

Elektro-aërodynamische Voortstuwing - Aangedreven door Maxwell en Coulomb

De inzichten die in dit essay worden gepresenteerd, zijn afkomstig van tientallen experimenten die de auteur tussen 2016 en 2018 heeft uitgevoerd, waarbij elektro-aërodynamische voortstuwing werd onderzocht met een breed scala aan vermogensbronnen (wisselstroom en gelijkstroom), elektrodegeometrieën en ionenemittertypes. Deze onderzoeken culmineerden in de bouw van de hieronder afgebeelde rotor van 80 cm, die een rotatiesnelheid van 18 rpm bereikte met minder dan 6 kV en slechts ongeveer 100 mW elektrische invoercapaciteit.

Deze experimentele campagne onthulde dat de prestaties veel meer afhangen van de verdeling en geometrie van elektrostatische velden dan van de luchtbeweging of de ionenstroom zelf. De waarnemingen vormden de basis voor de theoretische herformulering van elektro-aërodynamische voortstuwing die volgt.

Elektro-aërodynamische Voortstuwing - De Stille Motor

Elektro-aërodynamische (EAD) voortstuwing - vaak aangeduid als elektrohydrodynamische (EHD) stuwkracht of "ionenwind" - is een van die zeldzame technologieën die lijkt op sciencefiction: een apparaat dat stil door de lucht beweegt zonder bewegende delen, zonder verbranding en zonder zichtbare uitlaat. Het publiek hoorde er voor het eerst over in de vroege jaren 2000 via doe-het-zelf "lifter"-projecten, en opnieuw in 2018 toen het MIT een "ionenvliegtuig" demonstreerde dat door een gymzaal zweefde.

Toch heeft de onderliggende fysica een langere en ingewikkeldere geschiedenis. Bijna een eeuw eerder observeerden Thomas Townsend Brown en Paul Biefeld dat hoogspanningscondensatoren een kleine maar aanhoudende stuwkracht konden genereren. Brown droeg het effect toe aan "antigraviteit". De moderne wetenschap, gewapend met de wetten van Maxwell en Coulomb, erkent dat de waarheid subtieler is - en op vele manieren diepergaand.

EAD-voortstuwing gaat niet over het blazen van lucht met ionen. Het gaat over het **vormgeven van elektrische velden** zodat de resulterende **elektrostatische spanningen** een netto mechanische kracht produceren. In die zin worden EAD-apparaten aangedreven door Maxwell en Coulomb: door de geometrie en dynamiek van het elektrische veld zelf.

Het Misverstand van de Ionenwind

Vraag de meeste ingenieurs naar EHD-voortstuwing en je hoort een eenvoudig verhaal: een scherpe emitter produceert ionen via coronontlading; deze ionen versnellen naar een collector-elektrode, botsen onderweg met neutrale luchtmoleculen en dragen impuls over.

Het neutrale gas beweegt - de zogenaamde "ionenwind" - en volgens Newtons derde wet ervaart het apparaat een gelijke en tegengestelde stuwkracht.

Dit beeld is niet verkeerd, maar incompleet.

In de praktijk dragen ionen een verwaarloosbare massa. Hun botsingen met neutralen zijn frequent, ja, maar de overgedragen impuls per botsing is minuscuul. Belangrijker nog: **er werkt geen significante mechanische kracht direct op de naaldpunt of de collector.** De "wind" is een bijproduct, niet de bron, van de voortstuwing.

De ware motor ligt in het **elektrische veld** dat die ionen versnelt - in de herverdeling van elektrostatische energie terwijl ruimtelijke lading zich vormt en stroomt.

Veld druk en de Maxwell Spanningstensor

De vergelijkingen van Maxwell beschrijven hoe elektrische velden impuls opslaan en overdragen via de **Maxwell spanningstensor**:

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

Het integreren van deze tensor over het oppervlak van een willekeurig lichaam levert de netto **elektrostatische druk** die erop werkt op. Deze druk - niet de beweging van lucht - is wat een EHD-stuwraak vooruit duwt.

Wanneer een coronontlading optreedt, vormt zich een wolk van ionen rond de emitter. Deze ionen doen twee cruciale dingen:

1. **Ze schermen het elektrische veld van de emitter deels af.** De lokale veldsterkte daalt nabij de punt, maar blijft sterk in het omliggende volume.
2. **Ze vervormen de algemene veldgeometrie.** Aan één kant van de emitter eindigen de veldlijnen op nabije geladen oppervlakken of geaardde structuren. Aan de andere kant strekken ze zich uitwaarts, deels geneutraliseerd door de ruimtelijke lading.

