

Theorie und Konstruktion eines elektrostatischen Motors

Wettbewerb "Jugend Forscht" 2000

Thomas Stegmaier (19 Jahre)

**Arbeitsgemeinschaft "Jugend Forscht"
des Christian-Gymnasiums Hermannsburg
Leitung: StD Thomas Biedermann**

Inhaltsverzeichnis

1	..... Was ist ein „elektrostatischer Motor“?	3
1.1	..... Kolbenmotor	3
1.2	..... Rotationsmotor	3
2	..... Der Motor in der Praxis	4
3	..... Funktionsprinzip	5
4	..... Konstruktion und Aufbau	5
4.1	..... Lichtschranke	5
4.2	..... Computersteuerung	6
4.3	..... Der eigentliche Motor	6
5	..... Potentielle und kinetische Energie des Systems	7
6	..... Kraft dem Anker	8
6.1	..... Kolbenmotor (Plattenkondensator)	8
6.2	..... Rotationsmotor (wie ich ihn konstruierte)	9
6.3	..... Betrachtung des Graphen	10
6.4	..... Fehlerquellen in der Gleichung	11
7	..... Erfahrungen mit meinen Versuchsmotoren	11
7.1	..... Das erste funktionsfähige Modell	11
7.2	..... Das aktuelle verbesserte Modell	12
7.3	..... Weitere mögliche Verbesserungen	12
7.4	..... Was ist noch zu tun?	13
8	..... Fazit	13
9	..... Literatur	14
	..... Danksagung	14

1 Was ist ein „elektrostatischer Motor“?

In der Antike entdeckte man, dass ein bestimmter Stein, wenn man ihn rieb, erstaunliche Eigenschaften zeigte. Funken blitzten, und Haare sträubten sich. Dieser Stein war Bernstein. Nach dem griechischen Namen für Bernstein wurde dann auch der Verursacher dieser mysteriösen Vorgänge benannt: Das Elektron.

Das Elektron besitzt eine Ladung. Normalerweise ist diese negative Ladung durch eine entgegengesetzte positive Ladung gebunden. Durch Reibung an einem Bernstein (oder auch durch Gebrauch eines Hochspannungsgeräts) kann man diese beiden entgegengesetzten Ladungen voneinander trennen. Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab und entgegengesetzte Ladungen ziehen sich an. (Abb. 1) Wenn man z.B. eine Kugel positiv auflädt und eine andere Kugel negativ, so ziehen sie sich an. Kann man diese geheimnisvoll wirkende Kraft für einen Motor verwenden?

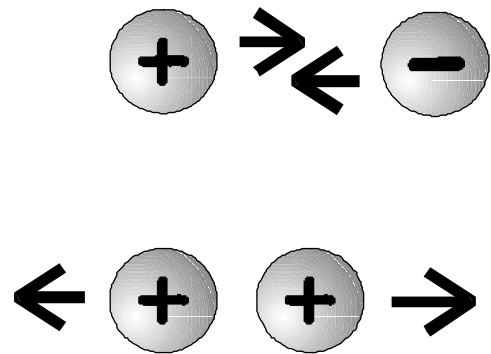


Abb. 1: Entgegengesetzte Ladungen ziehen sich an, gleichnamige stoßen sich ab.

Dieser Aufgabenstellung wollte ich nachgehen. Für einen derartigen Motor gäbe es verschiedene Konstruktionsansätze.

1.1 Kolbenmotor

Man könnte zwei Kugeln nehmen und sie in regelmäßigen Abständen mit gleichnamigen und entgegengesetzten Ladungen versehen. Die Kugeln würden dann wie in einem Kolbenmotor sich hin- und her bewegen. Wie bei diesem Kolbenmotor müsste man dann diese Bewegung in eine kreisförmige Motorbewegung umwandeln. Dieses Motorprinzip hat allerdings den Nachteil, dass die Umwandlung der Pendelbewegung in eine Rotationsbewegung ziemlich aufwendig ist. (Dafür ist im Gegenzug die Berechnung relativ einfach)

1.2 Rotationsmotor

Vorteilhaft wäre es, wenn man direkt aus der Kraft eine kreisförmige Bewegung erzeugen könnte. Einen solchen Motor sieht man in Abb. 2: Der bewegliche Anker im Innern ist zunächst positiv geladen und wird von dem negativ geladenen unbeweglichen Stator angezogen. Sobald er an diesem vorbeigelaufen ist, wird der Stator positiv geladen, der Anker wird dadurch abgestoßen (Abb. 2). Jetzt muss man nur noch regelmäßig die Ladung auf dem Stator ändern, um den Motor immer weiter zu beschleunigen. Das war im Prinzip das komplette Funktionsprinzip des elektrostatischen Motors. Aufgrund der einfacheren Konstruktion habe ich mich für letzteren entschieden.

