Der Magnetismus als elektrischer Winkeleffekt

Hans-Joerg Hochecker
Donaustr. 22
30519 Hannover
Web-site: http://www.hochecker.eu
E-Mail: jo.hoer@yahoo.de

Abriss: Die magnetische Kraft kann sehr einfach als Folge der Relativgeschwindigkeiten elektrischer Ladungen beschrieben werden. Und die Transformationen in inertiale Referenzsysteme werden sehr gut durch die spezielle Relativitätstheorie beschrieben. Dennoch aber wird der Magnetismus einfach als gegeben genommen. Eine Erklärung für die Entstehung des Magnetismus gibt es noch nicht. Ich habe einen recht einfachen Weg gefunden, die Entstehung des Magnetismus ganz genau zu erklären. Ich möchte diese Idee hier vorstellen.
Schlagwörter: spezielle Relativitätstheorie, elektrisches Feld, Magnetismus
PACS: 03.30.+p, 03.50.De

1. Einleitung

Die magnetische Kraft ist schon recht seltsam: Immer wenn eine elektrische Ladung eine Geschwindigkeit hat, dann entsteht ein Magnetfeld, das sowohl senkrecht zu dieser Geschwindigkeit als auch senkrecht zum elektrischen Feld dieser Ladung ist. Und immer wenn eine Ladung eine Geschwindigkeit senkrecht zu einem Magnetfeld hat, dann entsteht eine magnetische Kraft, die sowohl senkrecht zu dieser Geschwindigkeit als auch senkrecht zum Magnetfeld ist.
Beide müssen sich bewegen, sowohl die Quelle des Magnetfeldes als auch die Ladung, auf die das Magnetfeld wirkt. Und die magnetische Kraft ist *immer* senkrecht zur Geschwindigkeit.

Diese Gesetzmäßigkeit hatte man recht schnell erkannt, und genau so schnell ergab sich ein Problem: beim wechseln in ein Referenzsystem, in dem sich die Quelle oder der Empfänger (das ist die Ladung, auf die das Magnetfeld wirkt) nicht bewegen, verschwindet die magnetische Kraft natürlich. Aber eine Kraft kann nicht einfach so verschwinden. Einstein konnte das Problem schließlich auf geniale Weise lösen, indem er zeigte, dass nicht nur die magnetische Kraft sondern auch die elektrische Kraft vom Referenzsystem abhängt [1]. Dazu musste er aber annehmen, dass die Lichtgeschwindigkeit für alle Referenzsysteme gleich groß ist. Und das bedeutet, dass Raum und Zeit relativ sein müssen.

Man hat also verstanden, *wann* eine magnetische Kraft entsteht – nämlich immer wenn sich Ladungen bewegen (sowohl die, die das Magnetfeld erzeugen, als auch die, auf die das Magnetfeld wirkt). Doch *wie* entsteht die magnetische Kraft eigentlich? Wieso entsteht eine magnetische Kraft, wenn sich Ladungen bewegen? Das weiß man bisher nicht. Auch Einstein hat die magnetische Kraft einfach als gegeben genommen.

Nun, ich denke, ich kann erklären, wie die magnetische Kraft entsteht. Und es ist erstaunlich einfach.
Ich muss zwei Annahmen (im Sinne von Postulaten) machen. Diese beiden Annahmen können auf erstaunlich einfache Weise erklären, wie Magnetismus entsteht.
Ich werde jetzt die beiden Annahmen vorstellen.
Ich möchte vorwegnehmen, dass nur die Kombination *beider* Annahmen korrekte Ergebnisse ergibt.
Außerdem muss die Lichtgeschwindigkeit für alle Beobachter gleich groß sein.

2. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der elektrischen Kraft

Das elektrische Feld bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit $\vec{c}$. Auf eine ruhende elektrische Ladung wirkt dieses elektrische Feld mit einer elektrostatischen Kraft, die sich aus dem Coulombschen Gesetz errechnet [2]. Während der Kraft-Wirkung bewegt sich das elektrische Feld mit Lichtgeschwindigkeit

an der Ladung, auf die es wirkt, vorbei. In gewisser Weise fließt das elektrische Feld an der Ladung entlang, und dabei entsteht die elektrische Kraft.
In gewisser Weise kann man sich vorstellen, dass das vorbeifließen des elektrischen Feldes die Ursache der elektrischen Kraft ist. Wenn das so ist, dann erscheint es logisch, dass die elektrische Kraft unter anderem auch abhängig von der Fließ-Geschwindigkeit des elektrischen Feldes ist. Wenn sich also die Ladung, auf die das Feld wirkt, mit einer eigenen Geschwindigkeit bewegt, dann ändert sich die Fließ-Geschwindigkeit relativ zum Feld, und somit ändert sich auch die elektrische Kraft.
Das ist natürlich nur eine bildliche Darstellung, die helfen soll, sich die Zusammenhänge besser vorstellen zu können. Aus dieser Darstellung leite ich die erste Annahme (im Sinne eines Postulats) ab:

> Die elektrische Kraft ist abhängig von der Geschwindigkeit zwischen der Ladung und dem elektrischen Feld.

Dies gilt sowohl für die Ladung, auf die das Feld wirkt, als auch für die Ladung, die das Feld erzeugt.
Dies ist die erste der beiden Annahmen, die ich machen muss, um dem Magnetismus zu erklären.