Het resultaat is een **onevenwicht in elektrostatische druk** op het emitter-collector-systeem - een netto kracht. De impuls stroomt van het veld naar de elektroden, niet door moleculaire botsingen.

De Wet van Coulomb in Actie

Op het eenvoudigste niveau worden de betrokken krachten beschreven door de wet van Coulomb:

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

Elk geladen oppervlakte-element van een EHD-structuur trekt of stoot elk ander geladen gebied in zijn omgeving aan. De totale stuwkracht is de vector som van deze talloze Cou-

lomb-interacties, continu hervormd door de bewegende ionen die het veld moduleren.

In een stationaire corona bevindt zich een dunne schede van positieve ionen tussen een hoogspanningsemitter en een relatief negatieve collector (of de omliggende omgeving). Die ionen dienen als **bemiddelaars**: ze schermen de aantrekkingskracht tussen emitter en collector deels af, en door te bewegen, herstellen ze continu de veldasymmetrie. De constante elektrische invoer handhaaft die onevenwichtigheid, en zet elektrostatische potentiële energie om in mechanische kracht.

Lessen van de NASA en de Grenzen van het Ionenwind-Paradigma

In de vroege jaren 2000 herzag de NASA en haar aannemers Biefeld-Brown-achtige apparaten onder de Gravitec- en Talley AIAA-studies. Met hoogspannings-asymmetrische condensatoren in zowel atmosferische als vacuümomgevingen waren de experimenten bedoeld om te testen of het effect aanhield zonder lucht.

De resultaten waren ondubbelzinnig - en onbedoeld onthullend.

In atmosferische modus bereikten rotoren nauwelijks meetbare rotaties (1–2 rpm) en stuwkrachten in het bereik van 10–100 μN - ordes van grootte onder wat verwacht zou worden als de apparaten werkelijk een zwaartekrachteffect benutten. De beweging was volledig toe te schrijven aan conventionele coronontlading en zwakke ionenwind.

In vacuüm, bij drukken tot 10^{-6} Torr, stopte de beweging volledig. Elke voorbijgaande signalen werden getraceerd naar uitgasen of residu oppervlaktelading. Zonder luchtmoleculen om ionisatie te handhaven, werd het elektrostatische veld symmetrisch, en de kracht verdween.

De onderzoekers concludeerden dat de stuwkracht ruwweg lineair schaalde met de luchtdichtheid - een bevinding die vaak wordt aangehaald om EHD-voortstuwing als vacuüm-onmogelijkheid te “weerleggen”. Maar wat het echt demonstreerde was iets diepers: **zonder een medium om ruimtelijke lading te dragen, verliest het elektrische veld de asymmetrie die elektrostatische drukgradienten produceert.**

Met andere woorden, die vroege tests bevestigden per ongeluk de **Maxwell-spanninginterpretatie** van elektro-aërodynamische voortstuwing. Het was geen zwaartekracht in werking, noch louter ionensleep - het was de aanwezigheid van een **lading-gemiddelde veldonevenwichtigheid** die telde.

De Gravitec-apparaten, gebouwd voor eenvoud en symmetrie, misten enige significante *ladingreservoir of veld-vormend dielektrikum*. Hun open geometrieën verspreidden veldlijnen in de omgeving, verspillend de meeste elektrostatische energie.

Daarentegen concentreerde de hier beschreven EPS-aluminium rotor lading langs een goed gedefinieerde geleidende huid, waardoor de ruimtelijke ladingregio het lokale veld

kon *vormgeven*. Het resultaat: bruikbare stuwkracht met minder dan 6 kV en ongeveer 100 mW - prestaties bijna twee ordes van grootte beter in energie-efficiëntie.

Deze bevindingen echoën een consistent thema: **elektro-aërodynamische efficiëntie ontstaat niet uit spanning of luchtstroom, maar uit controle over ladingstopologie en veldgeometrie.**

Het Ladingreservoir-effect

Lichte folie over een rigide, isolerend kern gedraagt zich als meer dan alleen een geleider - het vormt een **grootoppervlakkig ladingreservoir** dat de asymmetrie van het elektrische veld versterkt. In het huidige ontwerp dient geëxpandeerd polystyreen (EPS) puur als **lichte structurele ondersteuning**, met het gehele oppervlak omwikkeld met aluminium-folie die **elektrisch continu is met de hoogspanningsvoorziening**. EPS voegt een verwaarloosbare elektrische functie toe; zijn waarde ligt in het mogelijk maken van een groot geleidbaar oppervlak met minimale massa.

