\Delta W_\perp} \Rightarrow \Delta W_{\perp x} = -\Delta W_\perp * \cos(\varphi + \vartheta)$$

$$\cos(90+\varphi-\vartheta)=\frac{\Delta W'_{\perp x}}{\Delta W'_{\perp}} \Rightarrow \Delta W'_{\perp x} = +\Delta W'_{\perp} * \cos(\varphi-\vartheta)$$

Diese vier senkrechten Komponenten werden addiert. Vorher werden noch $\Delta W$ , $\Delta W'$, $\Delta W_{\perp}$ und $\Delta W'_{\perp}$ eingesetzt.
Es ergibt sich die Gesamtwirkung in senkrechter Richtung, das ist $W_{\perp G}$:

$$W_{\perp G} = \frac{V_E}{\cos\varphi} * (+\cos\vartheta * \sin(\varphi+\vartheta) + \cos\vartheta * \sin(\varphi-\vartheta) - \sin\vartheta * \cos(\varphi+\vartheta) + \sin\vartheta * \cos(\varphi-\vartheta))$$

Wenn man den ersten mit den dritten Term in der Klammer und den zweiten mit den vierten addiert, ergibt sich:

$$W_{\perp G} = \frac{V_E}{\cos\varphi} * (-\sin(-\varphi) + \sin(\varphi)) = \frac{V_E}{\cos\varphi} * 2 * \sin(\varphi) = 2 * V_E * \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi}$$

Es ist: $\frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} = tag\varphi$. Wie wir wissen, ist $tag\varphi = \frac{V_{Q\perp}}{c}$. Also ergibt sich $W_{\perp G}$ zu:

$$W_{\perp G} = +2 * \frac{V_E * V_{Q\perp}}{c}$$

Das positive Vorzeichen bedeutet hier, dass der Winkel *von* $\vec{V}_E$ *zu* $W_{\perp G} // V_{E\perp}$ +90° ist, wobei der Winkel θ *von* $\vec{c}$ *zu* $\vec{V}_E$ ebenfalls positiv ist.
Wir erkennen hier eine resultierende Wirkung, die *unabhängig* von θ ist.
Die $W_{\perp G}$ ist proportional zu $\vec{V}_E$ und zu $\vec{V}_{Q\perp}$. Das entspricht der magnetischen Wirkung. Wie dies genau aussieht, das zeige ich im folgenden.

Zunächst etwas zur Wirkungsrichtung:
Der Winkel zwischen $\vec{V}_Q$ und $\vec{c}$ ist α. Wir betrachten den Fall $\alpha = 90°$ und $\vartheta = 90°$. Das bedeutet, dass $\vec{V}_Q$ und $\vec{V}_E$ parallel und gleichgerichtet sind. In diesem Fall ist $W_{\perp G}$ genau entgegengerichtet zu $\vec{c}$. Das bedeutet, dass das $W_{\perp G}$, das der magnetischen Wirkung entspricht, der elektrischen Wirkung genau entgegengerichtet ist.

Wie schon mehrfach gesagt wurde, addieren sich die Wirkungen von Feld und Anti-Feld. In Richtung von $\vec{c}$ wirken Feld und Anti-Feld in die selbe Richtung. Die normale elektrische Wirkung (also z.B. bei $V_E = V_Q = 0$) kann also durch $F_E = 2 * c$ dargestellt werden. Die normale elektrische Wirkung wird also durch die Lichtgeschwindigkeit dargestellt.
Die $W_{\perp G}$ ist letztlich auch nur eine Geschwindigkeit. Bei ihrer Ermittlung mussten aber die Wirkungs-richtungen $\vec{W}$ und $\vec{W}'$ berücksichtigt werden. Wir stellen also die magnetische Wirkung durch $W_{\perp G}$ dar:

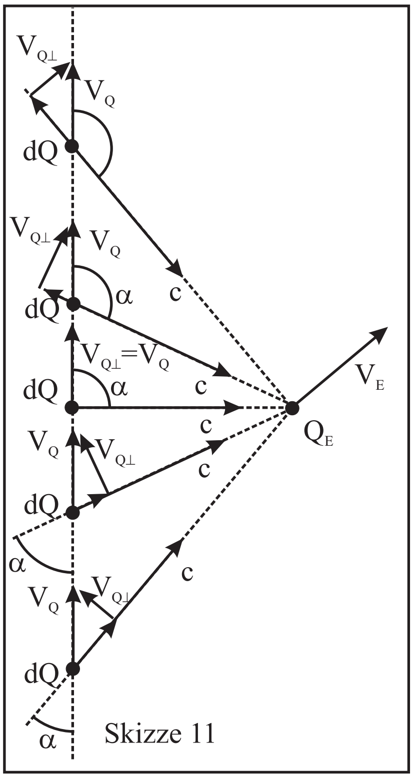
$$F_M = -W_{\perp G} = -2 * \frac{V_E * V_{Q\perp}}{c}$$