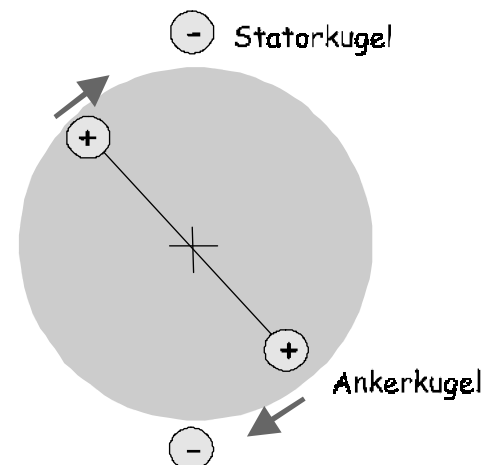


Abb. 2: Elektrostatischer Rotationsmotor

2 Der Motor in der Praxis

Die bei dem Motor wirkenden elektrostatischen Kräfte sind sehr viel schwächer als magnetische Kräfte, wie sie bei einem herkömmlichen Elektromotor genutzt werden. Damit der Motor überhaupt läuft, müssen mehrere Sachen beachtet werden:

Es kommt zunächst darauf an, dass er genügend Kraft entwickelt, um gegen seine eigene Reibung anzukommen.

Geringe Reibung erreicht man durch passende Lager. In diesem Fall habe ich Spitzenlager verwendet, auf denen die Mittelachse ruht. Aufgrund ihrer Leitfähigkeit kann über sie der Anker auf- und entladen werden. (Abb.3) Die Luftreibung des drehenden Systems ignoriere ich erstmal, da diese bei niedrigen Drehgeschwindigkeiten nicht so stark in Erscheinung tritt. Sie lässt sich stark verringern, indem man den Anker strömungsgünstig verkleidet.

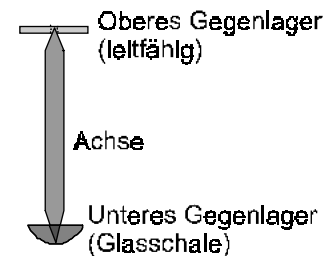


Abb. 3: Das Spitzenlager

Große Kräfte

Der andere Faktor neben der Reibung ist, dass der Motor genug eigene Kraft entwickelt. Die Kraft, welche zwei Ladungen aufeinander ausüben, ist abhängig von ihrer Größe und ihrem Abstand zueinander. Für die Kraft gilt:

$$F \approx \frac{Q_1 * Q_2}{d^2}$$

Kleiner Abstand

Da der Abstand der Ladungen im Nenner mit seinem Quadrat in die Gleichung eingeht, ist vor allem ein kleiner Abstand zwischen Anker und Stator nötig. Deshalb setzt man ganz viele einzelne Statorplatten kreisförmig um das Zentrum. So hat der Anker immer nur einen kleinen Abstand zum nächsten Stator. Statt der Kugeln werden Platten genommen, da sie einfacher anzufertigen sind.

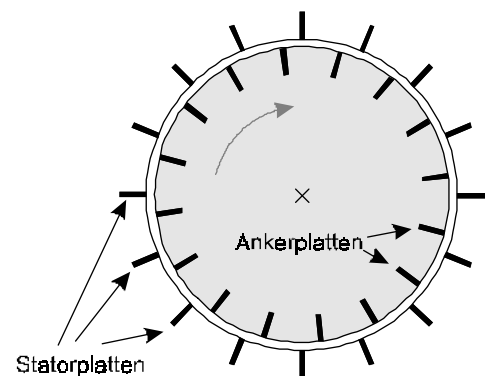


Abb. 4: Anordnung der Anker- und Statorplatten

Große Ladung

Im Gegensatz zum Abstand müssen die Ladungen auf Anker und Stator möglichst groß sein. Um dies zu erreichen, gibt es mehrere Möglichkeiten:

Hohe Spannung

Die Ladung auf dem steigt mit der angelegten Spannung an, deshalb sollte diese möglichst groß sein. Diese lässt sich am besten durch ein Hochspannungsgerät erzeugen, auch das Steuern der Ladungen wird dadurch einfach. der Nachteil einer hohen Spannung ist in Verbindung mit dem geringen Abstand die Gefahr von Überschlügen.

Große Plattenflächen

Die Ladung bei einer vorgegebenen Spannung lässt sich erhöhen durch eine große Plattenfläche, da auf eine größere Fläche bei gleicher Ladungsträgerdichte mehr Ladung paßt.

Anzahl der Anker- und Statorplatten erhöhen

Wenn man mehrere Anker- und Statorplatten nimmt, steigt die mögliche Ladungsmenge, da über eine große Anzahl Platten praktisch die Plattenfläche erhöht wird. (Abb.4)

Einfügen eines Dielektrikums zwischen die Platten

Ein Dielektrikum erhöht die Stärke des elektrischen Feldes zwischen Anker- und Statorplatte. Damit vergrößert sich die Kraft, die auf die Platten wirkt.

3 Funktionsprinzip

Eine Ankerplatte A1 befindet sich zunächst (Zeitpunkt t_0) in einer Position wie in Abb.5a gezeigt. Sie ist positiv geladen, also üben beide Statorplatten S1 und S2 auf sie eine anziehende Kraft aus.

Da S2 aber näher ist, wird die Ankerplatte von dieser Platte stärker angezogen. Die Ankerplatte beschleunigt Richtung S2. Nach einer Weile hat die Ankerplatte S2 erreicht und bewegt sich auf Grund ihrer Trägheit noch darüber hinaus (t_1). Wenn man nichts ändert, wird sie dann aber wieder abgebremst. Schaltet man allerdings die Hochspannung zwischen Anker und Stator ab, werden die Ladungen entfernt und A1 kann sich ungehindert weiterbewegen. (Abb.5b) Sobald sie näher an S3 als S2 ist, schaltet man die Hochspannung wieder ein. (t_2) A1 wird von S3 stärker angezogen also von S2, also weiter beschleunigt. (Abb. 5c) Dieser Prozeß läuft kontinuierlich ab.