Deze uitgebreide geleidende huid slaat lading direct op uit de vermogensbron, waardoor de coronontlading kan werken tegen een **vooropgeladen elektrostatisch veld** in plaats van het vanaf nul op te bouwen in elke cyclus. Het hoge oppervlaktegebied van de folie verhoogt de effectieve capaciteit dramatisch - in de orde van $10\text{--}100\text{ pF cm}^{-2}$, afhankelijk van oppervlaktetextuur en kromming - en zet een bescheiden toegepaste spanning om in een veel sterker lokaal elektrisch veldgradient.

Wanneer de corona ontbrandt, fungeert de folie als een stabiliserende potentiaalreferentie. De geëmitteerde ionen moduleren het lokale veld lichtjes maar domineren het niet; in plaats daarvan handhaaft de opgeslagen oppervlaktelading een constante asymmetrie die continue stuwkracht produceert met zeer lage capaciteit.

Vanuit het perspectief van de Maxwell-spanningstensor is de kracht proportioneel aan de integraal van veldsterkte en zijn gradient:

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

en de grote, goed geladen folie maximaliseert beide termen zonder hogere spanning of hogere stroom te vereisen. Dit verklaart waarom een laagvermogen, laagspanningsrotor significante rotatie kon bereiken: het verving **opgeslagen elektrostatische energie** voor de zware ionenstroomverliezen van conventionele "ionenwind"-geometrieën - een praktische vorm van *elektrostatische efficiëntie*.

De Geometrie van Efficiëntie

De efficiëntie van een EHD-stuwraket wordt niet bepaald door de luchtstroomsnelheid, maar door **hoe effectief het elektrische veld wordt gevormd**. Belangrijke parameters omvatten:

- **Veldasymmetrie:** De netto directionele component van de elektrostatische drukgradient.
- **Ladingdichtheidsverdeling:** Hoe de ionenwolk dat veld wijzigt door gedeeltelijke afscherming.
- **Capacitieve Koppeling:** De totale opgeslagen lading op tegenoverliggende oppervlakken per toegepaste volt.
- **Verlieskanalen:** Corona-verliezen, recombinitie en diëlektrische lekken.

Ontwerpen die het veld beperken en vormen - bijvoorbeeld door een breed, tegengesteld geladen oppervlak dicht bij de emitter te plaatsen - kunnen ordes van grootte verbeteringen in stuwkracht per watt bereiken. Het elektrische veld verricht het werk; de ionen stellen slechts in staat dat het veld asymmetrisch en dynamisch blijft.

Herbeziening van Biefeld-Brown

Browns vroege waarnemingen van stuwkracht uit asymmetrische condensatoren gaan vooraf aan ons moderne begrip van plasmaphysica. Zonder het kader van Maxwell-spanning of ruimtelijke ladingdynamiek was het natuurlijk om te denken dat het effect zwaartekracht kon betrekken. Het feit dat EHD-stuwkietten kracht “tegen” de veldvector produceren (en soms verticaal omhoog) verdiept alleen het mysterie.

Gezien door de lens van vandaag was Browns “antigraviteit” eenvoudig elektrostatische druk zichtbaar gemaakt. De gelijkenis in wiskundige vorm - zowel gravitatie- als elektrostatische potentiële energieën dalen af als $1/r^2$ - maakte de verwarring historisch begrijpelijk, maar de fysica is volledig elektromagnetisch.

Perspectieven en Moderne Context

Recente analyses en discussies onder peers versterken deze herformulering van elektro-aërodynamische voortstuwing als een **veldgradient-fenomeen** in plaats van een ionenwind-motor. In klassieke lifter-configuraties produceren coronastromen van de orde van milliampères bij tientallen kilovolts stuwkrachtdichtheden in het micro- tot milli-newton-bereik per watt - een weerspiegeling van hoe weinig van de elektrische veldenergie eindigt als gerichte mechanische spanning. Daarentegen zet de folie-omwikkelde EPS-rotor dezelfde fysieke wet om in een *lading-gedreven* proces: het brede geleidbare oppervlak handhaaft een sterke E -gradient met minimale stroom, ruilend driftverliezen voor opgeslagen veldenergie.

