

Inhaltsverzeichnis

Über den Autor.....	7
Vorwort.....	8
1. Einführung	10
1.1 Elektromechanischer Energiewandler	11
1.2 Unterschied zwischen Brushed- und Brushless-Motor	12
1.3 Kein Brushless-Motor ohne Brushless-DC-Regler	14
1.4 Brushless-DC-Motor oder nur Brushless-Motor?.....	15
2. Funktionsweise des Brushless-Motors	16
2.1 Wirkprinzip	16
2.2 Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter im magnetischen Feld.....	19
2.3 Kraftwirkung in der Praxis am Beispiel eines Innenläufers	20
2.4 Mehrere Statornuten und Magnetpole am Beispiel der Außenläufer 6N8P und 12N14P ..	23
2.5 Sternbewicklung und Dreieckbewicklung.....	29
2.6 Erkenntnisse in Kurzform	33
3. Kennzahlen des Brushless-Motors	35
3.1 kV, U/(MinV), rpm/V.....	35
3.2 Wicklungswiderstand	38
3.3 Motorkennlinie	41
3.4 Turns.....	47
3.5 Motorleistung	47
3.6 Bremsbetrieb	50
3.7 Wirkungsgrad.....	51
3.8 Erkenntnisse in Kurzform	55
4. Brushless-DC-Regler	56
4.1 Endstufe.....	57
4.2 Timing und Messung des Phasennulldurchgangs.....	61

4.3 Maximalstrom, Strommessung, Temperaturmessung	67
4.4 BEC-Spannung	69
4.5 Unterspannungsmessung und - abschaltung	71
4.6 Betriebsmodi, Knüppelstellung = Spannung oder Drehzahl	71
4.7 Mikrokontroller und Programmierung	72
4.8 Erkenntnisse in Kurzform	74
5. Lasten	76
5.1 Propeller beim Modellflugzeug	76
5.2 Pitchgesteuerte Modellhubschrauber	79
5.3 Die Schiffsschraube	80
5.4 Beschleunigen und Bremsen beim Modellauto	81
6. Praxisbeispiele	84
6.1 Tabellenhilfe für den Kaufentscheid	84
6.2 Praxistipps für den Motoreinbau und die Verkabelung	86
6.3 Test von verschiedenen Antriebskombinationen	90
6.4 Multiplex Roxxy Antriebskombination	94
6.5 Hacker Motor-und Reglerkombination	95
6.6 Kontronik-Regler und Plettenberg-Motor	98
6.7 Umbau eines Monster-Trucks auf einen LRP-Motor	101
7. Brushless Motoren und -Regler für Multicopter	106
7.1. Spezielle Anforderungen an die Brushless Regler	106
7.2. Technische Ausführungen bei Brushless Reglern für Multicopter	109
7.3 Der Einbau und die Verkabelung bei Multicoptern	115
8. Fehlerquellen	122
8.1 Masseschluss, Windungschluss und Kurzschluss	122
8.2 Lager und Welle	123
8.3 Defekte Reglerendstufe	124
9. Literatur	125
Nachwort	126

2. Funktionsweise des Brushless-Motors

2.1 Wirkprinzip

Bild 5 zeigt eine Prinzipskizze eines Brushless-Motors. Es handelt sich um einen sogenannten Innenläufer. Im Gegensatz zum später auch noch zu behandelnden Außenläufer ist der drehende Teil innen und der feststehende Teil außen. Der drehende Teil heißt Rotor, hier mit dem rot-grünen Permanentmagneten in der Mitte gezeichnet, der feststehende Teil heißt Stator. In der Praxis würde ein Motor nie auf diese Weise gebaut werden. Um die grundlegende Funktion zu verstehen, ist diese Darstellung jedoch gerade richtig.

Viele Eigenschaften kann man bereits anhand dieses Bildes erkennen. Würde man die

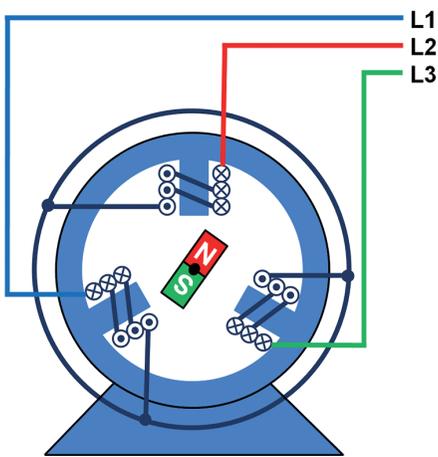


Bild 5: Prinzipskizze eines Brushless-Motors.