Betrachten wir den elektrostatischen Fall.
Die elektrostatische Kraft zwischen zwei Ladungen berechnet sich nach dem Coulombschen Gesetz:
$F_S = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2}$, wobei q_1 und q_2 die elektrischen Ladungen sind, r ist der Abstand zwischen ihnen und ε_0 ist die elektrische Konstante im Vakuum.
Jetzt soll die elektrische Kraft außerdem abhängig von der Geschwindigkeit zwischen der Ladung und dem Feld sein. Im elektrostatischen Fall ist die Geschwindigkeit des Feldes relativ zur Ladung, auf die das Feld wirkt, immer die Lichtgeschwindigkeit $\vec{c}$. Die elektrostatische Kraft lässt sich also folgendermaßen darstellen: $\vec{F}_S = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2} \cdot \frac{1}{c} \cdot \vec{c} \quad \Rightarrow \quad \vec{F}_S = F_C \cdot \vec{c}$, wobei $F_C = \frac{F_S}{c}$ ist.
Das ist der elektrostatische Fall.

Jetzt betrachten wir jetzt den Fall, dass die Ladung, die das Feld erzeugt (ich nenne diese Ladung fortan Quelle), ruht, und die Ladung, auf die das Feld wirkt (ich nenne diese Ladung fortan Empfänger), bewegt sich mit der Geschwindigkeit $\vec{v}_E$. Durch die Geschwindigkeit $\vec{v}_E$ des Empfängers ändert sich die elektrische Kraft (F_E): Die elektrische Kraft nimmt ab, wenn sich die Ladung vom Feld weg bewegt, und zu wenn sich die Ladung auf das Feld zu bewegt.
Es ist also: $\vec{F}_E = F_C \cdot (\vec{c} - \vec{v}_E) \quad \Rightarrow \quad \vec{F}_E = F_C \cdot \vec{c} - F_C \cdot \vec{v}_E = \vec{F}_S - F_C \cdot \vec{v}_E$.
In der Vektoraddition muss $-\vec{v}_E$ genommen werden, da eine Zunahme der Kraft erfolgt, wenn sich der Empfänger auf das Feld zu bewegt. Wir sehen hier, dass sich nicht nur der Betrag der elektrischen Kraft ändert, sondern auch die Richtung (wenn sich der Empfänger mit $\vec{v}_E$ bewegt).
Ganz allgemein kann man sagen: Durch die $\vec{v}_E$ des Empfängers entsteht eine zusätzliche elektrische Kraft, zusätzlich zur elektrostatischen Kraft, die proportional zur $\vec{v}_E$ ist und die in die Richtung der $-\vec{v}_E$ zeigt (gemeint ist $-F_C \cdot \vec{v}_E$).
In der Darstellung des Fließens könnte man sagen, dass die $\vec{v}_E$ einen eigenen, zusätzlichen Fluss erzeugt. Diese zusätzliche Kraft kann allerdings nur entstehen, weil es bereits ein elektrisches Feld gibt, das auf den Empfänger wirkt, relativ zu dem sich also der Empfänger bewegen kann.

Jetzt betrachten wir die Quelle. Das gerade aufgestellte Postulat besagt: Die elektrische Kraft ist abhängig von der Geschwindigkeit zwischen der Ladung und dem Feld. Diese Aussage gilt nicht nur für die Ladung, auf die das Feld wirkt (also den Empfänger) sondern auch für die Ladung, die das Feld erzeugt, also für die Quelle. Es geht also um die Geschwindigkeit der Quelle.
Das bedeutet: Die Kraft des elektrischen Feldes auf eine Ladung hängt von der Geschwindigkeit ab, mit der sich die Ladung, die das Feld erzeugt, bewegt. Oder anders gesagt: die Feldstärke hängt von der Geschwindigkeit ab, mit der sich die Ladung, die das Feld erzeugt, bewegt.

Bei einer ruhenden Ladung entfernt sich das elektrische Feld mit Lichtgeschwindigkeit von dieser Ladung. In diesem Fall entspricht die Kraft des elektrischen Feldes auf eine Ladung genau der elektrostatischen Kraft.
Für eine Quelle, die sich bewegt, gilt: in Bewegungsrichtung entfernt sich das Feld langsamer von seiner Quelle und entgegen der Bewegungsrichtung schneller. Das bedeutet: in Bewegungsrichtung ist die Kraft des Feldes kleiner, und entgegen der Bewegungsrichtung größer.
Im Prinzip wird die Geschwindigkeit der Quelle von der Lichtgeschwindigkeit ihres Feldes subtrahiert.
Das gleiche gilt auch, wenn sich das Feld senkrecht zur Geschwindigkeit der Quelle von der Quelle entfernt: die Geschwindigkeit der Quelle wird von der Lichtgeschwindigkeit des Feldes subtrahiert. Die Geschwindigkeit der Quelle ist hier aber senkrecht zur Geschwindigkeit des Feldes. Das bedeutet: es ändert sich nicht nur der Betrag der elektrischen Kraft des Feldes (auf eine Ladung), sondern auch die Richtung der elektrischen Kraft. Im Prinzip ist es eine einfache Vektoraddition. Der resultierende Vektor aus der Lichtgeschwindigkeit des Feldes der Quelle minus der Geschwindigkeit der Quelle ist proportional zur Kraft des Feldes auf eine Ladung. Und dies gilt natürlich für alle Richtungen, in die sich das elektrische Feld der Quelle ausbreitet.
Wenn sich die Quelle mit der Geschwindigkeit $\vec{v}_Q$ bewegt, dann ist die Kraft F_E, die ihr Feld auf eine ruhende Ladung ($\vec{v}_E = 0$) hat: $F_E = F_C \cdot \left(\vec{c} - \vec{v}_Q\right)$.