Deze onderscheiding echoën een bredere verschuiving in hedendaags onderzoek. **Dielektrische-barrière-ontlading actuatoren** in aerodynamische controle leiden ook hun oppervlaktekracht af uit Maxwell-spanning in plaats van volumeluchtstroom, en bereiken efficiënties van $10\text{--}100\text{ N kW}^{-1}$ wanneer de elektrodegeometrie is afgestemd op asymmetrie. **Zwevende-elektrode- en beperkingsgeometrieën** onder studie bij ONERA en binnen EU EHD-programma's tonen twee- tot vijfvoudige boosts in stuwkracht door het vormen van de ionenschede - precies de ontwerplogica van de ladingreservoir-rotor. En in **dunne-luchtomgevingen**, zoals de bovenste stratosfeer of de Marsatmosfeer, waar ionensleep

verzwakt maar elektrostatische spanning blijft, kunnen ladingrijke oppervlakken voortstuwing handhaven lang nadat conventionele ontwerpen falen.

De fysica sluit naadloos aan bij het Poynting-impulsraamwerk van klassieke elektromagnetisme: de stuwkracht komt overeen met de gradient van veldenergiedichtheid,

$$F \approx \varepsilon_0 \int (\mathbf{E} \cdot \nabla \mathbf{E}), dV$$

wat betekent dat het systeem impuls direct uit het elektromagnetische veld trekt. De ionen zijn katalysatoren die de onevenwichtigheid handhaven, niet de reactiemassa zelf. Dit verklaart waarom, in vacuümexperimenten waar het veld symmetrisch wordt, de stuwkracht verdwijnt - de $\nabla \mathbf{E}$ -term stort in. Omgekeerd houdt in de folie-reservoir-rotor de capacitieve huid $\mathbf{E}$ steil en directioneel, en produceert ongeveer **0.1–1 mN** koppel-equivalente stuwkracht uit slechts **100 mW** invoercapaciteit - 10–100 keer de efficiëntie van ionensleep-apparaten.

Parameter	Conventioneel Ionenwind-Ontwerp	Folie Ladingreservoir Rotor	Implicatie
Spanning	20–50 kV	< 6 kV	Lager doorbraakrisico, eenvoudigere schaling
Vermogen	1–10 W	≈ 0.1 W	10–100× hogere stuwkracht / W
Stuwkrachtmechanisme	Ionen-neutraal botsingen	Veldgradient (Maxwell spanning)	Grotendeels onafhankelijk van luchtdichtheid
Sleutelfacilitator	Emitter-collector kloof	Capacitieve folie reservoir	Opgeslagen lading > transient stroom
Efficiëntie (N kW ⁻¹)	0.01–0.1	1–10 (afgeleid)	Haalbaar voor micro-UAV's

Zo'n vergelijkingen benadrukken een conceptuele draai: **van stroom-gedreven naar lading-gedreven voortstuwing**, van materie verplaatsen naar velden vormen. De volgende frontier is wat men *elektrostatische architectuur* zou kunnen noemen - het gebruik van computationele optimalisatie en geavanceerde materialen (koolstofnanobuis emitters, gepatroneerde folies, metamateriaal diëlektrica) om $\int \mathbf{E} \cdot \nabla \mathbf{E}$ te maximaliseren. Hybride gepulseerde-DC-modi zouden transient ladingopslag verder kunnen benutten terwijl chemische bijproducten worden verminderd.

Conclusie - Aangedreven door Maxwell en Coulomb

Elektro-aërodynamische voortstuwing is geen exotische curiositeit of pseudowetenschappelijke anomalie. Het is een directe manifestatie van de wetten van Maxwell en Coulomb - een macroscopische machine die elektrostatische potentiële energie omzet in beweging door gecontroleerde veldasymmetrie.

Waar vroege uitvinders “antigraviteit” zagen en moderne projecten “ionenwind”, is het echte verhaal eenvoudiger en dieper: **elektrische velden bezitten spanning**. Vorm die spanning, en je kunt jezelf door de lucht trekken zonder bewegende delen, zonder brandstof en zonder geluid.

Dat is het stille genie van elektro-aërodynamische voortstuwing - werkelijk, **aangedreven door Maxwell en Coulomb**.

Referenties

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.