Frage stellen, wie man denn einen Brushed- oder Gleichstrommotor am einfachsten von einem Brushless-Motor unterscheiden könne, so würden wohl viele zur Antwort geben: „Ein Brushless-Motor hat drei Kabel im Gegensatz zum Brushed-Motor, welcher nur deren zwei besitzt. Genau das ist auch hier ersichtlich. Jedes der Kabel führt auf eine der drei Spulen des Stators. Diese sind je 120° zueinander versetzt angeordnet. Die Spulenden sind alle miteinander verbunden. Diese Anordnung wird ‚Sternschaltung‘ genannt, die miteinander verbundenen Spulenden ‚Sternpunkt‘. Es gibt auch noch die ‚Dreieckschaltung‘, dies wird jedoch weiter hinten beschrieben.

Bild 6 zeigt die Stellung des Rotors und den zeitlichen Verlauf der drei Ströme, welche durch L1, L2 und L3 fließen. Es ist dabei zu erkennen, dass sie über die Zeit dargestellt sinusförmig verlaufen. Es wird hier genau eine volle Periode, also ein Verlauf über 360° dargestellt. Die drei Ströme sind jeweils um 120° versetzt, in der Reihenfolge L1, L2 und L3. Das kann man sehr schön an den jeweiligen Maximalwerten erkennen. Denkt man sich den Zeitverlauf nun weiter, so folgt 120° nach dem grünen wieder das blaue Maximum. Man könnte also bis ins Unendliche immer wieder den dargestellten Kurvenabschnitt aneinanderreihen. Der dunkelblaue Balken stellt dar, wie groß die drei Ströme zum aktuellen Zeitpunkt gerade sind. Der

Strom durch L1 befindet sich hier also gerade auf dem positiven Maximum, währenddessen die Ströme L2 und L3 gerade auf dem halben negativen Maximum sind, also in die andere Richtung fließen.

Dieser Sachverhalt zeigt sich auch bei der Zeichnung des Motors, links im Bild. Der Strom durch den Leiter L1 zeigt einwärts, die Ströme durch die Leiter L2 und L3 zeigen auswärts. Die Richtungspfeile sind etwas dünner dargestellt, weil sie nur halb so groß sind. Bei einem einwärts zeigenden Strom prägt sich bei der Spule auf der Statorinnenseite ein magnetischer Südpol aus. Entsprechend prägen sich bei den Spulen, welche von den Leitern L2 und L3 gespeist werden, magnetische Nordpole aus. Da statorseitige Südpole die rotorseitigen Nordpole anziehen und umgekehrt, dreht sich der Nordpol des rotorseitigen Permanentmagneten exakt zum einzigen Südpol auf der Statorseite. Der rotorseitige Südpol kommt zwischen die beiden statorseitigen Nordpole zu liegen.

Bild 7 zeigt den Zeitbalken kurze Zeit später. Der Strom durch L2 ist jetzt Null, die beiden Ströme durch L1 und L3 sind fast auf dem Maximum und besitzen das entgegengesetzte Vorzeichen. Entsprechend prägt sich bei der Spule, welche von Leiter L1 gespeist wird, auf der Innenseite ein magnetischer Südpol aus. Bei der Spule, welche von Leiter L3 gespeist wird, prägt sich ein Nordpol aus. Bei der Spule, welche vom stromlosen Leiter L2 gespeist wird, ist weder ein Nord- noch ein Südpol vorhanden. Der Permanentmagnet des Rotors dreht sich so, dass sein Nord- bzw. Südpol dem Süd- bzw. Nordpol des Stators so nahe wie möglich kommt.

Bild 8 zeigt den Zeitbalken noch etwas später. Es prägt sich analog zu den Erklärungen der vorhergehenden Bilder bei der Spule, welche von Leiter L3 gespeist wird, ein magnetischer Nordpol aus. Bei den beiden anderen Spulen sind jeweils magnetische Südpole zu finden. Entsprechend dreht sich der Permanentmag-

