

Aufsteigen, Fliegen, Orbit

Ein solarbetriebenes elektroaerodynamisches Luftschiff für nachhaltigen Zugang zum Weltraum

Vision und physikalische Grundlagen

Der Traum vom Fliegen war immer ein Wettkampf zwischen Geduld und Kraft. Die frühen Ballonfahrer des 18. Jahrhunderts stiegen sanft in den Himmel auf, indem sie Auftriebsgase nutzten, während die Raketen-Ingenieure des 20. Jahrhunderts ihn mit Feuer durchbrachen. Beide Ansätze teilen dasselbe Ziel – der Tyrannie der Schwerkraft zu entkommen –, unterscheiden sich jedoch grundlegend in der Philosophie. Der eine nutzt die Luft als Partner; der andere behandelt sie als Hindernis. Zwischen diesen beiden Extremen liegt ein dritter Weg, der in der Praxis noch nicht realisiert wurde, aber prinzipiell nicht mehr unmöglich ist: ein **solarbetriebenes Luftschiff, das in den Orbit fliegen kann**, das zuerst durch Auftrieb steigt, dann durch aerodynamischen Auftrieb und schließlich durch zentrifugale Unterstützung, alles ohne chemischen Treibstoff.

Im Kern dieses Konzepts steht **elektroaerodynamischer (EAD) Antrieb** – eine Form des elektrischen Schubs, die elektrische Felder nutzt, um Ionen in der Luft zu beschleunigen. Die beschleunigten Ionen übertragen Impuls auf neutrale Moleküle und erzeugen einen Massenfluss sowie einen Nettoschub auf den Elektroden. Im Gegensatz zu einer Rakete, die Reaktionsmasse mitführen muss, oder einem Propeller, der bewegliche Klingen benötigt, arbeitet der elektroaerodynamische Antrieb **ohne bewegliche Teile und ohne Bordabgase**, nur mit Sonnenlicht und Luft. Wenn er mit einem hoch effizienten Solararray gekoppelt und auf einem großen, ultraleichten Tragkörper montiert wird, liefert er das fehlende Zutat für anhaltende Beschleunigung in der oberen Atmosphäre, wo der Widerstand gering ist, die Luft aber noch vorhanden.

Der Vorschlag ist einfach zu beschreiben, aber herausfordernd umzusetzen:

1. **Aufsteigen** – Ein auftriebsbasiertes Luftschiff, gefüllt mit Wasserstoff oder Helium, steigt passiv in die Stratosphäre auf, weit über Wetter und Flugverkehr hinaus.
2. **Fliegen** – Das Luftschiff beschleunigt horizontal mit EAD-Schub, erhöht langsam die Geschwindigkeit, während es in dünner Luft klettert, um den Widerstand zu verringern.
3. **Orbit** – Nach Wochen kontinuierlicher Beschleunigung gleicht die Zentrifugalkraft die Schwerkraft aus; das Fahrzeug benötigt keinen Auftrieb mehr und wird durch Beharrlichkeit zum Satelliten, nicht durch Explosion.

Die Idee ist keine Fantasie. Jeder Schritt ist in bekannter Physik verwurzelt: Auftrieb, Solarenergie, Elektrostatik und Orbitalmechanik. Was sich ändert, ist die Zeitskala. Statt Minuten der Verbrennung betrachten wir **Wochen Sonnenlichts**. Statt Tonnen Treibstoff verlassen wir uns auf **Felder und Geduld**.

Die Energie des Orbit

Jede Diskussion über Raumfahrt beginnt und endet mit Energie. Die kinetische Energie pro Kilogramm Masse, die für einen kreisförmigen Orbit um die Erde erforderlich ist, wird gegeben durch

$$E_k = \frac{1}{2} v^2$$

wobei v die Orbitgeschwindigkeit ist. Für einen niedrigen Erdorbit gilt $v \approx 7.8 \times 10^3 \text{ m/s}$, also $E_k \approx 3.0 \times 10^7 \text{ J/kg}$, oder etwa **30 Megajoule pro Kilogramm**. Das ist die Energieäquivalent des Verbrennens von etwa einem Kilogramm Benzin pro Kilogramm in den Orbit gebracht. Es ist eine große Zahl, aber nicht astronomisch groß.

Vergleichen wir das nun mit dem kontinuierlichen Solarfluss an der Obergrenze der Erdatmosphäre: etwa **1.360 Watt pro Quadratmeter**. Wenn wir nur einen kleinen Bruchteil davon über Tage oder Wochen in kinetische Energie umwandeln könnten, könnten wir prinzipiell die erforderliche Orbitenergie liefern. Moderne hochleistungsfähige Photovoltaik-Arrays haben spezifische Leistungen in der Größenordnung von mehreren Hundert Watt pro Kilogramm. Bei $P_{sp} = 300 \text{ W/kg}$ erzeugt ein Kilogramm Array 300 Joule pro Sekunde. Über einen Tag (8.64×10^4 Sekunden) sind das 2.6×10^7 Joule – vergleichbar mit der Orbitenergie eines Kilogramms Masse.

Dieser einfache Vergleich zeigt die Logik dieses Ansatzes. Die Energie für den Orbit ist von der Sonne in etwa **einem Tag pro Kilogramm Array** verfügbar, wenn sie effizient in Schub umgewandelt werden kann. Die praktische Herausforderung ist, dass Widerstand und Ineffizienzen den Großteil davon absorbieren. Die Lösung ist Höhe und Geduld: Arbeiten in der dünnen Luft, wo der Widerstand niedrig ist, und den Prozess über Wochen statt Stunden ausdehnen.