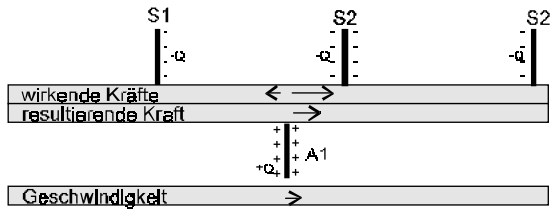


Abb. 5a: Anfängliche auf den Anker wirkende Kräfte

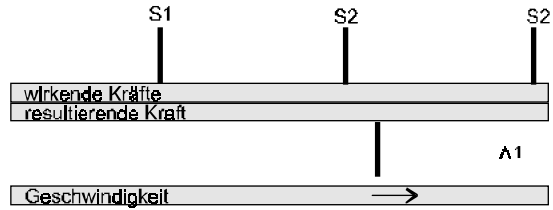


Abb. 5b: Zum Zeitpunkt t_1 auf den Anker wirkende Kräfte

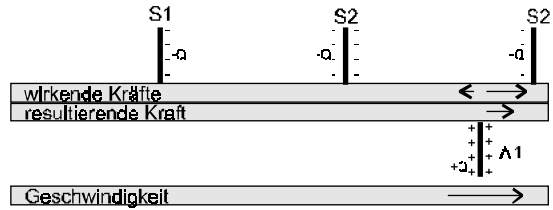


Abb. 5c: Zum Zeitpunkt t_2 auf den Anker wirkende Kräfte

4 Konstruktion und Aufbau

4.1 Lichtschranke

Um die Hochspannung zu steuern, wird über eine Lichtschranke die Position abgefragt. Ein Band, das durch die Lichtschranke verläuft, ist nur an den Stellen durchsichtig, an denen die Hochspannung angeschaltet sein muss. Eine Elektronik prüft ab, ob die Photodiode der Lichtschranke gerade Licht empfängt. Entsprechend wird die Hochspannungsquelle an- oder ausgeschaltet.

Eine zweite Lichtschranke dient dazu, den genauen Ort der Ankerplatte festzustellen. Wenn nämlich die Hochspannung rechtzeitig abschaltet, bevor die Ankerplatte die Minimalentfernung zur Statorplatte erreicht hat, können Hochspannungsüberschläge nicht so einfach auftreten. Die Spannung kann also höher werden, ohne dass Überschläge auftreten, und damit steigt auch die wirkende Kraft. Allerdings wird ein Teil der möglichen Beschleunigungsstrecke durch diesen „Trick“ nicht mehr genutzt, weshalb die übertragene Energie geringer wird. Hier muss man einen günstigen Kompromiss finden.

4.2 Computersteuerung

Bei dem jetzigen Aufbau werden die Auswertung der Lichtschranken und das Steuern der Hochspannung der Einfachheit halber von einem Computer übernommen (Abb.6), da eine autonome Steuerungselektronik aufwendiger ist (dafür aber auch schneller, könnte bei künftigen höheren Drehzahlen notwendig werden). Die Computersteuerung hat auch den Vorteil, dass aus der von der Lichtschranke „gemeldeten“ Zeitdauer die Umdrehungszahl bestimmt werden kann. Die von mir festgestellten Umdrehungszahlen liegen derzeit etwa im Bereich von 0,5 ... 2 Umdrehungen pro Sekunde.

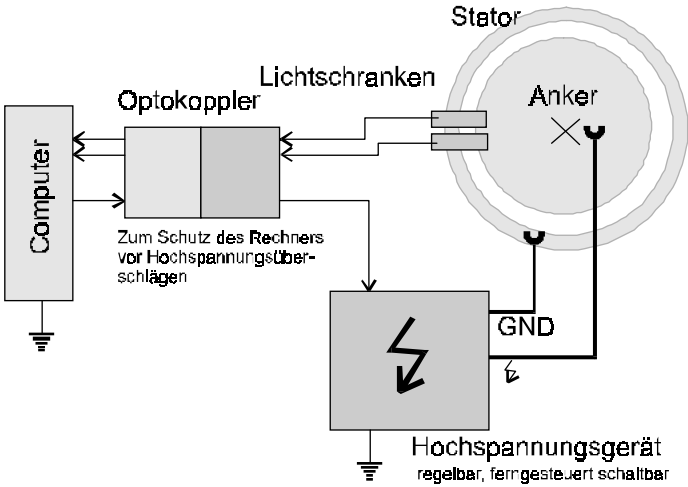


Abb. 6: Schematische Skizze des Gesamtaufbaues

4.3 Der eigentliche Motor

Der Motor selbst besteht prinzipiell aus dem drehbaren Anker und dem feststehenden Stator. (Abb.7, Abb.8) Der Anker ist aus zwei Pappscheiben zusammengesetzt, die außen die aus Alufolie gefertigten Ankerplatten tragen. Durch die Mitte geht eine Stahlachse, deren Endenscharf zugespitzt wurden und ein Spitzenlager darstellen. Das untere Spitzenlager ruht in einer Glasschale, in der es sich reibungsarm drehen kann (wie bei einer Weihnachtspyramide). Das obere Spitzenlager ruht in einem Loch in einer Aluplatte, die auch den Kontakt mit der regelbaren Hochspannungsquelle herstellt. Die Achse ist elektrisch leitend mit den Ankerplatten verbunden. Der Stator besteht ebenfalls aus zwei Pappträgern, die die Statorplatten tragen.

