

https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/de.html

Elektroaerodynamischer Antrieb – Antrieben von Maxwell und Coulomb

Die in diesem Essay dargestellten Erkenntnisse stammen aus Dutzenden von Experimenten, die der Autor zwischen 2016 und 2018 durchgeführt hat, und erkunden den elektroaerodynamischen Antrieb mit einer breiten Palette von Stromquellen (Wechsel- und Gleichstrom), Elektrodengeometrien und Ionenemittertypen. Diese Untersuchungen gipfelten im Bau des unten abgebildeten 80 cm Rotors, der eine Drehgeschwindigkeit von 18 U/min mit weniger als 6 kV und nur etwa 100 mW elektrischer Eingangsleistung erreichte.

Diese Experimentierkampagne ergab, dass die Leistung weitaus stärker von der Verteilung und Geometrie elektrostatischer Felder abhängt als von der Luftbewegung oder dem Ionstrom selbst. Die Beobachtungen legten die Grundlage für die folgende theoretische Neubewertung des elektroaerodynamischen Antriebs.

Elektroaerodynamischer Antrieb – Der stille Motor

Der elektroaerodynamische (EAD) Antrieb – oft als elektrohydrodynamischer (EHD) Schub oder „Ionenwind“ bezeichnet – ist eine jener seltenen Technologien, die wie Science-Fiction wirken: ein Gerät, das lautlos durch die Luft gleitet, ohne bewegliche Teile, ohne Verbrennung und ohne sichtbaren Ausstoß. Die Öffentlichkeit hörte erstmals in den frühen 2000er Jahren davon durch Heimwerker-„Lifter“-Projekte und erneut 2018, als das MIT ein „Ionenflugzeug“ demonstrierte, das durch eine Turnhalle glitt.

Doch die zugrunde liegende Physik hat eine längere und komplexere Geschichte. Fast ein Jahrhundert früher beobachteten Thomas Townsend Brown und Paul Biefeld, dass Hochspannungskondensatoren einen kleinen, aber anhaltenden Schub erzeugen konnten. Brown schrieb den Effekt „Antigravitation“ zu. Die moderne Wissenschaft, bewaffnet mit den Gesetzen von Maxwell und Coulomb, erkennt, dass die Wahrheit subtiler – und in vielerlei Hinsicht tiefergehend – ist.

EAD-Antrieb geht nicht darum, Luft mit Ionen zu blasen. Es geht darum, **elektrische Felder zu formen**, sodass die resultierenden **elektrostatischen Spannungen** eine Nettomechanik erzeugen. In diesem Sinne werden EAD-Geräte von Maxwell und Coulomb angetrieben: durch die Geometrie und Dynamik des elektrischen Feldes selbst.

Das Missverständnis des Ionenwinds

Fragen Sie die meisten Ingenieure nach EHD-Antrieb, und Sie hören eine einfache Geschichte: Ein spitzer Emitter erzeugt Ionen durch Koronaentladung; diese Ionen beschleunigen sich auf eine Sammel-Elektrode zu, stoßen unterwegs mit neutralen Luftmolekülen zusammen und übertragen Impuls auf sie. Das neutrale Gas bewegt sich – der sogenannte

„Ionenwind“ – und nach Newtons drittem Gesetz erfährt das Gerät einen gleichen und entgegengesetzten Schub.

Dieses Bild ist nicht falsch, aber unvollständig.

In der Praxis tragen Ionen eine vernachlässigbare Masse. Ihre Kollisionen mit Neutralen sind häufig, ja, aber der pro Kollision übertragene Impuls ist winzig. Wichtiger noch: **Es wirkt keine signifikante mechanische Kraft direkt auf die Nadelspitze oder den Sammler.** Der „Wind“ ist ein Nebenprodukt, nicht die Quelle des Antriebs.

Der wahre Motor liegt im **elektrischen Feld**, das diese Ionen beschleunigt – in der Umverteilung elektrostatischer Energie, während Raumladung entsteht und fließt.