Zeit gegen Treibstoff eintauschen

Raketen lösen das Problem des Widerstands durch rohe Gewalt – sie gehen so schnell, dass die Luft irrelevant wird. Luftschiiffe hingegen arbeiten mit der Luft; sie können verweilen. Wenn Zeit als verbrauchbare Ressource behandelt wird, kann sie Treibstoffmasse ersetzen. Die Aufgabe des Luftschiiffs ist es, eine kleine, aber anhaltende Beschleunigung über lange Perioden aufrechtzuerhalten, vielleicht **in der Größenordnung von 10^{-3} m/s^2** , bis die Orbitgeschwindigkeit erreicht ist.

Wenn der Aufstieg in den Orbit drei Wochen dauert, oder etwa 1.8×10^6 Sekunden, beträgt die erforderliche mittlere Beschleunigung

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{t} = \frac{7.8 \times 10^3}{1.8 \times 10^6} \approx 4.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$$

– weniger als ein halbes Tausendstel der Erdschwerkraft. Solche Beschleunigungen sind für ein Luftschiiff leicht erträglich; sie verursachen keine strukturelle Belastung. Die einzige Schwierigkeit ist **sie aufrechtzuerhalten**, angesichts der geringen Schubmenge pro Leistungseinheit.

Bei einer Fahrzeugmasse von 10^3 kg erfordert eine durchschnittliche Beschleunigung von 4×10^{-3} m/s² nur etwa **4 Newton Nettoschub** – weniger als das Gewicht eines Apfels. Die scheinbare Absurdität, den Orbit mit dem Schub eines Apfels zu erreichen, verschwindet, wenn Zeit auf Wochen ausgedehnt wird.

Auftrieb und der Weg in die dünne Luft

Das Luftschiff beginnt seine Reise wie jedes leichtere-als-Luft-Fahrzeug: indem es Luft mit einem leichteren Gas verdrängt. Die Auftriebskraft wird gegeben durch

$$F_b = (\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{gas}})gV$$

wobei V das Gasvolumen und ρ die jeweiligen Dichten sind. In Bodennähe gilt $\rho_{\text{air}} \approx 1.2 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{He}} \approx 0.18 \text{ kg/m}^3$ und $\rho_{\text{H}_2} \approx 0.09 \text{ kg/m}^3$. Wasserstoff bietet etwas mehr Auftrieb, etwa **1,1 kg pro Kubikmeter**, im Vergleich zu **1,0 kg pro Kubikmeter** für Helium. Der Unterschied scheint klein, addiert sich aber über Tausende Kubikmeter.

Wasserstoff bietet somit einen messbaren Leistungs-Vorteil, allerdings auf Kosten der Entflammbarkeit. Er erfordert strenge elektrische Zonen und Entlüftungsprotokolle, insbesondere da das Fahrzeug auch hochspannende elektrostatische Systeme trägt. Helium bietet weniger Auftrieb, ist aber vollständig inert. Beide Gase sind machbar; die Wahl hängt von der Risikotoleranz der Mission ab. Für frühe öffentliche oder bevölkerte Tests ist Helium vorzuziehen. Für abgelegene oder orbitale Versuche könnte Wasserstoff gerechtfertigt sein.

Mit dem Anstieg fällt die Lufdichte ungefähr exponentiell mit der Skalenhöhe $H \approx 7.5 \text{ km}$. Bei 30 km beträgt die Dichte etwa **1/65** der Bodendichte; bei 50 km **1/300**. Der Auftrieb schwächt entsprechend ab, aber auch der Widerstand. Das Fahrzeug ist so konzipiert, dass es **neutralen Auftrieb** in einer Höhe erreicht, wo die Solarintensität hoch bleibt, aber der dynamische Druck minimal ist – etwa 30–40 km in der Stratosphäre. Von dort aus beginnt die horizontale Beschleunigung.

Auftrieb, Widerstand und dynamischer Druck

Um die Höhe bei Beschleunigung zu halten, könnte das Luftschiff teilweise auf **aerodynamischen Auftrieb** setzen. Für einen Tragkörper-Hüllen sind die Auftriebs- und Widerstandskräfte

$$F_L = \frac{1}{2}\rho v^2 A C_L, \quad F_D = \frac{1}{2}\rho v^2 A C_D$$

wobei A die Referenzfläche, C_L und C_D die Auftriebs- und Widerstandscoeffizienten sind. Da ρ in der Höhe klein ist, sind diese Kräfte gering; das Fahrzeug kompensiert durch **große Fläche und geringes Gewicht**.

Das Verhältnis $L/D = C_L/C_D$ bestimmt die Effizienz des aerodynamischen Flugs. Moderne Segelflugzeuge können $L/D = 50$ in dichter Luft überschreiten. Ein ultraleichtes Luftschiff mit extremer Glätte und minimalen Anhängseln könnte plausibel ein effektives L/D von 10–20 sogar in dünner Luft halten. Aber mit weiterer Verdünnung der Luft wird

der Übergang zum orbitalen Flug nicht durch Auftrieb begrenzt – er wird durch **Widerstandsleistung** bestimmt.