Hier muss jetzt das Minus genommen werden, da ja festgestellt wurde, dass $W_{\perp G}$ der elektrischen Wirkung entgegenwirkt.
Man kann jetzt die magnetische Kraft im Verhältnis zur elektrischen Kraft darstellen:

$$\frac{F_M}{F_E} = \frac{-2*\frac{V_E *V_{Q\perp}}{c}}{2*c} = -\frac{V_E *V_{Q\perp}}{c^2} \Rightarrow F_M = -F_E * \frac{V_E *V_{Q\perp}}{c^2}$$

Für den Fall, dass $\vec{V}_{Q\perp} = \vec{V}_Q = \vec{c}$ ist (bei $\alpha = 90°$) und $\vec{V}_E = \vec{c}$, ergibt sich $F_M = -F_E$. Das entspricht genau den Erwartungen. Bei Lichtgeschwindigkeit hebt die magnetische Wirkung die elektrische Wirkung genau auf.

Für die normale elektrische Kraft gilt natürlich das Coulombsche Gesetz: $F_E = \frac{Q_Q * Q_E}{r^2}\varepsilon$ [4]. Der bisher in dieser Arbeit verwendeten Nomenklatur zufolge wären: $Q_Q$ die felderzeugenden Ladungen, $Q_E$ die Ladung, auf die das Feld wirkt, und r ist der Abstand zwischen diesen Ladungen.




Wenn man die magnetische Wirkung eines stromdurchflossenen Leiters auf eine Ladung $Q_E$ ermitteln möchte, dann genügt es, die elektrische Wirkung zu ermitteln, und diese mit $-\frac{V_E *V_{Q\perp}}{c^2}$ zu multiplizieren. Wobei natürlich gilt:

$$\sin\alpha = \frac{V_{Q\perp}}{V_Q} \Rightarrow V_{Q\perp} = V_Q * \sin\alpha.$$

Im Falle eines geraden Leiters würde man einfach über den Winkel α integrieren (dies ist in Skizze 11 angedeutet).

Die Größe der hier ermittelten magnetischen Kraft ist natürlich vom Beobachtungsstandort, also vom Bezugssystem, abhängig. Die hier ermittelte magnetische Kraft hängt von $\vec{V}_Q$ und $\vec{V}_E$ ab. Die $\vec{V}_Q$ und $\vec{V}_E$ sind Beobachterabhängig. Das selbe gilt auch für den Winkel φ (wie schon erwähnt wurde). Unterschiedliche Beobachter können unterschiedliche Winkel φ beobachten. Der Winkel φ des Feldes ist keine vom Beobachter unabhängige Feldeigenschaft. Die Transformationen zwischen den Inertialsystemen erfolgen ganz normal über die spezielle Relativität. Dies gilt sowohl für die Kräfte (die magnetischen und die elektrischen Kräfte) als auch für die Geschwindigkeiten und Winkel (z.B. $\vec{V}_Q$, $\vec{V}_E$ und φ).

Der Winkel φ ist vom Bezugssystem abhängig. Dennoch ist φ eine Feldeigenschaft. Ich habe in dieser Arbeit gezeigt, dass φ völlig genügt, um die Entstehung der magnetischen Wirkung zu erklären. Die magnetische Wirkung ergibt sich auf völlig natürliche, automatische Weise aus φ. Die einzige Voraussetzung ist die, dass sich die elektrische Wirkung des Feldes aus der Geschwindigkeit ergibt, mit der sich das Feld zur felderzeugenden Ladung bewegt.

### 6. Elektrodynamische Prozesse

Ein wichtiges Prinzip in dieser Arbeit ist, die elektrische Wirkung durch die Lichtgeschwindigkeit ($\vec{c}$) darzustellen. Wenn sich die felderzeugende Ladung Q mit der Geschwindigkeit $\vec{V}_Q$ bewegt, und sich die Ladung E, auf die das Feld wirkt, mit der Geschwindigkeit $\vec{V}_E$ bewegt, dann werden die Änderungen, die sich bei der elektrischen Wirkung durch diese beiden Geschwindigkeiten ($\vec{V}_Q$ und $\vec{V}_E$) ergeben, ebenfalls nur durch diese beiden Geschwindigkeiten dargestellt.

Wenn sich eine Ladung E, auf die ein Feld wirkt, mit der Geschwindigkeit $\vec{V}_E$ bewegt, dann ändert sich durch diese Geschwindigkeit der Abstand zur felderzeugenden Ladung (Q), und somit ändern sich auch die Feldstärken (sowohl die magnetische als auch die elektrische). (Bei einem stromdurchflossenen Leiter hat das keine Bedeutung, da sich an jedem Ort des Leiters immer die gleiche Ladung befindet.) Umgekehrt ist das genau so: wenn die Ladung E ruht, während sich die Feldstärke ändert, dann entspricht das genau dem, dass sich E relativ zur felderzeugenden Ladung bewegt. Dies bedeutet, dass eine Änderung der Feldstärke einer virtuellen Geschwindigkeit der Ladung E entspricht, das ist $\vec{V}_{EV}$. Diese virtuelle Geschwindigkeit ($\vec{V}_{EV}$) der Ladung E hat die selbe Bedeutung wie $\vec{V}_E$. Genau so wie sich durch eine $\vec{V}_E$ eine magnetische Wirkung ergeben kann, wenn das Feld einen Winkel φ hat, kann sich auch durch eine $\vec{V}_{EV}$ eine magnetische Wirkung ergeben.