Feld-Druck und der Maxwell-Spannungstensor

Maxwells Gleichungen beschreiben, wie elektrische Felder Impuls speichern und übertragen durch den **Maxwell-Spannungstensor**:

$$\mathbf{T} = \epsilon_0(\mathbf{E}\mathbf{E} - \frac{1}{2}E^2\mathbf{I})$$

Die Integration dieses Tensors über die Oberfläche eines beliebigen Körpers ergibt den Nettodruck **elektrostatischen Drucks**, der auf ihn wirkt. Dieser Druck – nicht die Luftbewegung – ist es, was einen EHD-Triebwerk vorantreibt.

Bei einer Koronaentladung bildet sich eine Wolke von Ionen um den Emitter. Diese Ionen tun zwei entscheidende Dinge:

1. **Sie schirmen das elektrische Feld des Emitters teilweise ab.** Die lokale Feldstärke sinkt nahe der Spitze, bleibt aber im umgebenden Volumen stark.
2. **Sie verzerrn die Gesamtfeldgeometrie.** Auf einer Seite des Emitters enden die Feldlinien auf nahen geladenen Oberflächen oder geerdeten Strukturen. Auf der anderen Seite erstrecken sie sich nach außen, teilweise neutralisiert durch die Raumladung.

Das Ergebnis ist eine **Ungleichheit im elektrostatischen Druck** auf dem Emitter-Sammler-System – eine Nettokraft. Der Impuls fließt vom Feld zu den Elektroden, nicht durch molekulare Kollisionen.

Coulombs Gesetz in Aktion

Auf der einfachsten Ebene werden die beteiligten Kräfte durch Coulombs Gesetz beschrieben:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

Jedes geladene Flächenelement einer EHD-Struktur zieht oder stößt jedes andere geladene Gebiet in seiner Umgebung an. Der Gesamtschub ist die Vektorsumme dieser unzähligen Coulomb-Interaktionen, die kontinuierlich durch die bewegten Ionen umgeformt werden, die das Feld modulieren.

In einem stationären Korona entsteht eine dünne Hülle positiver Ionen zwischen einem hochspannungs-Emitter und einem relativ negativen Sammler (oder der Umgebung). Diese Ionen dienen als **Vermittler**: Sie schirmen die Anziehung zwischen Emitter und Sammler teilweise ab und setzen durch ihre Bewegung die Feldasymmetrie kontinuierlich zurück. Die stationäre elektrische Zufuhr erhält diese Ungleichheit aufrecht und wandelt elektrostatische Potenzialenergie in mechanische Kraft um.

Lktionen von der NASA und die Grenzen des Ionwind-Paradigmas

In den frühen 2000er Jahren nahm die NASA und ihre Auftragnehmer Biefeld-Brown-ähnliche Geräte unter den Gravitec- und Talley-AIAA-Studien wieder auf. Mit hochspannungssymmetrischen Kondensatoren in atmosphärischen und Vakuumumgebungen sollten die Experimente testen, ob der Effekt ohne Luft anhält.

Die Ergebnisse waren eindeutig – und unbeabsichtigt aufschlussreich.

Im atmosphärischen Modus erreichten Rotoren kaum messbare Drehungen (1–2 U/min) und Schübe im Bereich von 10–100 μN – Größenordnungen unter dem, was zu erwarten wäre, wenn die Geräte wirklich einen gravitativen Effekt nutzten. Die Bewegung war vollständig auf konventionelle Koronaentladung und schwachen Ionenwind zurückzuführen.

Im Vakuum, bei Drücken bis zu 10^{-6} Torr, hörte die Bewegung vollständig auf. Jegliche transitorischen Signale wurden auf Ausgasung oder residuelle Oberflächenladung zurückgeführt. Ohne Luftmoleküle zur Aufrechterhaltung der Ionisation wurde das elektrostatische Feld symmetrisch, und die Kraft verschwand.