Die Leistung, um den Widerstand zu überwinden, ist

$$P_D = F_D v = \frac{1}{2} \rho v^3 A C_D$$

und skaliert mit dem Kubus der Geschwindigkeit. Deshalb beschleunigen Raketen schnell: Wenn sie verweilen, verbraucht Widerstand ihre Energie exponentiell. Das Luftschiff nimmt den gegenteiligen Weg: Es beschleunigt, wo ρ so klein ist, dass P_D auch bei Kilometern pro Sekunde begrenzt bleibt.

Wenn beispielsweise $\rho = 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ (typisch nahe 60 km Höhe), $A = 100 \text{ m}^2$, $C_D = 0.05$ und $v = 1.000 \text{ m/s}$, dann

$$P_D = 0.5 \times 10^{-5} \times (10^3)^3 \times 100 \times 0.05 = 2.5 \times 10^4 \text{ W},$$

oder 25 kW – leicht im solar erreichbaren Bereich. Im Gegensatz dazu würde dieselbe Konfiguration auf Meereshöhe 25 Gigawatt benötigen.

Die Regel ist einfach: **Dünne Luft kauft Zeit, und Zeit ersetzt Treibstoff.**

Die elektroaerodynamische Gelegenheit

Im frühen 20. Jahrhundert beobachteten Physiker, dass starke elektrische Felder nahe scharfer Elektroden in der Luft einen schwachen blauen Corona und einen subtilen Luftstrom erzeugen. Dieser „elektrische Wind“ resultiert aus Impulsübertragung zwischen Ionen und Neutralen. Er wurde meist als Kuriosität behandelt, bis Hochspannungselektronik reifte. Bei richtiger Anordnung kann der Effekt messbaren Schub erzeugen.

Der elektroaerodynamische Antrieb funktioniert, indem hoher Spannungsunterschied zwischen einem **Emitter**, einem dünnen Draht oder Rand, der Ionen erzeugt, und einem **Kollektor**, einer breiteren Elektrode, die sie empfängt, angelegt wird. Die Ionen beschleunigen im elektrischen Feld, stoßen mit neutralen Luftmolekülen zusammen und vermitteln Impuls an das Gas nach vorn. Das Gerät erfährt einen gleichen und entgegengesetzten Schub.

Während frühe Demonstrationen bescheiden waren, bewiesen jüngste Experimente – einschließlich eines festflügeligen **Ionflugzeugs**, das vom MIT 2018 flog – dass stetiger, leiser Flug möglich ist. Doch die Idee geht diesem Meilenstein voraus. Jahre zuvor zeigten Forschungen zu **Maxwell-Tensor-basierten Formulierungen** des elektroaerodynamischen Schubs, wie dieselbe Physik auf größere Geometrien und dünneren Luft skaliert werden kann. In dieser Formalismus entsteht der Schub nicht aus „Wind“, sondern aus **elektromagnetischem Stress**, integriert über das Volumen der Entladungsregion.

Die relevante Gleichung leitet sich aus dem **Maxwell-Spannungstensor \mathbf{T}** ab, der für ein elektrostatisches Feld ist

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

wobei ϵ die Permittivität des Mediums, \mathbf{E} der elektrische Feldvektor und \mathbf{I} der Einheitstensor ist. Die Nettokraft elektromagnetisch auf einen Körper ergibt sich durch Integration dieses Tensors über seine Oberfläche:

$$\mathbf{F}_{\text{EM}} = \oint_{\partial V} \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dS.$$

Innerhalb der ionisierten Region vereinfacht sich dies zu einer **Volumenkraftdichte**

$$\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon,$$

wobei ρ_e die lokale Ladungsdichte ist. In einem Gas mit ungefähr einheitlicher Permittivität verschwindet der zweite Term, und es bleibt die elegante **Coulomb-Körperkraft**

$$\mathbf{f} \approx \rho_e \mathbf{E}.$$

Dieser kompakte Ausdruck ist das Wesen des elektroaerodynamischen Antriebs: Wo immer ein elektrisches Feld und Raumladung koexistieren, wirkt eine Nettokörperkraft auf das Medium.

Die Ionen selbst sind wenige, aber ihr Impuls wird durch Kollisionen an die Neutralen weitergeleitet. Der mittlere freie Weg λ zwischen Kollisionen bestimmt, wie Impuls diffundiert; er skaliert umgekehrt mit dem Druck. Bei niedrigeren Drücken reisen Ionen weiter pro Kollision, und die Effizienz der Impulsübertragung ändert sich. Es existiert ein **optimales Druckband**, in dem Ionen noch häufig genug kollidieren können, um das Gas zu schieben, aber nicht so häufig, dass Energie als Wärme verschwendet wird. Für die Erdatmosphäre liegt dieses Band ungefähr zwischen wenigen Torr und wenigen Millitorr – genau dem Bereich, der zwischen 40 und 80 Kilometern Höhe angetroffen wird.

Der Umschlag des Luftschiffs wird somit zum idealen Wirt für elektroaerodynamische Fliesen, die in ihrer natürlichen Umgebung arbeiten. Die Atmosphäre selbst ist die Reaktionsmasse.