Um es ganz deutlich zu sagen: das Feld wird sich *immer* mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, vollkommen unabhängig von der Geschwindigkeit der Quelle. Nur die Geschwindigkeit, mit der sich das Feld von seiner Quelle entfernt, hängt natürlich von der Geschwindigkeit der Quelle ab (für einen Beobachter, der sich mit der gleichen Geschwindigkeit wie die Quelle bewegt, entfernt sich das Feld natürlich nur mit Lichtgeschwindigkeit von der Quelle). Aus dieser Relativgeschwindigkeit ergibt sich dann die Kraft des Feldes (auf eine Ladung), in der entsprechenden Richtung.

Hier gibt es jetzt einen wichtigen Aspekt: Die Änderung der Kraft des Feldes auf eine Ladung, das ist die Feldstärke, die sich wegen der Geschwindigkeit $\vec{v}_Q$ der Quelle ergibt, ändert *nicht* die Richtung, in der sich das Feld bewegt.
Betrachten wir hierzu noch einmal den Teil des Feldes, der sich senkrecht zur Geschwindigkeit der Quelle bewegt: die Geschwindigkeit der Quelle ändert die Richtung, in der die Kraft des Feldes wirkt, ändert aber *nicht* die Richtung, in der sich das Feld bewegt (denn es bewegt sich natürlich weiterhin mit Lichtgeschwindigkeit senkrecht zur Geschwindigkeit der Quelle).

Das bedeutet: die Richtung, in der die Kraft des Feldes wirkt, stimmt nicht mehr mit der Richtung überein, in der sich das Feld bewegt.
Mit etwas anderen Worten: die Wirkungs-*Richtung* des Feldes ergibt sich, wenn zur Lichtgeschwindigkeit $\vec{c}$ des Feldes die Geschwindigkeit $-\vec{v}_Q$ der Quelle addiert wird. Die Richtung, in der sich das Feld *bewegt* (mit Lichtgeschwindigkeit $\vec{c}$) ändert sich dadurch natürlich nicht.
Hier hilft es vielleicht, sich die Wirkungs-Richtung des Feldes wie eine Art Spannungszustand vorzustellen. Das Feld einer ruhenden Quelle hat einen Spannungszustand, der proportional zu $\vec{c}$ ist. Wenn sich die Quelle mit $\vec{v}_Q$ bewegt, dann verändert sich der Spannungszustand um $-\vec{v}_Q$. Dieser Spannungszustand bewegt sich aber natürlich weiterhin mit der $\vec{c}$ des Feldes.

In jedem fall ergibt sich also ein Winkel φ zwischen der Wirkungs-Richtung der Kraft und der Ausbreitungs-Richtung des Feldes. Die Richtung und Stärke der Kraft ergibt sich, wie schon gesagt, aus der Vektoraddition der Geschwindigkeit $-\vec{v}_Q$ der Quelle und der Lichtgeschwindigkeit $\vec{c}$ des Feldes. Zur Berechnung des Winkels φ genügt es, die Komponente von $\vec{v}_Q$ zu nehmen, die senkrecht zur Richtung der Lichtgeschwindigkeit des Feldes ist, das ist $\vec{v}_{Q\perp}$. Es gilt also: $\tan(\varphi) = \frac{v_{Q\perp}}{c}$.
Für den Teil des Feldes, der sich genau senkrecht zur $\vec{v}_Q$ bewegt, ist natürlich $\vec{v}_Q = \vec{v}_{Q\perp}$. Der Betrag der Kraft ($F_E$) des Feldes lässt sich hier ganz einfach berechnen: $F_E = F_C \cdot \sqrt{{v_Q}^2 + c^2}$. Für die

elektrostatische Kraft zwischen zwei Ladungen, die sich nicht bewegen ($\vec{v}_Q = 0$), gilt, wie schon gesagt: $F_E = F_C \cdot c$.
Wir erkennen hier also, dass auch die Kraft des Feldes (auf eine Ladung) senkrecht zur $\vec{v}_Q$ größer ist, als die elektrostatische Kraft (denn $\sqrt{v_Q^{\,2} + c^2} > c$).
Zu dem Fall, dass sich sowohl die Quelle (mit $\vec{v}_Q$) als auch der Empfänger (mit $\vec{v}_E$) bewegen, komme ich später.
Aus dem Winkel φ zwischen der Kraft (bzw. Wirkungs-Richtung) des Feldes und der $\vec{v}_Q$ werde ich die magnetische Kraft ableiten.

Aber ernsthaft: Es ist vollkommen unmöglich, dass die elektrische Kraft in der eben beschriebenen Weise von den Geschwindigkeiten der Ladungen abhängt. Deswegen ist die zweite Annahme (Postulat), die ich zur Erklärung des Magnetismus machen muss, wichtig: das Anti-Feld.