Die Untersucher schlossen, dass der Schub ungefähr linear mit der Luftdichte skaliert – ein Befund, der oft zitiert wird, um EHD-Antrieb als Vakuum-Unmöglichkeit zu „entlarven“. Aber was es wirklich zeigte, war etwas Tieferes: **Ohne ein Medium zur Tragung von Raumladung verliert das elektrische Feld die Asymmetrie, die elektrostatische Druckgradienten erzeugt.**

Mit anderen Worten: Diese frühen Tests bestätigten versehentlich die **Maxwell-Spannungs-Interpretation** des elektroaerodynamischen Antriebs. Es war keine Gravitation am Werk, noch bloßer Ionenschlepp – es war das Vorhandensein einer **ladungsvermittelten Feldungleichheit**, die zählte.

Die Gravitec-Geräte, gebaut für Einfachheit und Symmetrie, fehlten an einem signifikanten *Ladungsspeicher* oder *feldformenden Dielektrikum*. Ihre offenen Geometrien verteilten Feldlinien in die Umgebung und verschwendeten die meiste elektrostatische Energie.

Im Gegensatz dazu konzentrierte der hier beschriebene EPS-Aluminium-Rotor Ladung entlang einer gut definierten leitfähigen Haut und ließ die Raumladungsregion das lokale Feld *formen*. Das Ergebnis: nutzbarer Schub bei weniger als 6 kV und etwa 100 mW – eine Leistung, die fast zwei Größenordnungen besser in der Energieeffizienz ist.

Diese Erkenntnisse hallen ein konsistentes Thema wider: **Die Effizienz des elektroaerodynamischen Antriebs entsteht nicht aus Spannung oder Luftstrom, sondern aus der Kontrolle der Ladungstopologie und Feldgeometrie.**

Der Ladungsspeicher-Effekt

Leichte Folie über einem starren, isolierenden Kern verhält sich wie mehr als nur ein Leiter – sie bildet einen **großflächigen Ladungsspeicher**, der die Asymmetrie des elektrischen Feldes verstärkt. Im aktuellen Design dient expandiertes Polystyrol (EPS) rein als **leichter struktureller Träger**, dessen gesamte Oberfläche mit Aluminiumfolie umwickelt ist, die **elektrisch kontinuierlich mit der Hochspannungsversorgung verbunden** ist. Das EPS fügt keine vernachlässigbare elektrische Funktion hinzu; sein Wert liegt darin, eine große leitfähige Oberfläche bei minimaler Masse zu ermöglichen.

Diese ausgedehnte leitfähige Haut speichert Ladung direkt aus der Stromversorgung und ermöglicht es der Koronaentladung, gegen ein **vorgeladenes elektrostatisches Feld** zu arbeiten, anstatt es in jedem Zyklus von Grund auf aufzubauen. Die hohe Oberfläche der Folie erhöht die effektive Kapazität dramatisch – in der Größenordnung von 10–100 pF cm⁻², abhängig von Oberflächenstruktur und Krümmung – und wandelt eine moderate angelegte Spannung in einen viel stärkeren lokalen elektrischen Feldgradienten um.

Wenn die Korona zündet, wirkt die Folie als stabiler Potenzialreferenz. Die emittierten Ionen modulieren das lokale Feld leicht, dominieren es aber nicht; stattdessen erhält die gespeicherte Oberflächenladung eine konstante Asymmetrie, die kontinuierlichen Schub bei sehr niedriger Leistung erzeugt.

Aus der Perspektive des Maxwell-Spannungstensors ist die Kraft proportional zum Integral der Feldstärke und ihres Gradienten:

$$F \approx \epsilon_0 \int (E \cdot \nabla E), dV$$

und die große, gut geladene Folie maximiert beide Terme, ohne höhere Spannung oder höheren Strom zu erfordern. Das erklärt, warum ein niederenergetischer, niederspannungs-Rotor signifikante Drehung erreichen konnte: Er ersetzte **gespeicherte elektrostatische Energie** für die schweren Ionstromverluste konventioneller „Ionenwind“-Geometrien – eine praktische Form der *elektrostatischen Effizienz*.