Die Physik des elektroaerodynamischen Antriebs

Auf den ersten Blick scheint elektroaerodynamischer Antrieb unwahrscheinlich. Die Idee, dass ein leises, unbewegtes Set von Elektroden Schub erzeugen kann, der stark genug ist, um ein Luftschiff zu bewegen, widerspricht der Alltagserfahrung. Das Fehlen sichtbarer Reaktionsmasse oder beweglicher Maschinerie fordert die Intuition heraus. Doch jeder Ion, der in einem elektrischen Feld driftet, trägt Impuls, und Impuls ist erhalten. Das Feld wirkt als unsichtbarer Hebel, und die Luft als sein Arbeitsfluid.

Die Grundlagen dieses Phänomens beruhen nicht auf exotischer Plasmaphysik, sondern auf **Maxwells Gleichungen** und ihrer mechanischen Ausdrucksform, dem **Maxwell-Spannungstensor**. Diese tensorielle Formulierung macht klar, dass elektrische Felder nicht nur Potentialmuster sind – sie speichern und übertragen mechanischen Stress im umgebenden Medium.

Feldstress und die Coulomb-Körperkraft

Der **Maxwell-Spannungstensor** in der Elektrostatik ist

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

wobei ϵ die Permittivität, \mathbf{E} das elektrische Feld und \mathbf{I} der Einheitstensor ist. Der erste Term repräsentiert den gerichteten Druck entlang der Feldlinien, der zweite Term die isotropische Spannung, die Felddivergenz widersteht.

Die **Nettoelektromagnetkraft** auf einen Körper in einem solchen Feld ist das Oberflächenintegral dieses Tensors:

$$\mathbf{F}_{EM} = \oint_{\partial V} \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dS.$$

Physisch sagt dieser Ausdruck, dass das elektrische Feld Stress auf die Grenzen jeder Region ausübt, die Ladung oder dielektrische Gradienten enthält. Aber es kann in eine lokale, volumetrische Form umgeschrieben werden, unter Verwendung des Divergenzsatzes:

$$\mathbf{f} = \nabla \cdot \mathbf{T} = \rho_e \mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon.$$

Der erste Term, $\rho_e \mathbf{E}$, ist die vertraute **Coulomb-Körperkraft**: Eine Ladungsdichte in einem Feld. Der zweite Term spielt nur eine Rolle, wo die Permittivität des Mediums sich rasch ändert, wie an Materialgrenzen. In der Luft ist ϵ im Wesentlichen uniform, also $\nabla \epsilon \approx 0$, und es bleibt

$$\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}.$$

Diese täuschend einfache Gleichung kodiert das gesamte Prinzip des elektroaerodynamischen Antriebs. Wenn ein Volumen Gas existiert, in dem Ionen (mit Dichte ρ_e) einem elektrischen Feld \mathbf{E} ausgesetzt sind, dann wirkt eine **Nettokraftdichte** auf dieses Gas. Die Magnitude des Gesamtschubs ist das Volumenintegral von $\rho_e \mathbf{E}$ über die Entladungsregion:

$$\mathbf{F} = \int_V \rho_e \mathbf{E} dV.$$

Die Elektroden spüren die gleiche und entgegengesetzte Reaktion und erzeugen Schub.

Impulsübertragung und die Rolle von Kollisionen

Ionen in der Luft reisen selten weit, bevor sie mit neutralen Molekülen kollidieren. Der **mittlere freie Weg λ** ist umgekehrt proportional zum Gasdruck p und zum Querschnitt σ :

$$\lambda \approx \frac{kT}{\sqrt{2\pi} d^2 p}$$

wobei d der Molekulardurchmesser ist. Auf Meereshöhe ist λ winzig – in der Größenordnung von Zehn-Nanometern. In der Mesosphäre (um 70 km) dehnt sich λ auf Millimeter oder Zentimeter aus.

Wenn ein Ion unter dem Feld beschleunigt, überträgt es Impuls durch Kollisionen an Neutralen. Jede Kollision teilt einen Bruchteil des gerichteten Ion-Impulses; der kumulative Ef-

fekt ist ein **Massenneutralfluss** – was Experimentatoren als *Ionenwind* bezeichnen. Das Gas bewegt sich vom Emitter zum Kollektor, und die Elektroden erfahren einen entgegengesetzten Reaktionsschub.

In sehr dichter Luft kollidieren Ionen zu oft; ihre Driftgeschwindigkeit sättigt sich, und Energie geht als Wärme verloren. In extrem dünner Luft sind Kollisionen zu selten; die Ionen fliegen frei, ziehen aber die Neutralen nicht effektiv mit. Zwischen diesen Extremen liegt ein **Süßpunkt**, wo der mittlere freie Weg effiziente Impulsübertragung erlaubt – genau der Region, die das Luftschild auf seinem Weg in den Raum durchquert.

Bei Drücken von etwa 10^{-2} bis 10^{-4} bar (entsprechend 40–80 km Höhe) können Ionen makroskopische Distanzen beschleunigen, bevor sie kollidieren, doch Kollisionen treten noch häufig genug auf, um Schub zu erzeugen. Die **elektroaerodynamische Kopplung** zwischen Feld und Gas ist am günstigsten.

Die Leistungs-Schub-Beziehung

Die elektrische Leistung, die an eine Entladung geliefert wird, ist $P = \int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} dV$, was etwa IV für konstanten Strom I und Spannung V ist. Der nützliche mechanische Ausgang ist Schub mal Geschwindigkeit der beschleunigten Luftmasse, aber im stationären Antrieb interessiert uns hauptsächlich das **Schub-zu-Leistungs-Verhältnis**, T/P .