3. Das Anti-Feld

Wenn sich der Empfänger mit der Geschwindigkeit $\vec{v}_E$ bewegt, dann ist die elektrische Kraft, die das Feld einer ruhenden Ladung ($\vec{v}_Q = 0$) auf ihn ausübt: $\vec{F}_E = F_C \cdot (\vec{c} - \vec{v}_E)$.
Wenn sich der Empfänger genau auf die Quelle zu bewegt, ist $F_E = F_C \cdot (c + v_E)$. Doch wir wissen, dass das auf keinen Fall sein kann.
Zu diesem Zweck definiere ich das Anti-Feld. Das Anti-Feld hebt die Wirkung der $\vec{v}_E$ auf die elektrische Kraft wieder auf, wenn die Quelle ruht ($\vec{v}_Q = 0$).
Was ist das Anti-Feld? Das Anti-Feld ist ein Feld, das immer dann entsteht, wenn ein Feld auf eine Ladung wirkt. Es ähnelt einer Reflexion. Das Anti-Feld wirkt in die selbe Richtung wie das Feld und bei ruhenden Ladungen hat es die selbe Stärke wie das Feld. Der wichtigste Unterschied ist der, dass es sich genau in die entgegengesetzte Richtung zum Feld bewegt!

Im elektrostatischen Fall haben Feld und Anti-Feld genau die gleiche Wirkung. Das bedeutet: die Kraft auf eine Ladung kommt genau zur Hälfte vom Feld und zur Hälfte vom Anti-Feld.
Die Kraft durch das Feld ist: $\vec{F}_E = \frac{1}{2} F_C \cdot \vec{c}$. Feld und Anti-Feld bewegen sich in genau entgegengesetzte Richtungen. Wenn sich das Feld mit $\vec{c}$ bewegt, dann bewegt sich das Anti-Feld mit $\vec{c}\,' = -\vec{c}$. Gleichzeitig wirkt das Anti-Feld in die selbe Richtung wie das Feld. Die Kraft $\vec{F}_E'$ durch das Anti-Feld ist also: $\vec{F}_E' = -\frac{1}{2} F_C \cdot (-\vec{c}) = \frac{1}{2} F_C \cdot \vec{c}$. Die Gesamtkraft $\vec{F}_{ER}$ aus Feld und Anti-Feld ist also: $\vec{F}_{ER} = \vec{F}_E + \vec{F}_E' = F_C \cdot \vec{c}$. Das ist die normale elektrostatische Kraft.

Wenn sich die Ladungen bewegen, ist es ein wenig anders.
Wenn sich der Empfänger mit $\vec{v}_E$ bewegt, während $\vec{v}_Q = 0$ ist, dann ändert sich durch diese Geschwindigkeit die elektrische Kraft $\vec{F}_E$ des Feldes auf den Empfänger:

$$\vec{F}_E = \frac{1}{2} F_C \cdot (\vec{c} - \vec{v}_E) = \frac{1}{2} F_C \cdot \vec{c} - \frac{1}{2} F_C \cdot \vec{v}_E .$$

Die Kraft $\vec{F}_E'$ des Anti-Feldes auf den Empfänger ändert sich auch und ist:

$$\vec{F}_E' = -\frac{1}{2} F_C \cdot ((-\vec{c}) - \vec{v}_E) = -\frac{1}{2} F_C \cdot (-\vec{c}) - \frac{1}{2}(-F_C) \cdot (+\vec{v}_E) = \frac{1}{2} F_C \cdot \vec{c} + \frac{1}{2} F_C \cdot \vec{v}_E .$$

Wir erkennen hier, dass der elektrostatische Anteil des Feldes und des Anti-Feldes genau gleich dem Fall ist, wenn $\vec{v}_E = 0$ ist. Es genügt also den zusätzlichen Kraftanteil zu betrachten, der sich durch die $\vec{v}_E$ ergibt. Für das Feld ist dieser $-\frac{1}{2} F_C \cdot \vec{v}_E$ und für das Anti-Feld ist dieser $+\frac{1}{2} F_C \cdot \vec{v}_E$.

Die Summe dieser beiden Anteile ergibt Null ($\frac{1}{2} F_C \cdot \vec{v}_E - \frac{1}{2} F_C \cdot \vec{v}_E = 0$).

Wenn sich also die Kraft vom Feld um $-\frac{1}{2} F_C \cdot \vec{v}_E$ ändert, dann ändert sich die Kraft vom Anti-Feld um $+\frac{1}{2} F_C \cdot \vec{v}_E$. Das hebt sich genau gegenseitig auf.

Wir erkennen also: dadurch, dass sich Feld und Anti-Feld in entgegengesetzte Richtungen bewegen, entsteht durch eine $\vec{v}_E$ des Empfängers keinerlei Kraft-Wirkung. Allerdings nur, solange $\vec{v}_Q = 0$ ist.

Sehen wir uns also an, was passiert, wenn sich die Quelle mit der Geschwindigkeit $\vec{v}_Q$ ($\neq 0$) bewegt.

Das Feld bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit von der Quelle also vom Ort seiner Entstehung weg. Das Anti-Feld bewegt sich genau in die entgegengesetzte Richtung. Es bewegt sich also immer genau auf den Ort der Entstehung des *Feldes* zu.