Anker und Stator bestehen jeweils aus 16 Alufolieplatten. (mit stabilisierender Pappeinlage). Jede Platte hat eine Breite von 1cm und eine Höhe von 5cm. Die restlichen Maße lassen sich Abb.7 entnehmen.

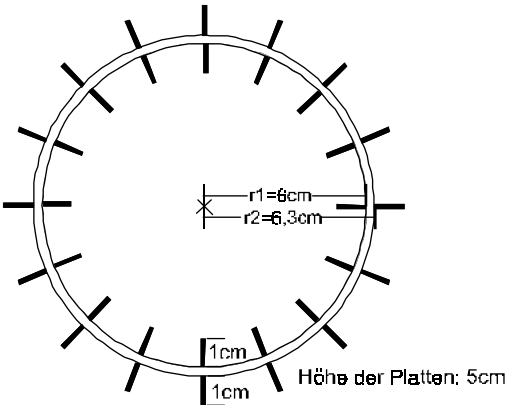


Abb. 7: Abmessungen des Motors

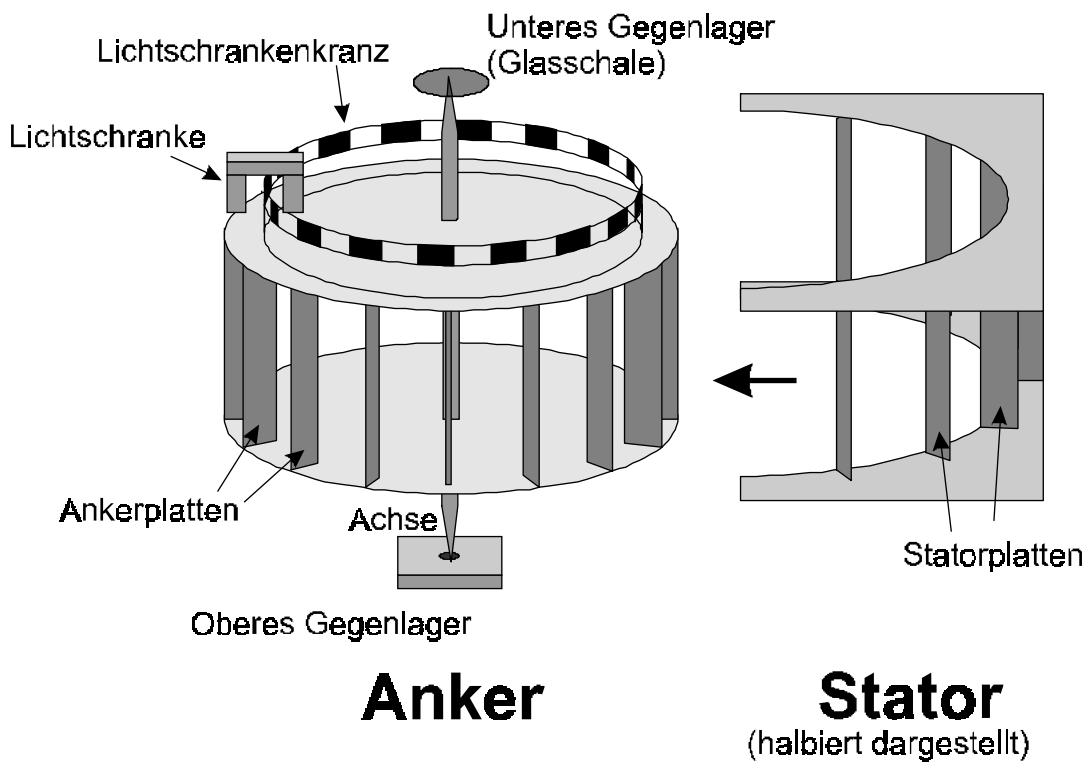


Abb. 8: Die Motorkonstruktion - Aufriss

5. Potentielle und kinetische Energie des Systems

Jede der Statorplatten bildet in Verbindung mit einer Ankerplatte einen Kondensator (Abb.9). Aus dem daraus hervorgehenden Ersatzschaltbild des eigentlichen Motors lässt sich entnehmen, dass die Kondensatoren parallel geschaltet sind. Im Prinzip besteht der ganze Motor nur aus parallel geschalteten Kondensatoren.

Durch das Bewegen einer Ankerplatte ändern sich die Kapazitäten des Systems.