Die Geometrie der Effizienz

Die Effizienz eines EHD-Triebwerks wird nicht durch die Luftströmungsgeschwindigkeit bestimmt, sondern durch **wie effektiv das elektrische Feld geformt wird**. Wichtige Para-

meter umfassen:

- **Feldasymmetrie:** Die Nettorichtungskomponente des elektrostatischen Druckgradienten.
- **Ladungsdichteverteilung:** Wie die Ionwolke das Feld durch teilweises Abschirmen modifiziert.
- **Kapazitive Kopplung:** Die gesamte gespeicherte Ladung auf gegenüberliegenden Oberflächen pro angelegter Volt.
- **Verlustkanäle:** Koronaverluste, Rekombination und dielektrische Leckage.

Designs, die das Feld einschließen und formen – z. B. durch Platzierung einer breiten, entgegengesetzt geladenen Oberfläche nahe dem Emitter – können Größenordnungs-Verbesserungen im Schub pro Watt erzielen. Das elektrische Feld leistet die Arbeit; die Ionen ermöglichen lediglich, dass das Feld asymmetrisch und dynamisch bleibt.

Rückblick auf Biefeld-Brown

Browns frühe Beobachtungen von Schub aus asymmetrischen Kondensatoren gehen unserem modernen Verständnis der Plasmaphysik voraus. Ohne den Rahmen von Maxwells Spannung oder Raumladungsdynamik war es natürlich, zu denken, der Effekt könnte Gravitation beinhalten. Die Tatsache, dass EHD-Triebwerke Kraft „gegen“ den Feldvektor erzeugen (und manchmal vertikal nach oben), vertiefte nur das Rätsel.

Durch die heutige Linse war Browns „Antigravitation“ einfach sichtbarer elektrostatischer Druck. Die Ähnlichkeit in der mathematischen Form – sowohl gravitative als auch elektrostatische Potenzialenergien fallen als $1/r^2$ ab – machte die Verwirrung historisch verständlich, aber die Physik ist vollständig elektromagnetisch.

Perspektiven und moderner Kontext

Jüngste Analysen und Peer-Diskussionen verstärken diese Neubewertung des elektroaerodynamischen Antriebs als **Feldgradient-Phänomen** statt als Ionenwind-Motor. In klassischen Lifter-Konfigurationen erzeugen Koronastrom von der Größenordnung Milliamper bei Zehn- bis Hunderttausend Volt Schubdichten im Mikro- bis Millinewton-Bereich pro Watt – ein Spiegelbild davon, wie wenig der elektrischen Feldenergie als gerichtete mechanische Spannung endet. Im Gegensatz dazu wandelt der folienumwickelte EPS-Rotor das-selbe physikalische Gesetz in einen *ladungsgetriebenen* Prozess um: Die breite leitfähige Oberfläche erhält einen starken **E** -Gradienten mit minimalem Strom aufrecht und tauscht Driftverluste gegen gespeicherte Feldenergie ein.

Dieser Unterschied hallt einen breiteren Wandel in der zeitgenössischen Forschung wider. **Dielektrisch-barrieref-Entladungs-Aktuatoren** in der aerodynamischen Steuerung leiten ihre Oberflächenkraft ebenfalls aus Maxwell-Spannung ab statt aus Volumenluftstrom und erreichen Effizienzen von $10-100 \text{ N kW}^{-1}$, wenn die Elektrodengeometrie für Asymmetrie abgestimmt ist. **Schwebende-Elektrode- und Einschlussgeometrien** unter Untersuchung bei ONERA und in EU-EHD-Programmen zeigen zwe- bis fünffache Schubsteigerungen durch Formung der Ionenhülle – genau die Designlogik des Ladungsspeicher-Rotors. Und

in **dünnen Luftumgebungen**, wie der oberen Stratosphäre oder der marsianischen Atmosphäre, wo Ionenschlepp nachlässt, aber elektrostatische Spannung bleibt, können ladungsreiche Oberflächen den Antrieb lange nach dem Versagen konventioneller Designs aufrechterhalten.