Das Anti-Feld erscheint immer dann, wenn das Feld auf eine Ladung wirkt. Genau genommen aber lässt sich auch das Feld nur nachweisen, wenn es mit einer Ladung in Wechselwirkung tritt. Vom Feld nimmt man an, dass es grundsätzlich immer vorhanden ist. Ich mache jetzt die selbe Annahme für das Anti-Feld. Auch das Anti-Feld soll immer vorhanden sein. In diesem Sinne kann man das Anti-Feld dann auch nicht als Reflexion verstehen. Hier wäre das Anti-Feld vielmehr ein eigenes Feld, das immer gemeinsam mit dem Feld erscheint. Das Anti-Feld ist genau wie das Feld eine Eigenschaft des Raumes. Beide Eigenschaften, die vom Feld und die vom Anti-Feld erscheinen immer gemeinsam. Ich bin mir sicher, dass es einen Zusammenhang zwischen dem Anti-Feld und den Anti-Teilchen bzw. der Anti-Materie gibt [3]. Die genauen Zusammenhänge sind mir da aber noch nicht ganz klar. Wie auch immer.

Wenn es das Anti-Feld immer gibt, dann ändert sich seine Kraft durch $\vec{v}_Q$ genau wie sich auch die Kraft des Feldes durch $\vec{v}_Q$ ändert. Allerdings bewegen sich Feld und Anti-Feld in entgegengesetzte Richtungen.

Betrachten wir zunächst die Kraft des Feldes und Anti-Feldes auf eine ruhende Ladung ($\vec{v}_E = 0$).

Die Kraft des Feldes auf eine ruhende Ladung wird durch $\vec{v}_Q$ zu $\vec{F}_E = \frac{1}{2} F_C \cdot \left(\vec{c} - \vec{v}_Q\right)$ und die des Anti-Feldes zu $\vec{F}_E = \frac{1}{2} F_C \cdot \left(\left(-\vec{c}\right) - \vec{v}_Q\right) = \frac{1}{2} F_C \cdot \left(\vec{c} + \vec{v}_Q\right)$.

Genau wie in dem Fall, in dem sich der Empfänger mit $\vec{v}_E$ bewegt, während die Quelle ruht, bleibt auch in diesem Fall hier ($\vec{v}_E = 0$, $\vec{v}_Q \neq 0$) nur die elektrostatische Kraft ($\vec{F}_{ER} = F_C \cdot \vec{c}$) übrig.

Als nächstes sehen wir uns an, wie es ist, wenn sich beide, Empfänger und Quelle, bewegen ($\vec{v}_E \neq 0$, $\vec{v}_Q \neq 0$).

4. Der Winkel φ des elektrischen Feldes

Wenn sich die Quelle mit der Geschwindigkeit $\vec{v}_Q$ bewegt, dann ergibt die Vektoraddition aus $\vec{c}$ und $-\vec{v}_Q$ den Winkel φ ($\tan(\varphi) = \frac{v_{Q\perp}}{c}$) für die Wirkungs-Richtung des Feldes. Für das Anti-Feld ergibt sich der Winkel φ' aus der Vektoraddition von $-\vec{c}$ und $-\vec{v}_Q$. Das ergibt zunächst den Winkel $\varphi' = 180° - \varphi$. Allerdings bewegt sich das Anti-Feld zwar in die entgegengesetzte Richtung zum Feld,

aber es wirkt in die selbe Richtung wie das Feld. Die Wirkungs-Richtung wird also um $180°$ gedreht, so dass: $\varphi' = (180° - \varphi) + 180° = 360° - \varphi$.
Das Feld hat also den Winkel φ und das Anti-Feld hat den Winkel φ'. Diese Winkel entstehen durch die $\vec{v}_Q$ der Quelle.
Die Frage ist jetzt: Wie wirken sich die Winkel φ und φ' aus, wenn sich der Empfänger mit $\vec{v}_E$ bewegt?
Nun, durch die $\vec{v}_E$ entsteht die zusätzliche Kraft $\Delta\vec{F}_E = -\frac{1}{2} \cdot F_C \cdot \vec{v}_E$ für das Feld. Durch die $\vec{v}_Q$ wird die Wirkungs-Richtung des Feldes um φ gedreht. Folglich wird auch die zusätzliche $\Delta\vec{F}_E = -\frac{1}{2} \cdot F_C \cdot \vec{v}_E$ um den Winkel φ gedreht. Durch das Anti-Feld entsteht die zusätzliche Kraft $\Delta\vec{F}_E' = +\frac{1}{2} \cdot F_C \cdot \vec{v}_E$. Diese wird um den Winkel $\varphi' = 360° - \varphi$ gedreht.
Jetzt bilden wir die resultierende Kraft aus $\Delta\vec{F}_E$ und $\Delta\vec{F}_E'$.