Ich betrachte jetzt einen einzelnen dieser Kondensatoren. Bei ihm haben sich die Platten aufeinanderzubewegt, also hat sich auch seine Kapazität erhöht. Gleichzeitig wurde auf die eine Platte eine Kraft ausgeübt, da sie beweglich ist, wird sie beschleunigt, am Ende hat sich ein Teil der potentiellen in kinetische Energie umgewandelt

Wenn auf den Platten eine konstante Ladung ist, wird die Sache einfach: Da wegen des Energieerhaltungssatzes die Summe der potentiellen und der kinetischen Energie konstant ist, wird die Differenz an potentieller Energie direkt in kinetische Energie umgewandelt:

$$\Delta W_{kin} = -\Delta W_{pot}$$

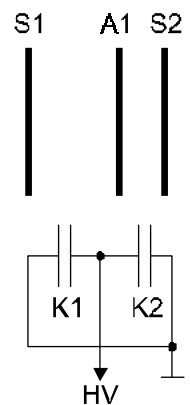


Abb. 9: Ersatzschaltbild

Im nächsten Absatz soll gezeigt werden, dass dies auch dann noch gilt, wenn die angelegte Spannung konstant ist und es sich deshalb um ein offenes System handelt.

6. Kraft dem Anker

6.1 Kolbenmotor (Plattenkondensator)

Im Gegensatz zum Rotationsmotor ist der Kolbenmotor ein gutes Beispiel eines Plattenkondensators (da Platten parallel, nah aneinander, und großflächig). Da dieser einfacher zu berechnen ist werde ich damit beginnen, es läßt sich so auch die These aus dem vorhergegangenen Absatz beweisen.

Bei einem Plattenkondensator gilt

$$F = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d^2} \cdot U^2 \quad [1]$$

Da auf die Ankerplatte diese Kraft wirkt und sie sich von s_1 nach s_2 bewegt, wird Arbeit verrichtet:

$$\begin{aligned} \Delta W_{kin} &= \int F(d) \cdot dd \\ &= \frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot U^2 \cdot A \cdot \int_{s_1}^{s_2} \frac{1}{d^2} \cdot dd \\ &= \frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot U^2 \cdot A \cdot \left[-\frac{1}{d} \right]_{s_1}^{s_2} \\ &= -\frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot U^2 \cdot A \cdot \left(\frac{1}{s_2} - \frac{1}{s_1} \right) \end{aligned}$$

Die Energie eines geladenen Kondensators ist

$$W_{pot} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot U^2 \cdot \frac{A}{d}$$

Die Differenz der potentiellen Energie ist dann

$$\Delta W_{pot} = W_{pot2} - W_{pot1} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot U^2 \cdot A \cdot \left(\frac{1}{s_2} - \frac{1}{s_1} \right)$$

Damit ist

$$\Delta W_{kin} = -\Delta W_{pot}$$

Die hinzugewonnene kinetische Energie ist also allein abhängig von der zurückgelegten Strecke (bei sonstigen Konstanten), nicht von der Zeitdauer, die der Anker für diese Strecke benötigt. Das bedeutet, die übertragene Energie pro Bewegung ist konstant. Beim Kolbenmotor sollte man danach die Spannung abschalten und warten, bis der Anker sich wieder in einer Position befindet, von der aus er beschleunigt werden kann. Bei n solcher Durchläufe pro Sekunde wird die folgende Energie übertragen:

$$W_{kin ges} = n \cdot \Delta W_{kin} = n \cdot \Delta W_{pot}$$

Dies bedeutet, dass die entnehmbare Energie mit zunehmender „Drehzahl“ recht linear ansteigt, anders als bei einem normalen Elektromotor, bei dem die Kraft und damit die entnehmbare Energie mit zunehmender Geschwindigkeit abnimmt.

6.2 Rotationsmotor (wie ich ihn konstruierte)

Beim Rotationsmotor ist die Berechnung der Kraft mit der des Kolbenmotors vergleichbar, da bei beiden die Kraft zwischen zwei Platten wirkt, nur dass diese bezüglich einander versetzt sind. Mein erster Gedanke ging dahin, mir die Ladungen auf den Platten als sehr viele Punktladungen vorzustellen, und die insgesamt wirkende Kraft als (vektorielle) Summe aller aufeinander wirkender Kräfte zu berechnen. Leider musste ich feststellen, dass meine Kenntnisse hierfür (noch) nicht ausreichen (z.B. kann ich die stattfindende Influenz, die überhaupt erst die hohe Kapazität eines Plattenkondensators ausmacht, nicht berechnen).

Anziehung zwischen einer Platte und einem Anker

Statt dessen betrachte ich das System weiterhin als Plattenkondensator, mit drei Besonderheiten:

- Die wirksame Plattenfläche A verringert sich
- Der wirksame Abstand d der Platten erhöht sich
- Die insgesamt wirkende Kraft F_0 hat nicht mehr die gleiche Richtung wie die gewünschte Kraft, und muss in eine wirksame und eine unwirksame Komponente zerlegt werden.