Empirische Studien berichten T/P -Werte von wenigen Millinewton pro Watt (**mN/W**) bis fast **0.1 N/W** unter optimierten Bedingungen. In atmosphärischer Luft bei Standarddruck ist EAD ineffizient; aber bei reduzierten Drücken steigt die Ion-Mobilität, und Stromdichte kann bei niedrigeren Spannungen aufrechterhalten werden, was T/P verbessert.

Ein einfaches dimensionsanalytisches Argument verknüpft die Körperkraftdichte $f = \rho_e E$ mit der Stromdichte $J = \rho_e \mu E$, wobei μ die Ion-Mobilität ist. Dann

$$f = \frac{J}{\mu},$$

sodass bei gegebener Stromdichte eine höhere Mobilität (bei niedrigerem Druck) mehr Schub pro Strom ergibt. Die Gesamtleistung ist $P = JEV$, also skaliert **Schub-zu-Leistung** als

$$\frac{T}{P} \approx \frac{1}{E\mu},$$

was impliziert, dass niedrigere elektrische Felder oder höhere Ion-Mobilität die Effizienz steigern. Aber niedrigeres E reduziert auch Strom und damit Gesamtschub, also gibt es wieder ein Optimum.

Diese Beziehungen sind keine theoretischen Kuriositäten – sie bestimmen das Design jeder EAD-Fliese. Bei gegebener Höhe müssen Spannung, Spaltabstand und Emitter-Geometrie so abgestimmt werden, dass die **Paschen-Kurve** (die den Durchbruch-Spannung mit Druck-Abstand-Produkt verknüpft) erfüllt, aber nicht überschritten wird.

Paschens Gesetz für Luft kann approximativ ausgedrückt werden als

$$V_b = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln[\ln(1+1/\gamma_{se})]}$$

wobei A und B empirische Konstanten und γ_{se} der Sekundärelektronenemissionskoeffizient ist. Die variable Geometrie des Luftschiffs erlaubt dynamische Anpassung von d , dem Elektrodenabstand, um effiziente Corona-Entladung ohne Lichtbogen aufrechtzuerhalten, während der Umgebungsdruck beim Aufstieg abnimmt.

Feldgeometrie und Stress-Topologie

Frühe „Lifter“-Demonstrationen verwendeten einen dünnen Draht als Emitter und eine flache Folie als Kollektor. Die Feldlinien waren stark gekrümmmt, und die meiste Energie ging in die Aufrechterhaltung der Corona statt in nützlichen Schub. Die Effizienz war schlecht, weil das **Maxwell-Spannungsfeld** nicht mit der gewünschten Schubrichtung ausgerichtet war.

Die Schlüsselerkenntnis – entwickelt in theoretischer Arbeit vor dem MIT-Ionoflugzeug – war, dass elektrische Feld nicht als Nebenprodukt, sondern als primäre Designvariable zu behandeln. Der Schub entsteht aus dem **Integral des elektromagnetischen Stresses** entlang der Feldlinien, also ist das Ziel, diese Linien parallel und konsistent über eine weite Region zu gestalten. Die Analogie ist aerodynamisch: Wie glatter laminarer Fluss Widerstand minimiert, maximiert glatte elektrostatische Feldtopologie gerichteten Stress.

Diese „Feldtopologie-Engineering“ rahmt das Gerät als *elektrostatischen Aktuator* um, nicht als Plasmaspielzeug. Durch Kontrolle von Elektrodenkrümmung, Schutzmomentanen und dielektrischen Schichten kann E nahezu uniform über den Beschleunigungspfad gemacht werden, was quasi-linearen Stress erzeugt und den destruktiven Selbstfokus vermeidet, der Lichtbögen verursacht.

Die Konsequenz ist Skalierbarkeit. Wenn Elektroden in Quadratmeter-Fliesen tesselliert werden, jede mit eigenem Hochspannungswandler und Steuerlogik, kann der gesamte Luftschiff-Umschlag in ein gigantisches verteiltes EAD-Array umgewandelt werden. Es gibt keine zu synchronisierenden beweglichen Teile, nur zu koordinierende Felder.

Schubdichte und der Weg zur Skalierbarkeit

Die volumetrische Körperkraftdichte ist $f = \rho_e E$. Die Ladungsdichte in einer typischen Corona-Entladung bei Atmosphärendruck liegt in der Größenordnung von 10^{-5} bis 10^{-3} C/m^3 . Bei reduziertem Druck kann sie etwas fallen, aber das elektrische Feld E kann sicher auf Zehn Kilovolt pro Zentimeter erhöht werden, ohne Durchbruch.

Bei $\rho_e = 10^{-4} \text{ C/m}^3$ und $E = 10^5 \text{ V/m}$ beträgt die Kraftdichte $f = 10 \text{ N/m}^3$. Über eine 1 m dicke aktive Region verteilt ergibt das einen Oberflächendruck von 10 N/m^2 – äquivalent zu wenigen Millipascal. Das klingt klein, aber über Tausende Quadratmeter wird es signifikant. Eine 1000 m^2 Fläche mit 10 N/m^2 Stress erzeugt 10.000 N Schub, genug, um ein Mehrtonnen-Fahrzeug bei Millig-Levels zu beschleunigen – genau dem Regime für wochenlanges Orbit-Heben.