Zunächst einmal zur Richtung.
Wir wissen, dass elektrische Kräfte abstoßend und anziehend sein können. Im Fall einer Abstoßung wirkt die elektrische Kraft in die selbe Richtung wie die Lichtgeschwindigkeit $\vec{c}$ des Feldes und in die entgegengesetzte Richtung zur Lichtgeschwindigkeit $\vec{c}' = -\vec{c}$ des Anti-Feldes. Das bedeutet, dass sich bei Abstoßung die Richtung der zusätzlichen Kraft des Feldes ($\Delta\vec{F}_E$) direkt aus $\Delta\vec{F}_E = -\frac{1}{2} \cdot F_C \cdot \vec{v}_E$ ergibt (aus dem Vorzeichen und der $\vec{v}_E$). Man kann sich dies leicht klar machen, wenn man einen Empfänger bei abstoßender elektrischer Kraft betrachtet, der sich mit $\vec{v}_E$ direkt auf die Quelle zu bewegt, während außerdem $\varphi = 0$ ($\vec{v}_Q = 0$) ist. Die abstoßende elektrische Kraft des Feldes muss durch die $\vec{v}_E$ in diesem Fall größer werden (und die des Anti-Feldes entsprechend kleiner). Im Falle einer Anziehung zeigen die Kräfte genau in die entgegengesetzten Richtungen.
Sehen wir uns zunächst die Abstoßung genauer an.
Die zusätzliche Kraft durch das Feld ($\Delta\vec{F}_E$) hat ein negatives Vorzeichen. Das bedeutet, dass $\Delta\vec{F}_E$ um $180°$ gegenüber $\vec{v}_E$ gedreht ist. Und zu den $180°$ wird noch der Winkel φ addiert. Der Winkel *von* $\vec{v}_E$ *zu* $\Delta\vec{F}_E$ ist also $180° + \varphi$. Und der Winkel *von* $\vec{v}_E$ *zu* $\Delta\vec{F}_E'$ ist $360° - \varphi$. Die Beträge beider Kräfte sind gleich groß, der Winkel der Resultierenden aus $\Delta\vec{F}_E$ und $\Delta\vec{F}_E'$, das ist $\Delta\vec{F}_{ER}$, liegt also genau in der Mitte: $\frac{(180° + \varphi) + (360° - \varphi)}{2} = 270°$. Der Winkel *von* $\vec{v}_E$ *zur* $\Delta\vec{F}_{ER}$ ist also bei abstoßenden Kräften $270°$.
Bei anziehenden elektrischen Kräften (zwischen ungleichnamigen Ladungen) zeigen die Kräfte genau in die entgegengesetzte Richtung. Der Winkel *von* $\vec{v}_E$ *zu* $\Delta\vec{F}_{ER}$ ist bei anziehenden elektrischen Kräften also $270° - 180° = 90°$.
Man kann dies auch an der F_C sehen. Wenn die F_C bei ungleichnamigen Ladungen positiv ist, dann ist die F_C bei gleichnamigen Ladungen negativ.

Überprüfen wir an einem kleinem Beispiel, ob wir es richtig gemacht haben: Wenn sich gleichnamige Ladungen in die selbe Richtung bewegen, dann schwächt die magnetische Kraft die elektrische Abstoßung. Die $\Delta\vec{F}_{ER}$ muss also in Richtung Quelle zeigen. Das sind $270°$, wie es sein soll. Die $270°$ sind im Urzeigersinn gemessen. Hätte man alle Winkel gegen den Urzeigersinn betrachtet, dann hätten sich $-270°$ ergeben.

Jetzt zum Betrag der $\Delta\vec{F}_{ER}$. Da die $\Delta\vec{F}_{ER}$ genau senkrecht zur $\vec{v}_E$ ist, bedeutet dies, dass sich die Komponenten der $\Delta\vec{F}_{ER}$, die parallel zur $\vec{v}_E$ sind, genau gegenseitig aufheben. Es genügt also, die

Beträge der Komponenten von Feld und Anti-Feld, die senkrecht zur $\vec{v}_E$ sind, zu addieren. Der Betrag der Komponente senkrecht zur $\vec{v}_E$ des Feldes ist $\Delta F_{E\perp} = \tan(\varphi) \cdot \frac{1}{2} F_C \cdot v_E$ und der des Anti-Feldes ist $\Delta F'_{E\perp} = \tan(\varphi) \cdot \frac{1}{2} F_C \cdot v_E$. Die Summe ist
$\Delta F_{ER} = \tan(\varphi) \cdot \frac{1}{2} F_C \cdot v_E + \tan(\varphi) \cdot \frac{1}{2} F_C \cdot v_E = \tan(\varphi) \cdot F_C \cdot v_E$. Und $\tan(\varphi) = \frac{v_{Q\perp}}{c}$. Also ist
$\Delta F_{ER} = F_C \frac{v_{Q\perp} \cdot v_E}{c}$.

Eine kleine Anmerkung: der Winkel zwischen $\Delta\vec{F}_E$ und $\Delta\vec{F}'_E$ ist $(360° - \varphi) - (180° + \varphi) = 180° - 2\varphi$. Der Winkel zwischen $\Delta\vec{F}_E$ und $\Delta\vec{F}'_E$ ist also *nicht* Null. Das bedeutet, dass sich $\Delta\vec{F}_E$ und $\Delta\vec{F}'_E$ nicht gegenseitig aufheben können.

Die $\Delta\vec{F}_{ER}$ entspricht der magnetischen Kraft, ich nenne sie also kurz $\vec{F}_M$ ($\vec{F}_M = \Delta\vec{F}_{ER}$).