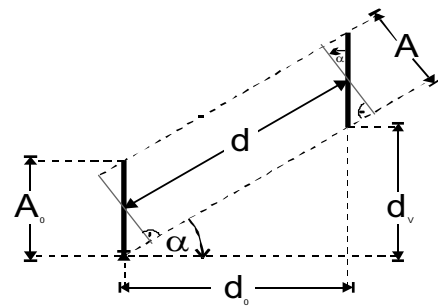


Abb. 10 geringere Plattengröße und größerer Abstand beim realen Motor

Aus den Abbildungen wird ersichtlich, dass

$$(1) \quad \frac{d_0}{d} = \cos \alpha$$

$$(2) \quad \frac{A}{A_0} = \cos \alpha$$

$$(3) \quad \frac{F}{F_d} = \cos \alpha$$

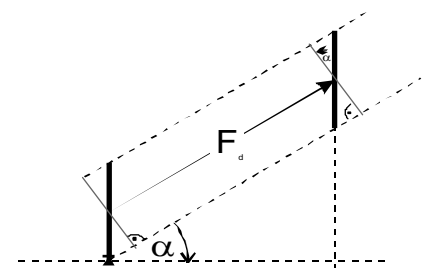


Abb. 11 Kräfteteilung beim realen Motor

Die Variable d ist noch nicht bekannt, sie lässt sich sowohl trigonometrisch als auch nach dem Satz des Pythagoras berechnen.

Nach Pythagoras:

$$(4) \quad d^2 = d_0^2 + d_v^2$$

Trigonometrisch:

$$\frac{d_v}{d_0} = \tan \alpha$$

ergibt in (1) eingesetzt und aufgelöst:

$$(5) \quad d = \frac{d_0}{\cos \arctan \left(\frac{d_v}{d_0} \right)}$$

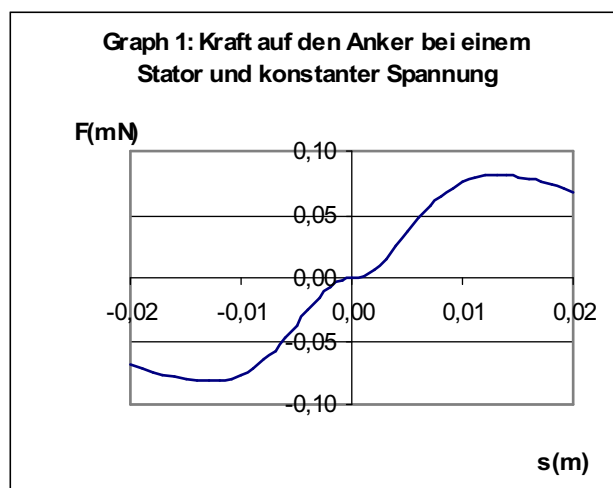
Im Folgenden gebrauche ich die Pythagoräische Variante, da sie einfacher ist (Das Ergebnis ist allerdings gleich). Für die jetzt zwischen den Platten erzeugte Kraft F_d gilt (-> Plattenkondensator)

$$F_d = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot U^2 \cdot \frac{A}{d^2}$$

Da diese Kraft nicht komplett in die Richtung zeigt, in die die spätere Kraft F wirkt, muss sie in ihre Komponenten zerlegt werden, dann gilt

$$F = F_d \cdot \frac{d_0}{d} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot U^2 \cdot \frac{A}{d^2} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot U^2 \cdot \frac{A_0 \cdot d_0^2}{(d_0^2 + d_v^2)^2}$$

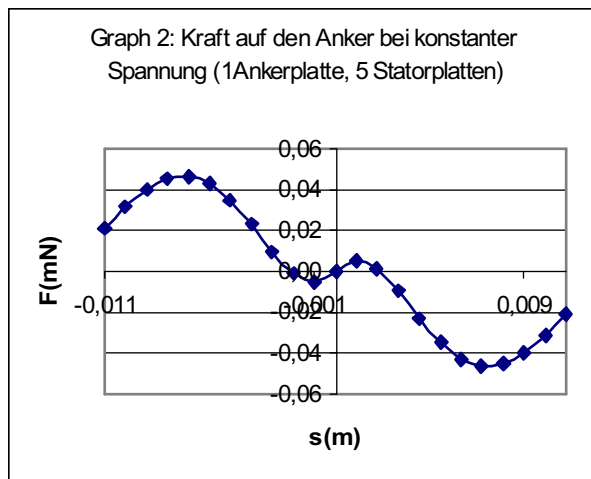
Für $d_v=0$ geht die Gleichung für F in die für F_d über.

6.3 Betrachtung des Graphen

Der erste Graph zeigt die Kraft zwischen Anker und Stator bei konstanter Spannung von $U=5\text{kV}$ an. Die restlichen Werte sind dem realen Aufbau entnommen (Abb. 7). Zunächst fällt auf, dass ab einem bestimmten Punkt die Kraft nicht mehr (wie bei einem normalen Plattenkondensator) ansteigt, sondern wegen der nötigen Kräftezerlegung abfällt. Dies deckt sich mit der groben Beobachtung des laufenden Motors. Allerdings fällt der Graph zu früh rechts ab. Durch den Parameter d_v wird bestimmt, wie weit der Hochpunkt nach links verschoben

wird, je kleiner d_v ist, desto weiter links ist der Hochpunkt. Der Grund für den verfrühten Abfall des Graphen liegt an der ungleichmäßigen Ladungsverteilung auf den Platten. Die Ladungsdichte konzentriert sich an den Stellen, wo der Abstand der Ladungen am geringsten ist, weshalb das reale d_v deutlich kleiner ausfallen dürfte, hier kommt man mit der rund Hälfte des Originalwertes am besten hin.