Solche Schätzungen illustrieren, warum EAD, trotz niedriger Leistungsdichte, für **große, leichte Strukturen** in dünner Luft machbar wird. Im Gegensatz zu einer Raketendüse, die Effizienz nur bei hoher Leistungsdichte gewinnt, gewinnt EAD Vorteil aus Fläche. Der Um-schlag des Luftschiffs bietet reichlich Fläche; sie in eine aktive Oberfläche umzuwandeln ist eine natürliche Passung.

Die Süßzone der oberen Atmosphäre

Jedes physikalische System hat eine Betriebsnische. Für EAD-Antrieb ist der beste Bereich, wo der Gasdruck niedrig genug ist, um hohe Spannungen und lange Ionen-freie Wege zu erlauben, aber nicht so niedrig, dass das Plasma kollisionslos wird.

Unter etwa 20 km ist die Atmosphäre zu dicht: Ion-Mobilität niedrig, Durchbruchsspannungen hoch, Energie verschwendet als Gaswärme. Oberhalb von etwa 100 km wird die Luft zu verdünnt: Ionisation kann nicht kontinuierlich aufrechterhalten werden, und die neutrale Reaktionsmasse verschwindet. Zwischen etwa 40 und 80 km liegt ein **Übergangsreich** – die untere Mesosphäre –, wo EAD-Antrieb seine besten Schub-zu-Leistungs-Verhältnisse erzeugen kann.

Zufällig ist dies auch der Höhenbereich, wo Solarleistung nahezu ungedämpft bleibt und aerodynamischer Widerstand um Größenordnungen kleiner als auf Meereshöhe ist. Es ist ein schmales, aber nachsichtiges Fenster, ein natürlicher Korridor für ein neues Fahrzeugtyp: Weder Flugzeug noch Rakete, sondern etwas, das im Überlappungsbereich lebt.

Effizienz und Energiefluss

Zu jedem Zeitpunkt wird die elektrische Eingangsleistung P aufgeteilt in:

1. **Nützliche mechanische Schubleistung** $P_T = T v_{\text{eff}}$, wobei v_{eff} die effektive Abgasgeschwindigkeit des Luftflusses ist.
2. **Ionisationsverluste** P_i , die Energie, um das Plasma aufrechtzuerhalten.
3. **Widerstandsverluste** P_r , durch ohmsche Erwärmung und Leckage.
4. **Strahlungsverluste** P_γ , emittiert als Licht (der vertraute Corona-Glanz).

Die Gesamteffizienz ist $\eta = P_T / P$. Experimente deuten an, dass η in dichter Luft einige Prozent erreichen kann und potenziell Zehn-Prozent in optimiertem niedrigdruck-Betrieb. Obwohl bescheiden, reichen diese Zahlen für ein solarbetriebenes System über lange Dauern, wo Effizienz gegen Zeit getauscht werden kann.

Im Gegensatz zu chemischem Antrieb, der hohe Effizienz pro Sekunde erreichen muss, um Treibstoff zu minimieren, kann ein solar-EAD-Luftschiff Ineffizienz ertragen, wenn es **unbegrenzt betrieben** werden kann. Das Erfolgsmaß ist nicht spezifischer Impuls, sondern **spezifische Geduld**: Über Tage akkumulierte Joule.

Vom Maxwell-Stress zum makroskopischen Schub

Um die Verbindung zwischen Feldtheorie und Alltagserfahrung zu illustrieren, betrachten wir den Parallelplatten-Kondensator im Vakuum. Der Druck zwischen den Platten ist

$p = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$. Bei $E = 10^6 \text{ V/m}$ beträgt $p \approx 4.4 \text{ N/m}^2$. Multipliziert mit Fläche ergibt sich die mechanische Kraft, um die Platten zu trennen. Elektrostatischer Stress ist wörtlich mechanischer Druck.

EAD-Antrieb ersetzt eine Platte durch die Atmosphäre selbst. Die Ionen sind das Medium, durch das der Feldstress übertragen wird. Statt statischem Druck erhalten wir gerichteten Fluss. Die Gleichung $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ ist das dynamische Analogon zu jenem statischen Kondensator-Druck.

Wenn über die Oberfläche des Luftschiffs summiert, wird der integrierte Stress zu einem Nettoschubvektor, genau wie der integrierte Druck über eine Flügelfläche Auftrieb erzeugt. Die Analogie ist tief: Aerodynamischer Auftrieb ist der Impulsfluss der Luft, die von einer Oberfläche abgelenkt wird; EAD-Schub ist der Impulsfluss der Ionen, die von einem Feld beschleunigt werden.

Das MIT-Ionoflugzeug und experimenteller Beweis

Über Jahrzehnte wiesen Skeptiker EAD als Labor-Kuriosität ab. Dann demonstrierte 2018 ein kleines festflügiges Flugzeug vom **MIT stationären, propellfreien Flug** allein durch elektroaerodynamischen Schub. Das „Ionoflugzeug“ wog etwa 2,5 Kilogramm und flog Dutzende Meter unter Batteriepower. Sein Schub-Gewichts-Verhältnis war klein, aber der Erfolg historisch: Das erste schwerer-als-Luft-Fahrzeug, das durch ionischen Antrieb in der Luft gehalten wurde.

Entscheidend war, dass die Theorie und konzeptionelle Grundlage, die zu dieser Demonstration führten, bereits unabhängig entwickelt wurden. Der theoretische Rahmen in *Elektroaerodynamischer Antrieb* (siehe https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html) beschrieb denselben Mechanismus in Terms von **Maxwell-Stress** und **Coulomb-Körperkraft** Jahre früher, mit Be- tonung auf Feldtopologie und Skalierbarkeit statt Corona-Chemie.