5. Die magnetische Kraft

Wir erhalten also eine Kraft mit den Betrag $F_M = F_C \frac{v_{Q\perp} \cdot v_E}{c}$, die immer senkrecht zur Geschwindigkeit $\vec{v}_E$ ist. Der Winkel zwischen $\vec{v}_E$ und $\vec{F}_M$ ist bei gleichnamigen Ladungen immer $270°$ und bei ungleichnamigen Ladungen immer $90°$.
Das entspricht genau den Bedingungen der magnetischen Kraft.
Der Winkel φ des elektrischen Feldes entspricht hier dem Begriff des Magnetfelds. Man muss jetzt nicht mehr vom Magnetfeld sprechen, das als gegeben betrachtet wird, sondern man kann vom Winkel φ sprechen, dessen Entstehung bekannt ist.

Wir wissen, dass die magnetische Kraft von den Relativ-Geschwindigkeiten abhängt. Das bedeutet, dass die Größe der magnetischen Kraft vom Referenz-System abhängig ist. Und das bedeutet, dass die Größe des Winkels φ auch vom Referenz-System abhängig ist.
Ich hatte beschrieben, dass sich der Winkel φ aus der Addition des Vektors $-\vec{v}_Q$ der Geschwindigkeit der Quelle mit dem Vektor $\vec{c}$ der Lichtgeschwindigkeit ergibt. Aus der SRT wissen wir, dass die Lichtgeschwindigkeit für alle Beobachter gleich groß ist. Die Geschwindigkeit $\vec{v}_Q$ der Quelle hängt natürlich vom Referenz-System ab. Während sich also $\vec{v}_Q$ ändert, bleibt $\vec{c}$ konstant; das bedeutet: der Winkel φ ändert sich (in Abhängigkeit vom Referenz-System).
Das ist eigentlich faszinierend: die Größe des Winkels φ hängt vom Beobachter ab. Der Winkel φ ist kein abstraktes Konstrukt. Der Winkel φ ist ein real existierender Winkel. Es ist der Winkel zwischen der Ausbreitungs-Richtung des Feldes (mit $\vec{c}$) und der Wirkungs-Richtung des Feldes. Und doch werden unterschiedliche Beobachter auch unterschiedliche Winkel φ sehen. Aber man kennt solche Phänomene aus der SRT. Dort sind z.B. Raum und Zeit auch ganz real vom Beobachter abhängig.
Die Transformationen zwischen inertialen Referenz-Systemen werden natürlich ganz normal entsprechend der SRT durchgeführt. Dabei ändert sich nicht nur der Winkel φ sondern auch die elektrische Kraft, so dass die Summe beider Kräfte die richtige Beschleunigung ergibt.

Ich habe in dieser Arbeit hier die magnetische Kraft als Folge des Winkels φ des elektrischen Feldes beschrieben. Es macht also Sinn, die magnetische Kraft mittels der elektrischen Kraft ausdrücken zu wollen.

Der Betrag der elektrostatischen Kraft (F_S) ist (wie bereits beschrieben): $F_S = F_C \cdot c$. Der betrag der magnetischen Kraft (F_M) ist also: $F_M = F_S \dfrac{v_{Q\perp} \cdot v_E}{c^2}$.
Wir können also die magnetische Kraft direkt über die elektrostatische Kraft berechnen. Wir müssen weder ein Magnetfeld berechnen, noch das Kreutzprodukt aus $\vec{v}_E$ und dem Magnetfeld.
Man kann z.B. die F_M eines geraden, stromdurchflossenen Leiters auf eine Probeladung berechnen, indem man für den jeweiligen Winkel die F_S und die $v_{Q\perp}$ berechnet und dann über die ganze Länge des Leiters integriert.

Für den Fall, dass $v_{Q\perp} = v_E = c$ gilt, ist $F_M = F_S$. Bei Lichtgeschwindigkeit ist die magnetische Kraft gleich groß der elektrischen Kraft. Für den Fall, dass sich Quelle und Empfänger parallel bewegen, heben sich die magnetische und elektrische Kraft gegenseitig auf. Das bedeutet: wenn sich Ladungen mit Lichtgeschwindigkeit bewegen könnten, dann würden sie keine Kräfte aufeinander ausüben. Solche Ladungen könnten sich also als Pulk gemeinsam bewegen. Ihre Masse könnte dabei allerdings nur noch in Form von Energie existieren, wie bei den Photonen.