Der zweite Graph zeigt das Ergebnis, wenn mehrere Kurven sich überlagern, da der Anker von mehreren



Statoren angezogen wird. Hier zeigt sich erst recht die Schwäche der wirkenden Kraft. Dargestellt wird hier ein Anker der von insgesamt 5 Statoren angezogen wird, die sich im Abstand von jeweils zueinander 2,3 cm befinden. Die y-Achse stellt sozusagen den mittleren Stator dar. Damit der Graph genau in der Mitte zwischen den Statoren die x-Achse schneidet, müssten noch mehr Statoren miteingerechnet werden. (Anmerkung: d_v wurde angepasst, um einen realeren Hochpunkt zu erzielen, $d_v=1$ cm statt

$d_v=1,3$ cm). Interessant ist, dass bei sehr geringem Abstands des Ankers vom Stator eine bremsende Kraft eintreten kann, da hier der mittlere Stator kaum noch eine Kraft auf den Anker ausübt, der nächstgelegene weitere Anker aber schon.

Leider konnte ich bisher den Graphen nicht mit echten Messwerten vergleichen, da durch das An- und Abschalten der Hochspannung (noch) Fehler bei den Lichtschranken hervorgerufen werden. Beobachten konnte ich dagegen schon, dass die Beschleunigung des Ankers etwa mit dem Graphen übereinstimmt. Der größte Beschleunigung kann in dem Bereich beobachtet werden, in der der Graph seinen Hochpunkt hat. Darüber hinaus hatte ich die Beobachtung, dass der Anker kurz vor Erreichen des Stators deutlich abbremst, schon am Aufbau beobachtet, aber eine anders begründet (Ladungsverschiebung zwischen den Kondensatoren, wahrscheinlich spielen beide Aspekte eine Rolle). Ich bin dann mehr darüber gestolpert, dass der Graph darüber eine treffende Aussage macht.

Der Gleichung kann man entnehmen, dass ein möglichst kleiner Versatz zwischen den Platten sinnvoll ist, doch allein durch die Größe der Platten gibt es einen Minimalwert hierfür. Ich vermute, dass es bei feststehendem Versatz d_v eine optimale Entfernung der Statoren zueinander gibt. Dies wurde von mir aber noch nicht weiter bearbeitet.

6.4 Fehlerquellen in der Gleichung

Diese Gleichung enthält noch mehrere Fehlerquellen, beim wirklichen System

- besteht kein echter Plattenkondensator, da
 - die Platten zu weit auseinander sind
 - die Ladungsverteilung auf den Platten ungleichmäßig ist
 - die Platten nicht parallel sind
- besitzt der versetzte Kraftangriffspunkt (d_v) keine feste Größe
- schirmen sich die Platten gegenseitig ab

7 Erfahrungen mit meinen Versuchsmotoren

7.1 Das erste funktionsfähige Modell

Der erste Prototyp basierte auf einem aus Styropor ausgeschnittenen Stator und einem entsprechend geformten und eingepassten Anker. Die Kondensatorflächen bestanden auch hier aus Aluminiumfolie, die in schmale Schlitz des Ankers eingebettet waren, um eine zusätzliche Luftverwirbelung und die damit verbundene Reibung zu minimieren. Er verfügte über 8 Ankerflächen und 16 Statorflächen. Zunächst konnte dieser Motor sogar ohne jede Steuerung betrieben werden, da eine nicht geplante regelmäßige Funkenentladung zwischen den Kondensatorflächen für die notwendige Entladung der Platten führte. an diesem Modell habe ich erstmals auch die Lichtschrankensteuerung erprobt und durch eine computer-gestützte Überwachung der aktuellen Ankerposition und dementsprechender Steuerung der Hochspannung optimiert.

Das Einfügen eines Dielektrikums im Luftspalt zwischen Anker und Stator sollte die Eigenschaften eigentlich verbessern, aber zu diesem Zeitpunkt konnte ich noch nicht erkennen, dass dieses gleichzeitig den Abfluss der Ladungen reduzierte und damit den Wirkungsgrad des Motors eher verschlechterte als verbesserte.

Ohne Dielektrikum erreichte ich mit der Computersteuerung letztendlich etwa 1 Umdrehung pro Sekunde, während ich mit Dielektrikum nur noch 0,3 - 0,4 Umdrehungen pro Sekunde erzielen konnte. Zunehmende Reibungsverluste im unteren - noch aus Stahl konstruierten - Lager führten schließlich dazu, dass der Motor überhaupt nicht mehr lief und ich mir Gedanken über eine verbesserte Version machen musste.

7.2 Das aktuelle verbesserte Modell

Bei diesem betragen die Abstände zwischen den Platten von Anker und Stator nur noch ein Viertel des ersten Modells, da ich den Radius des Systems halbiert und zusätzlich die Plattenanzahl verdoppelt habe. Damit ist auch die Kondensatorfläche verdoppelt worden. Während der erste Typ etwa 10 KV Betriebsspannung benötigte, reichen jetzt bereits rund 2,5 KV für einen kontinuierlichen Betrieb des Motors aus. Da sich bei dem ersten Motor herausgestellt hatte, dass vor allem die Anziehungskraft der durch Influenz ungleichnamig geladenen Platten, nicht aber die Abstoßung der nur durch den Potentialunterschied zur Umgebung ungleichnamig geladenen Platten einen nennenswerten Beitrag zur Bewegung liefert, habe ich hier alle Statorplatten mit Masse und alle Ankerplatten mit dem positiven Pol der Hochspannungsquelle verbunden (zuvor wechselten sich im Stator geladene und geerdete Platten ab). Der neue Motor ist bei 10 kV nicht betriebsfähig, vorzeitige Funkenüberschläge stören die Elektronik und behindern eine sauber geregelte Hochspannung (Im steuerungs-freien Modus läuft er dagegen auch bei 10 kV)

Bei der typischen Betriebsspannung von 5 KV, bei der keine Überschläge auftreten, bewegt er sich mit

1,2 Umdrehungen pro Sekunde.