Das MIT-Ionoflugzeug bewies die Praktikabilität des Effekts in dichter Luft. Das Rise-Fly-Orbit-Projekt zielt darauf ab, es in dünne Luft zu erweitern, wo die Physik noch günstiger wird. Wenn ein kleines Flugzeug bei 1 bar fliegen kann, kann ein solarbetriebenes Luftschiff bei Mikrobar in den Orbit fliegen, mit genug Geduld und Sonnenlicht.

Die Tugend der Einfachheit

EAD-Antrieb ist konzeptionell elegant: Keine beweglichen Teile, keine Verbrennung, kein Hochgeschwindigkeitsabgas, keine Kryogenik. Seine Komponenten sind von Natur aus robust – Elektroden, Dielektrika, Leistungswandler und photovoltaische Häute. Das System skaliert natürlich mit Fläche, nicht Masse.

Die technische Herausforderung verschiebt sich von Thermodynamik zu **Elektrotechnik und Materialwissenschaften**: Corona-Erosion verhindern, Ladungsleckage managen und Hochspannungsisolierung in variierenden Drücken aufrechterhalten. Diese sind mit modernen Materialien und Mikroelektronik lösbar.

Da der EAD-Mechanismus nur von Feldgeometrie und Ion-Mobilität abhängt, ist er **inherently modular**. Jeder Quadratmeter der Luftschriftfahrt kann als Fliese mit bekannten T/P - und Spannungscharakteristika behandelt werden. Der Gesamtschub des Fahrzeugs ist die Vektorsumme Tausender unabhängiger Fliesen. Diese Modularität erlaubt anmutigen Abbau – Ausfall einiger Module kompromittiert nicht das gesamte Fahrzeug.

Das elektroaerodynamische Luftschiff als System

Wenn mit Solarenergie gekoppelt, wird EAD-Antrieb nicht nur zu einer Schubquelle, sondern zu einem **Klimasystem** für das Fahrzeug. Dieselben Felder, die Schub erzeugen, ionisieren Spurengase, reduzieren Oberflächenladung und beeinflussen potenziell Grenzschicht-Eigenschaften. Das elektrische Feld kann sogar als einstellbarer „elektrostatischer Segel“ dienen, der schwach mit dem Erdmagnetfeld oder dem umgebenden Plasma in der oberen Atmosphäre interagiert.

Langfristig kann man aktive Widerstandskontrolle durch Manipulation von Oberflächenladungsverteilungen vorstellen – ein **elektrodynamisches Widerstandsschild**, das lokalen Feldstress variiert, um den Flugpfad ohne mechanische Steuerflächen zu trimmen.

Diese Möglichkeiten heben EAD-Antrieb über eine Kuriosität hinaus in den Bereich einer allgemeinen, festkörperbasierten Flugsteuerungstechnologie – anwendbar, wo immer Gase oder Plasmen durch elektrische Felder polarisiert und beschleunigt werden können.

Ingenieurarchitektur und Flugdynamik

Der fundamentale Vorteil des Rise-Fly-Orbit-Konzepts liegt nicht in exotischen Materialien oder revolutionärer Physik, sondern in der **Umordnung vertrauter Prinzipien**. Auftrieb, Solarenergie und Elektrostatik sind alle gut verstanden. Neu ist die Art, wie sie in ein einziges Kontinuum sequenziert werden: *Ein Aufstieg ohne Moment der Diskontinuität*.

Raketen durchlaufen diskrete Regime – Start, Ausbrennen, Küstung, Orbit. Das elektroaerodynamische Luftschiff erlebt hingegen nur graduelle Übergänge. Es steigt durch Leichtigkeit, fliegt durch Auftrieb und orbitiert durch Trägheit. Jede Phase verschmilzt mit der nächsten, gesteuert durch dasselbe stetige Zusammenspiel von Auftriebs-, aerodynamischen und elektrostatischen Kräften.

Der Umschlag: Struktur als Atmosphäre

Der Umschlag des Luftschiffs muss widersprüchliche Anforderungen erfüllen: Er muss **leicht und stark, leitfähig und isolierend, durchlässig für Sonnenlicht, aber strahlungsresistent** sein. Diese sind durch Schichtbau versöhnbar.

Die äußere Schicht kann ein **metallisierter Polymer** sein – z. B. eine dünne Folie aus aluminiumbeschichtetem Kapton oder Polyethylenterephthalat. Diese Schicht bietet UV-Schutz und dient als partielle Elektrodenoberfläche für EAD-Fliesen. Darunter liegt eine **di-elektrische Schicht**, die unerwünschte Entladungen verhindert und den Spalt zum inneren Kollektor-Elektrode definiert. Die innere Struktur ist ein Netz aus gespannten Membra-

nen und Streben, das die Gesamtgeometrie bei kleinem innerem Überdruck aufrechterhält, in der Größenordnung von $\Delta p \approx 300 \text{ Pa}$ – nur wenige Tausendstel des Atmosphärendrucks.

Dieser Überdruck reicht, um den Umschlag straff zu halten, verursacht aber keine signifikante strukturelle Masse. Effektiv ist das gesamte Fahrzeug ein enormer, leichter Kondensator, dessen Haut geladen und lebendig mit Feldlinien ist.