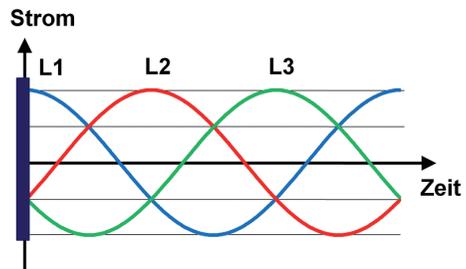
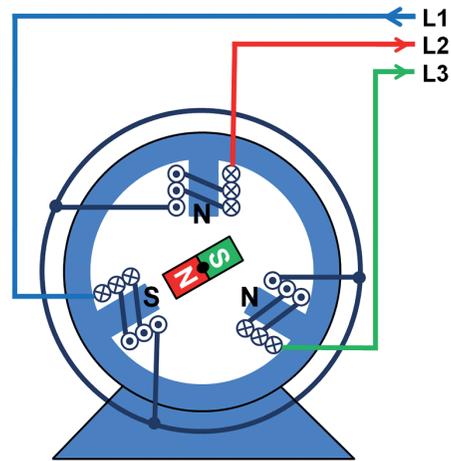


Bild 6: Rotorstellung mit Maximalstrom durch L1.

net des Rotors noch etwas weiter im Uhrzeigersinn. In Bild 9 liegt der blaue Balken so, dass durch L2 der Maximalstrom fließt. Durch L1 und L3 fließen die halben negativen Maximalströme. Entsprechend prägen sich auf den Statorinnenseiten wieder ein Südpol und zwei Nordpole aus. Im Vergleich zu Bild 6 hat jetzt der Strom einen Drittel der Periode durchlaufen, also 120° . Ebenso hat sich auch der Rotorverhalten. Er hat sich zwischen Bild 6, 7, 8 und 9 gerade um einen Drittel einer Umdrehung, also um dieselben 120° gedreht. Denkt man sich die Bewegung des blauen Balkens nun weiter, bis er eine volle Periode durchlaufen hat, dann hat sich auch der Rotor genau einmal um die eigene Achse gedreht.

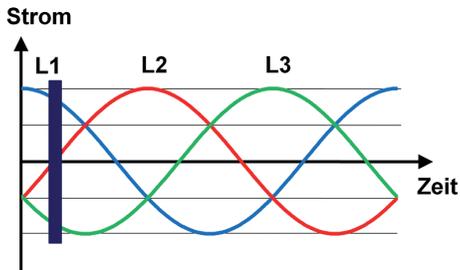
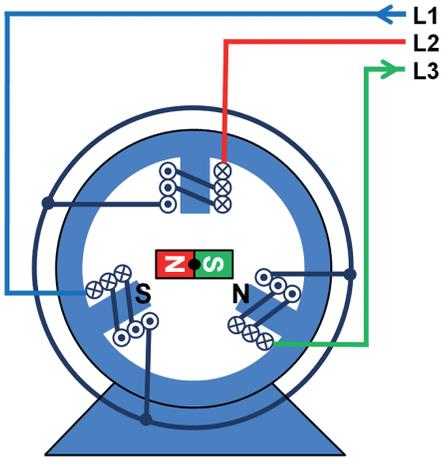


Bild 7: Rotorstellung kurze Zeit später.

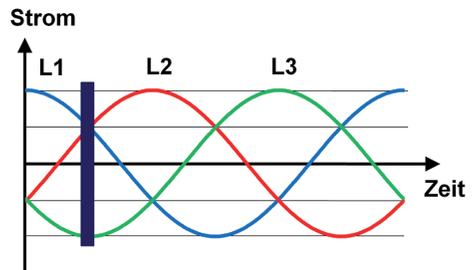
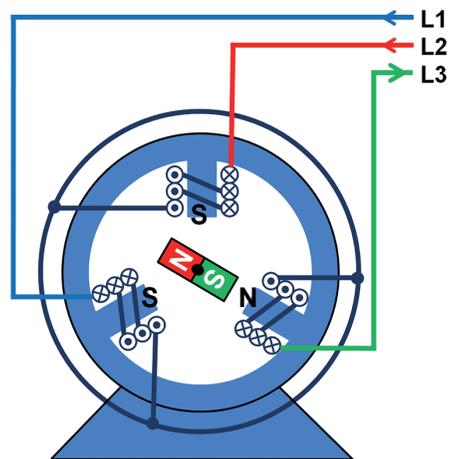


Bild 8: Rotorstellung noch etwas später.