Sowohl die elektrische als auch die magnetische Feldstärke kann sich ändern. Hier muss unbedingt die spezielle Relativität beachtet werden.
Die magnetische Feldstärke kann sich auf verschiedene Weisen ändern: weil sich der Abstand zur Feldquelle ändert, oder weil sich die Zahl der Ladungen, die sich bewegen, ändert, oder weil sich die Geschwindigkeiten ($\vec{V}_Q$) der Ladungen, die sich bewegen, ändert. Letzteres bedeutet, dass sich φ ändert. In jedem dieser Fälle entspricht die Magnetfeld*änderung* einer virtuellen Geschwindigkeit ($\vec{V}_{EV}$) der Ladung E. Ich erwähne das, um deutlich zu machen, dass auch eine Änderung des Winkels φ einer $\vec{V}_{EV}$ entspricht.

Änderungen des elektrischen und magnetischen Feldes entsprechen also einer virtuellen Geschwindigkeit $\vec{V}_{EV}$ der Ladung, auf die die Felder wirken. Die Änderungen des elektrischen und magnetischen Feldes finden nicht unabhängig voneinander statt. Hier ist die spezielle Relativität zu beachten. Im weiteren müssten jetzt verschiedene Fälle einzeln betrachtet werden. Das wird hier nicht gemacht. Die wichtige Erkenntnis, die sich aus der virtuellen Geschwindigkeit $\vec{V}_{EV}$ ergibt, ist folgende: Die Prinzipien der Elektrodynamik gelten auch weiterhin, ganz unabhängig davon, dass die Entstehung der magnetischen Wirkung hier durch den Winkel φ beschrieben wird. Anders gesagt: Die Prinzipien der Elektrodynamik bleiben davon, dass ich die magnetische Wirkung mit Hilfe des Winkels φ erkläre, unberührt.
Die maxwelschen Gleichungen [5] können genau in der bisherigen Weise angewendet werden.
Auch die Entstehung elektromagnetischer Wellen kann wie gehabt beschrieben werden. Allerdings ist zu beachten, dass die elektromagnetischen Wellen natürlich den Winkel φ enthalten.

**7. Schlusswort**

Ich konnte zeigen, dass mit Hilfe des Winkels φ die Entstehung der magnetischen Wirkung erklärt werden kann.
Dies sieht so aus:
Die normale elektrische Wirkung wird durch die Lichtgeschwindigkeit $\vec{c}$ dargestellt. Die Lichtgeschwindigkeit $\vec{c}$ ist die Geschwindigkeit, mit der sich das elektrische Feld von seiner Ladung entfernt. Durch die Geschwindigkeit $\vec{V}_Q$, mit der sich die felderzeugende Ladung bewegt, ändert sich die Wirkung des elektrischen Feldes. Durch die Quantelung des elektrischen Feldes ändert sich die Wirkung des elektrischen Feldes nur senkrecht zu $\vec{V}_Q$, nämlich durch den Winkel φ. Durch das Anti-Feld heben sich die Wirkungen von φ und φ´ (des Anti-Feldes) gegenseitig auf. Durch die Geschwindigkeit $\vec{V}_E$, mit der sich die Ladung, auf die das Feld wirkt, bewegt, ergibt sich eine resultierende Wirkung, nämlich die magnetische Wirkung. Durch die virtuelle $\vec{V}_E$, das ist $\vec{V}_{EV}$, ergeben sich die Prinzipien der Elektrodynamik.

Ich denke, dass die hier gezeigte Vorgehensweise plausibel und gerechtfertigt ist. Am wichtigsten von allem ist die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, ohne welche die magnetische Wirkung in der hier gezeigten Weise nicht dargestellt werden könnte.
Als nächstes (in weiteren Arbeiten) möchte ich die hier gezeigte Vorgehensweise ganz konkret auf spezielle elektrodynamische Prozesse anwenden.
Außerdem möchte ich die hier gezeigte Vorgehensweise auch auf die Gravitation anwenden.

Referenzen


[1] A. Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper  Annalen der Physik* 17, 891-921 (1905)

[2]M. Planck: *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum.* In: *Verhandlungen der Deutschen physikalischen Gesellschaft.* 2, Nr. 17, 1900, S. 245, Berlin (vorgetragen am 14. Dezember 1900).

[3]PAM Dirac: *The Quantum Theory of the Electron*. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. A, Nr. 778, 1928, S. 610-624, doi:10.1098/rspa.1928.0023.

[4]Dieter Meschede: *Gerthsen Physik.* 23. Auflage, Springer, Berlin/Heidelberg/New York 2006, ISBN 3-540-25421-8.

[5]James Clerk Maxwell, *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, Royal Society Transactions 155, 1865, Seiten 459–512.