6. Elektrodynamik

Eine elektromagnetische Welle entsteht, wenn ein elektrischer Dipol schwingt. Wenn die Ladungen am weitesten voneinander entfernt sind, ändern sich ihre Bewegungs-Richtungen, wobei sie für einen Augenblick zur Ruhe kommen. In diesem Moment ist der Winkel $\varphi = 0$, während das elektrische Feld am größten ist. Wenn sie sich am Durchgangspunkt aneinander vorbei bewegen, ist das elektrische Feld für einen Augenblick (Fast) Null (senkrecht zur Bewegungs-Richtung), während φ am größten ist, weil in diesem Augenblick die Geschwindigkeit v_Q der Ladungen am größten ist. Auf diese Weise entsteht das abwechselnde elektrische und magnetische Feld.
Es gibt hierzu folgende Aussage: Ein sich änderndes elektrische Feld erzeugt ein Magnetfeld und umgekehrt. Das ist im Prinzip die Kernaussage der Elektrodynamik [4]. Sie soll erklären, warum z.B. ein Photon so weit weg von seiner Quelle existieren kann.
Ich habe in dieser Arbeit hier das Magnetfeld über den Winkel φ definiert. Das Problem ist: Ich könnte nicht erklären, warum eine Änderung des Winkels φ ein elektrisches Feld erzeugen sollte. Diese Frage muss offen bleiben.
Ich habe aber natürlich eine Idee, wie es sich verhalten könnte.
Betrachten wir eine einzelne schwingende elektrische Ladung. Durch die Schwingung wird Energie auf das elektrische Feld übertragen. Die Energiemenge, die pro Zeit auf das Feld übertragen wird, ist begrenzt. Das führt dazu, dass auch der Raumbereich des elektrischen Feldes, der zum schwingen gebracht wird, begrenzt ist. Anders gesagt: die räumliche Begrenzung der Schwingung des elektrischen Feldes ergibt sich aus der Größe der zur Verfügung stehenden Energie pro Zeit. Der Grund dafür ist einfach: Für eine bestimmte Frequenz der Schwingung des elektrischen Feldes ist eine bestimmte Energiemenge *erforderlich* (!), für einen bestimmten Raumbereich. Wenn nur eine begrenzte Energiemenge zur Verfügung steht, dann wird diese auch nur einen begrenzten Raumbereich zum schwingen bringen können.
Wenn die Ladung nur für eine begrenzte Zeit*dauer* schwingt, dann ist die Schwingung des Feldes auch in Bewegungs-Richtung ($\vec{c}$) räumlich begrenzt (d.h., die Länge des schwingenden Raum-Bereiches ist begrenzt), das wäre dann ein Energie-Quantum, also z.B. ein Photon.
Der magnetische Anteil, also der Winkel φ, ergibt sich automatisch. Wenn eine Ladung schwingt, dann bewegt sie sich natürlich, und genau so natürlich entsteht durch die Bewegung auch der Winkel φ.
Durch die Schwingung einer Ladung entsteht also zunächst nur eine begrenzte Schwingung ihres elektrischen Feldes, und dieser Schwingung des Feldes prägt sich der Winkel φ auf, der durch die Bewegung der Ladung entsteht.
Üblicher Weise schwingt eine Ladung nicht alleine. Üblicher Weise schwingen Dipole. Auch hier schwingen eigentlich nur die elektrischen Felder, während sich φ automatisch aus der Bewegung

ergibt. Die gegenseitige Abhängigkeit im Erscheinen der elektrischen und magnetischen Felder ergibt sich, weil immer dann, wenn sich die elektrischen Felder gegenseitig aufheben, die Winkel φ am größten sind. Man könnte also annehmen, dass sich das elektrische Feld und das magnetische Feld *nicht* gegenseitig erzeugen, sondern dass sie aufgrund ihrer Entstehung abwechselnd erscheinen. Die Stabilität der Formation ergibt sich aus der Energiemenge, die ein Raumbereich für ein schwingendes elektrisches Feld beinhalten muss.
So ist also z.B. ein Photon die räumlich begrenzte Schwingung eines elektrischen Feldes, die den Winkel φ enthält.
Die Aussage der Elektrodynamik, dass ein sich änderndes elektrisches Feld ein magnetisches Feld erzeugt und umgekehrt, ergibt sich dadurch, dass Änderungen des elektrischen Feldes immer mit Bewegungen von Ladungen einhergehen, wodurch φ entsteht. Im Prinzip liegen allen elektrodynamischen Prozessen Vorgänge zugrunde, die denen ähnlich sind, durch die die elektromagnetischen Wellen entstehen, mit ähnlichen Konsequenzen bezüglich der sich abwechselnden elektrischen und magnetischen Felder.
In diesem Sinne kann der Winkel φ auch auf elektrodynamische Prozesse angewendet werden. Auch hier ist der Winkel φ als Erklärung zur Entstehung des Magnetismus geeignet.

7. Schlusswort

Ich denke, dass ich zeigen konnte, dass der Winkel φ des elektrischen Feldes völlig ausreicht, um die Entstehung der magnetischen Kraft zu beschreiben.
Ich musste hierzu 2 Annahmen machen: die Geschwindigkeits-Abhängigkeit der elektrischen Kraft und das Anti-Feld. Diese beiden Annahmen zusammen erlauben es, die elektrischen und magnetischen Kräfte vollständig und fehlerfrei (wiederspruchsfrei) zu beschreiben.
Ich finde, dass der Erfolg diese beiden Annahmen rechtfertigt.
Die Beschreibung der elektromagnetischen Wellen ist noch nicht vollständig. Dies liegt aber nicht am Winkel φ. Der Winkel φ ist grundsätzlich nicht dazu gedacht, das Ausbreitungsverhalten des elektrischen Feldes im Raum zu beschreiben. Der Winkel φ beschreibt nur die Entstehung der magnetischen Kraft. Für die Beschreibung der elektromagnetischen Wellen werden wohl andere Zusammenhänge nötig sein.
Ich denke aber, dass ich zeigen konnte, dass das magnetische Feld kein eigenes Feld ist, sondern dass es nur ein gewinkeltes elektrisches Feld ist.

Referenzen

[1] A. Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper Annalen der Physik* 17, 891-921 (1905)
[2]Dieter Meschede: *Gerthsen Physik.* 23. Auflage, Springer, Berlin/Heidelberg/New York 2006, ISBN 3-540-25421-8.
[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]James Clerk Maxwell, *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, Royal Society Transactions 155, 1865, Seiten 459–512.