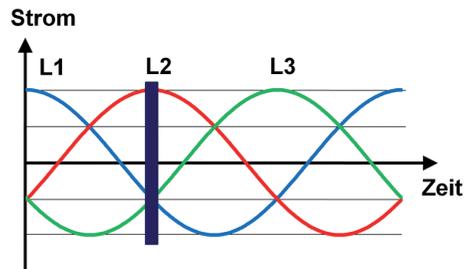
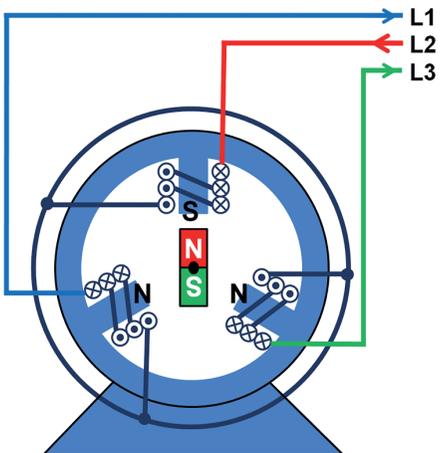


Bild 9: Rotorstellung mit Maximalstrom durch L2.

Die Rotorlage und der Ort des blauen Balkens auf der Zeitachse des Stromverlaufs sind immer miteinander gekoppelt. Man kann auch sagen, dass sich der Rotor synchron mit dem Stromverlauf dreht. Der Name ‚Brushless-Motor‘ hat sich zwar als Begriff mittlerweile durchgesetzt. Die Erfindung ist jedoch nicht neu. Der Brushless-Motor ist in der Literatur auch unter dem Namen ‚Synchronmotor‘ zu finden. Er trägt ihn wegen des oberen Zusammenhangs.

2.2 Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter im magnetischen Feld

Bild 10 zeigt eine Anordnung mit einem stromdurchflossenen Leiter, welcher sich im magnetischen Feld eines Permanentmagneten befindet. Da in Kapitel 3 etwas quantitativ gerechnet wird und es auch zum Verständnis über die realen Innen- und Außenläufer in den Kapiteln 2.3 und 2.4 beiträgt, soll an dieser Stelle eine kurze Beschreibung der Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld folgen. Die entsprechenden Theorien sind in der Literatur unter den Begriffen ‚Lorentz-Kraft‘ oder ‚Lenz’sche Regel‘ zu finden. Der U-förmige Permanentmagnet weist oben einen Nordpol (rot dargestellt) und unten einen Südpol (grün dargestellt) auf. Es sind wie bei allen Magneten sogenannte Feldlinien vorhanden. Würde man diesen Magneten mit der Seite unter ein Papier legen und Eisenspäne darauf streuen, würden sich diese auf der Luftverbindung zwischen Nord- und Südpol auf Linien sammeln. Im Bild sind zwei davon eingezeichnet.

Feldlinien seien gerichtet und in sich geschlossen, heißt es weiter in der Literatur. Die Richtung ist immer vom Nord- zum Südpol, im Bild wird das mit den Pfeilspitzen dargestellt. Tatsächlich sammeln sich auch Eisenspäne entlang von Linien innerhalb des U-Magneten. Die im Bild eingezeichneten zwei Linien laufen also eigentlich über den Permanentmagneten weiter und es ergäben sich tatsächlich in sich

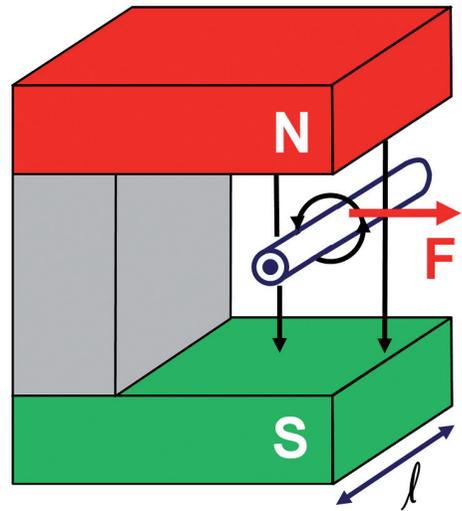


Bild 10: Kraftwirkung auf einen elektrischen Leiter.

geschlossene Linien. Sie sind jedoch der Übersicht halber nicht eingezeichnet. Zur besseren Vorstellung sei jedoch schon jetzt einmal auf das Bild 13 verwiesen. Beim dort dargestellten Innenläufer sind die kompletten in sich geschlossenen Feldlinien gezeichnet.