7.3 Weitere mögliche Verbesserungen

Zur Erhöhung der Feldstärke sollte wieder ein Dielektrikum eingefügt werden, das allerdings so beschaffen sein muss, dass es die Entladung der Platten durch eigene elektrostatische Aufladungen nicht verzögert. Es hätte zusätzlich den Vorteil, dass eine höhere Betriebsspannung verwendet werden kann, ohne dass es zu Funkenentladungen kommt.

Eine Verkleidung des Stators - eventuell mit dem Einfügen eines Dielektrikums - würde den durch seine offene Bauform deutlich vergrößerten Luftwiderstand ebenfalls stark reduzieren.

Auf jeden Fall muss die Ursache der Elektronikstörungen beseitigt werden, evtl mit einer Abschirmung derselben.

7.4 Was ist noch zu tun?

Bislang habe ich lediglich zeigen können, dass ein solcher Motor nach den eingangs beschriebenen Überlegungen tatsächlich funktionsfähig ist. Die Bestimmung der elektrischen Energie verlangt die Messung sehr kleiner Ströme bei hohen Spannungen, was mit den mir derzeit zur Verfügung stehenden Mitteln noch nicht gefahrlos für die Geräte möglich ist. Eine Abschätzung der mechanischen Energie ließe sich z.B. über das Trägheitsmoment des Motors und die für das Beschleunigen oder Abbremsen benötigte Zeit vornehmen. Auch denkbar wäre es, über einen Faden, der von der Achse angetrieben wird, ein Gewicht anzuheben (ähnlich wie bei dem bekannten Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wärmekapazität von Wasser mit einer Kupfertrommel), wobei das Gewicht so eingestellt wird, dass der Motor mit einer vorgegebenen Drehzahl konstant läuft. Sobald die Elektronik weitgehend störungsfrei läuft, kann auch die Theorie mit der Praxis verglichen werden.

8 Fazit

Die Konstruktion eines lauffähigen elektrostatischen Motors ist prinzipiell möglich, sein Laufverhalten ist berechenbar. Im Vergleich mit einem normalen elektromagnetischen Motor zeigen sich sowohl Vor- als auch Nachteile, die ihn für die Arbeit in miniaturisierten Systemen sinnvoll erscheinen lassen.

Nachteile:

- Hauptproblem: Die bei ihm genutzten Coulombkräfte sind sehr viel schwächer als magnetische Kräfte. Aufgrund dieser sind kleine Maße vorteilhaft. (siehe Vorteile ;-)
- Bei der Motorsteuerung müssen Spannungen geregelt werden. Dies ist im Vergleich zu Strömen zunächst komplizierter.
- Da hohe Spannungen nötig sind, um ausreichende Kräfte zu erzielen, können leicht Funkenüberschläge auftreten.

Vorteile:

- Die fließenden Ströme sind sehr gering, so dass keine starken Kabel genommen werden müssen.
- je kleiner der Motor wird, desto stärker werden die Coulombkräfte. Er eignet sich daher für Miniaturmotoren (keine großen Ströme!)
- mit steigender Drehzahl steigt die entnehmbare Energie recht linear an, da die auf den Motor pro Umdrehung übertragene Energie konstant ist. Daher können bei geringer Reibung sehr hohe Drehzahlen erreicht werden.
- Bei einem Anhalten des Motors erzeugt dies im Gegensatz zu einem normalen Elektromotor keinen Kurzschluss. Wenn man Funkenüberschläge vermeidet, ist er kurzschlussicher.

9 Literatur

- [1] Sieber: Mathematische Formeln, Klett-Verlag, Stuttgart 1996
- [2] Höfling: Physik - Formeln und Einheiten Sekundarstufe II, Aulis, Köln 1997
- [3] Eigene Aufzeichnungen aus dem Unterricht, „Kräfte in Feldern“, LK Physik, 1999

Danksagung

Auch wenn dies eine Einzelarbeit ist, alleine hätte ich sie nicht geschafft. Gedankt werden soll vor allem Herrn Biedermann und Familie, dass sie mein häufiges Quengeln ertrugen und bei den nervigen Alltagsfragen („wo ist der Silberdraht?“) behilflich waren. Gerade Herr Biedermanns Physikunterricht wirkte sehr belebend und er selbst scheute sich nicht, im Unterricht aufplötzliche Geistesblitze fachkundig zu antworten. Auch den anderen JuFos möchte ich Dank aussprechen, denn meist sind es die unvoreingenommen Menschen, die einem bei komplizierten Fragen erstaunlich einfache und richtige Antworten geben können.