Die Physik passt nahtlos zum Poynting-Impulsrahmen der klassischen Elektromagnetismus: Der Schub entspricht dem Gradienten der Feldenergiedichte,

$$F \approx \epsilon_0 \int (E \cdot \nabla E), dV$$

was bedeutet, dass das System Impuls direkt aus dem elektromagnetischen Feld zieht. Die Ionen sind Katalysatoren, die die Ungleichheit aufrechterhalten, nicht die Reaktionsmasse selbst. Das erklärt, warum in Vakuumexperimenten, wo das Feld symmetrisch wird, der Schub verschwindet – der ∇E -Term kollabiert. Umgekehrt hält in dem Folien-Speicher-Rotor die kapazitive Haut E steil und gerichtet, und erzeugt etwa **0.1–1 mN** drehmomentäquivalenten Schub aus nur **100 mW** Eingangsleistung – 10–100 mal die Effizienz von Ionenschlepp-Geräten.

Parameter	Konventionelles Ionwind-Design	Folien-Ladungsspeicher-Rotor	Implikation
Spannung	20–50 kV	< 6 kV	Niedrigeres Durchschlagsrisiko, einfachere Skalierung
Leistung	1–10 W	≈ 0.1 W	10–100× höherer Schub / W
Schubmechanismus	Ion-Neutral-Kollisionen	Feldgradient (Maxwell-Spannung)	Weitgehend unabhängig von Luftdichte
Schlüsselaktiver	Emitter-Sammler-Abstand	Kapazitive Folien-Speicher	Gespeicherte Ladung > transitorischer Strom
Effizienz (N kW⁻¹)	0.01–0.1	1–10 (abgeleitet)	Machbar für Mikro-UAVs

Solche Vergleiche heben einen konzeptionellen Drehpunkt hervor: **Vom stromgetriebenen zum ladungsgtriebenen Antrieb**, vom Bewegen von Materie zum Formen von Feldern. Die nächste Grenze ist, was man *elektrostatische Architektur* nennen könnte – die Nutzung von computergestützter Optimierung und fortschrittlichen Materialien (Kohlenstoffnanorohr-Emitter, gemusterte Folien, Metamaterial-Dielektrika), um $\int E \cdot \nabla E$ zu maximieren. Hybride gepulste-Gleichstrom-Modi könnten transitorische Ladungsspeicherung weiter ausnutzen, während chemische Nebenprodukte reduziert werden.

Schlussfolgerung – Angetrieben von Maxwell und Coulomb

Der elektroaerodynamische Antrieb ist keine exotische Kuriosität oder pseudowissenschaftliche Anomalie. Er ist eine direkte Manifestation der Gesetze von Maxwell und Coulomb – eine makroskopische Maschine, die elektrostatische Potenzialenergie durch kontrollierte Feldasymmetrie in Bewegung umwandelt.

Wo frühe Erfinder „Antigravitation“ sahen und moderne Projekte „Ionenwind“, ist die wahre Geschichte einfacher und tiefer: **Elektrische Felder besitzen Spannung**. Formen Sie diese Spannung, und Sie können sich selbst durch die Luft ziehen, ohne bewegliche Teile, ohne Treibstoff und ohne Geräusch.

Das ist das leise Genie des elektroaerodynamischen Antriebs – wahrhaftig, **angetrieben von Maxwell und Coulomb**.

Referenzen

1. Talley, C. et al. *Evaluation of the Biefeld-Brown Effect: Asymmetric Capacitor Thruster Tests in Vacuum and Atmosphere*. AIAA Paper 2003-1023, NASA Marshall Space Flight Center, 2003.
2. Brown, T. T. *Electrokinetic Apparatus*. U.S. Patent No. 3,187,206, 1965.
3. Wilson, S., Barrett, S. R. *Flight of an Aeroplane with Solid-State Ion Propulsion*. *Nature* **563**, 532–535 (2018).
4. Moreau, E. *Airflow Control by Non-Thermal Plasma Actuators*. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, 605–636 (2007).
5. Ronney, P. D. *EHD Flow Control and Plasma Actuators*. NASA Technical Reports Server, 2015.
6. ONERA EHD Program: *Electrohydrodynamic Propulsion and Flow Control*. Internal Reports 2018–2023.