Auch ein stromführender Leiter weist Feldlinien auf. Sie bilden geschlossene Kreise um ihn herum, so wie das stellvertretend für alle Linien im Bild einmal eingezeichnet ist. Die Richtung ist jetzt wichtig; dazu muss aber etwas weiter ausgeholt werden. Die technische Stromrichtung kann entweder mit einem Pfeil entlang des Leiters oder mit einem Symbol im Querschnitt dargestellt werden. Dazu soll noch einmal Bild 5 betrachtet werden. Die dortigen Leiter der Spulen sind ebenfalls im Querschnitt gezeichnet. Ein Punkt in der Mitte stellt symbolisch eine Pfeilspitze dar. Die technische Stromrichtung kommt also ‚aus dem Bild heraus‘. Ein Kreuz ist symbolisch wie das Leitwerk des Pfeiles, das Ende also, zu verstehen. In diesem Falle ist die Stromrichtung ‚ins Bild hinein‘. Im Bild 10 ist beim Querschnitt vorne ein Punkt gezeichnet. Das heißt, dass die tech-

nische Stromrichtung von hinten nach vorne zeigt. Eine bestimmte Stromrichtung ist immer auch mit der Richtung der magnetischen Feldlinien gekoppelt. Nimmt man die rechte Hand zu Hilfe und zeigt mit dem Daumen in Richtung des Stromes, so weisen die vier restlichen Finger in die Richtung der Feldlinien. Sie zeigen also im Gegenurzeigersinn um den Leiter herum. Dieser Zusammenhang ist auch unter dem Begriff ‚Rechte-Hand-Regel‘ bekannt.

Interessant wird es jetzt aber erst mit der Formel, welche die Kraftwirkung quantitativ beschreibt. Eine Kraft wirkt immer in eine bestimmte Richtung. Sie wird deshalb ebenfalls mit einem Pfeil dargestellt. Auch der Strom und das magnetische Feld (als Berechnungsgröße wird hier die Induktion bzw. die Flussdichte angegeben) werden mit Pfeilen dargestellt. Es sind also alles sogenannte gerichtete Größen, man nennt sie auch Vektoren. Für die Berechnung der Kraft aus der Induktion und dem Strom gibt es jetzt einen Merksatz:

Stehen die Induktion und der Strom senkrecht aufeinander, so steht die Kraft ebenfalls senkrecht auf beiden und hat den Wert:

$$F = B \cdot I \cdot L$$

(Kraft = Induktion × Strom × Länge).

L ist dabei die Länge, auf welcher das magnetische Feld auf den Leiter einwirkt. Wie im Bild dargestellt ist, zeigt die Kraft nach rechts und steht wie im Merksatz angegeben sowohl auf dem Strom als auch auf der Induktion senkrecht. Auch wenn die Kraft in die entgegengesetzte Richtung zeigen würde, stünde sie auf den beiden anderen Größen senkrecht, es gäbe nach diesem Merksatz also zwei Möglichkeiten für ihre Richtung. Um herauszufinden, in welche Richtung sie tatsächlich zeigt, soll folgende Überlegung helfen. Links vom Leiter überlagern sich die beiden magnetischen Felder von Permanentmagnet und Leiter, da sie in dieselbe

Richtung zeigen. Das heißt, dass das Feld dort insgesamt größer wird. Man kann das auch so darstellen, dass die Feldlinien dort dichter stehen. Die Feldlinien möchten jetzt aber gerne den maximalen Abstand zueinander einnehmen, sie möchten den Platz gerne ausnützen. Bildlich gesprochen versuchen sie nun, den Leiter nach rechts wegzudrücken, um diesen Platz zu erhalten. Dies passt auch zu den Verhältnissen auf der rechten Seite des Leiters. Dort zeigt der Pfeil des vom Leiter hervorgerufenen Magnetfeldes nach oben, während der Pfeil des vom Permanentmagneten hervorgerufenen Magnetfeldes nach unten zeigt. Das Feld ist dort also insgesamt kleiner, oder anders dargestellt stehen die Feldlinien dort weiter auseinander. Mit dieser Überlegung kann die Richtung der Kraft eindeutig festgestellt werden. Sie zeigt wie eingezeichnet nach rechts.

2.3 Kraftwirkung in der Praxis am Beispiel eines Innenläufers

Das im letzten Kapitel behandelte Prinzip der Kraftwirkung liegt den meisten Elektromotoren zugrunde. Auch der Brushless-Motor funktioniert auf diese Weise. Um die Funktionsweise der Motoren zu verstehen, müssen also immer Permanentmagnete, welche ein magnetisches Feld verursachen und stromdurchflossene Leiter identifiziert werden. Bild 11 zeigt einen Stator und Bild 12 einen dazu gehörenden Rotor.

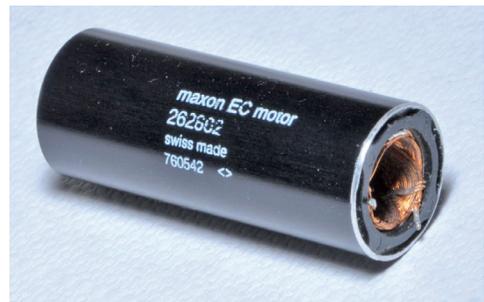


Bild 11: Innenläufer, Stator mit einer eisenlosen Wicklung.



Bild 12: Innenläufer, Rotor mit Permanentmagneten.

Es handelt sich wie im vorhergehenden Kapitel, als das Wirkprinzip beschrieben wurde, um einen Innenläufer. Der Permanentmagnet auf dem Rotor ist ringförmig ausgeführt. Wenn man sich ihm mit einem Süd- oder Nordpol eines anderen Permanentmagneten nähert, dann stellt man beim Drehen fest, dass eine Seite abgestoßen und nach einer halben Umdrehung die gegenüberliegende angezogen wird. Gleich wie schon in Bild 5 dargestellt wurde, gibt es also auch hier genau einen Nord- und einen Südpol bei diesem Rotor. Man sagt in der Fachsprache auch, es handle sich hierbei um einen zweipoligen Rotor oder einen Rotor mit einem Polpaar.

Nimmt man den Stator genauer unter die Lupe und vergleicht ihn mit Bild 5, dann fällt einem sofort auf, dass die Einkerbungen, die sogenannten Nuten, in welche dort die Wicklungen gelegt werden, fehlen. Es scheint hier so, als ob die Wicklung wie ein Fliesenteppich auf die Innenseite des Stators gelegt wurde. In der Tat handelt es sich hierbei um eine sehr häufige Ausführung der Innenläufer, um die sogenannte ‚eisenlose Wicklung‘. Andere Namen dafür sind auch ‚nutenlose Wicklung‘ oder ‚Luftspaltwicklung‘. Wenn die zuvor hergeleitete Theorie hier angewendet werden soll, müssen das die stromdurchflossenen Leiter sein, auf welche es nach den Gesetzen des Magnetismus eine Kraftwirkung gibt.

Bild 13 zeigt eine schematische Darstellung des Motors auf Bild 11 und 12. Der Rotor ist wie oben auch mit einem Permanentmagneten

ausgeführt. Die Feldlinien sind wie im letzten Kapitel gefordert in sich geschlossen. Der Regel getreu, dass ihre Richtung vom Nord- zum Südpol zeigt, verlaufen sie zuerst nach oben. Dann folgen sie dem Radius des Stator-Ringes aus Eisen und treten aus diesem aus, um wieder zum Südpol zu gelangen.

Man könnte sich auch andere Verläufe der Feldlinien vorstellen. Sie könnten ja beispielsweise auch innerhalb des Rotorraumes vom Nord- zum Südpol verlaufen. Dieser Idee spricht jedoch eine weitere Eigenschaft entgegen. Die Feldlinien suchen sich wie viele andere technische Größen auch den Weg des geringsten Widerstandes. Luft, aus welcher der Rotorraum besteht, setzt ihnen einen viel größeren sogenannten magnetischen Widerstand entgegen, als es Eisen, auch ferromagnetisches Material genannt, tut. Sie suchen sich also auf dem Weg vom Nord- zum Südpol immer denjenigen Weg aus, auf welchem sie möglichst viel Eisen und möglichst wenig Luft antreffen. So kommt der im Bild dargestellte Feldlinienverlauf zustande.

Wenden wir uns nun der vorhin etwas despektierlich ‚Fliesenteppich‘ genannten Wicklung zu. Soll das in Kapitel 2.1 behandelte

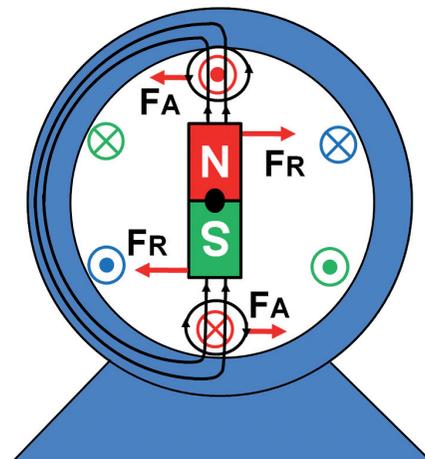


Bild 13: Prinzipskizze des Innenläufers aus Bild 11 und 12.