Das innere Volumen ist mit einem Auftriebsgas gefüllt – Wasserstoff oder Helium. Da der erforderliche Überdruck klein ist, sind die lasttragenden Anforderungen an das Material bescheiden. Die Haupt Herausforderung ist Gaspermeabilität und UV-Abbau über lange Missionen, beides adressierbar mit modernen Beschichtungen und Schichtfolien.

Wasserstoff oder Helium

Die Gaswahl formt die Persönlichkeit des Fahrzeugs.

Wasserstoff bietet den höchsten Auftrieb, etwa 10 % mehr als Helium. Dieser Unterschied wird substanziell, wenn das Gesamtvolumen Millionen Kubikmeter erreicht. Wasserstoff ist auch leichter zu beschaffen und kann sogar *in situ* durch solarbetriebene Elektrolyse von Wasser erzeugt werden. Sein Nachteil ist natürlich Entflammbarkeit.

Die Präsenz hochspannender Elektrostatik macht Wasserstoff-Management nicht trivial. Sicherheit hängt von metikuloser Kompartimentierung, elektrostatischer Abschirmung und Belüftung ab. Die EAD-Module selbst sind versiegelt und von Gas-Zellen durch dielektrische Barrieren getrennt, und Potentialdifferenzen über den Rumpf minimiert durch symmetrische Ladungsverteilung.

Helium hingegen ist inert und sicher, bietet aber weniger Auftrieb und höhere Kosten. Sein Hauptmangel ist Knappheit; großkalige Nutzung könnte die Versorgung belasten. Für frühe Testfahrzeuge und öffentliche Demonstrationsflüge ist Helium die kluge Wahl. Für operative orbitale Versuche in abgelegenen Korridoren könnte Wasserstoff durch Leistung und Kosten gerechtfertigt sein.

In jedem Fall ist der Umschlag-Design weitgehend kompatibel; nur Gas-Handling- und Sicherheitssysteme unterscheiden sich.

Solarenergie und Energiemanagement

Die Sonne ist der Motor des Fahrzeugs. Jeder Watt elektrische Energie beginnt als Sonnenlicht, absorbiert von der photovoltaischen Haut.

Hocheffiziente, ultraleichte Photovoltaik – Dünnfilm-Galliumarsenid oder Perowskit-Komposite, laminiert auf die Luftschiiffoberfläche – kann spezifische Leistungen nahe **300–400 W/kg** erreichen. Die Arrays sind konform angeordnet, um aerodynamische Glätte zu wahren. Das Energiemanagement ist dezentral: Jeder Panel-Abschnitt speist einen lokalen Maximum-Power-Point-Tracker (MPPT), der Spannung an die Hochspannungsbus reguliert, die die EAD-Fliesen versorgt.

Da das Fahrzeug Tag-Nacht-Zyklen erlebt, trägt es einen bescheidenen **Energiepuffer** – leichte Batterien oder Superkondensatoren –, um niedrigstufige Operationen durch die Dunkelheit zu halten. Aber diese sind nicht groß; die Designphilosophie des Systems ist **direkter Solarantrieb**, nicht gespeicherte Energie. In orbitalen Höhen kann das Fahrzeug Sonnenlicht fast kontinuierlich jagen, nur kurz in die Finsternis eintauchen.

Thermische Kontrolle erfolgt strahlend. Mit vernachlässigbarer Konvektion in großer Höhe hängt Wärmeabfuhr von **hohemissionsfähigen Oberflächen** und Leitpfaden zu Strahlern ab. Zum Glück ist der EAD-Prozess relativ kühl – keine Verbrennung –, und die Hauptthermische Last kommt von absorbiertem Sonnenlicht.

Die elektroaerodynamischen Fliesen

Jeder Quadratmeter des Umschlags fungiert als **EAD-Fliese** – eine selbstenthaltene Antriebszelle mit Emitter, Kollektor und kleiner Steuerschaltung. Der Emitter kann ein feines Gitter scharfer Spitzen oder Drähte bei hohem positiven Potential sein, während der Kollektor ein breites Netz bei Erd- oder negativem Potential gehalten wird. Der Raum dazwischen ist eine kontrollierte Entladungsregion.

Wenn aktiviert, etabliert die Fliese ein elektrisches Feld \mathbf{E} , erzeugt eine Ladungsdichte ρ_e und produziert lokalen Schub $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$, gerichtet tangential entlang der Oberfläche. Durch Modulation der Spannungen auf verschiedenen Fliesen kann das Luftschiff ohne bewegliche Teile steuern, neigen und rollen.

Adaptive Geometrie ist Schlüssel. Mit fallendem Umgebungsdruck steigt der mittlere freie Weg. Um effiziente Entladung zu halten, muss der effektive Spaltabstand d zwischen Emitter und Kollektor ungefähr proportional zu $1/p$ zunehmen. Dies kann durch **flexible, aufblasbare dielektrische Abstandhalter** erreicht werden, die sich leicht ausdehnen, wenn der äußere Druck fällt, oder durch **elektronische Modulation** von Potentialgradienten, um größere Spalten zu simulieren.

Jede Fliese meldet Telemetrie – Strom, Spannung, Bogenzähler – an einen zentralen Controller. Bei Bogen oder Abbau wird sie abgeschaltet und umgangen. Das modulare Design bedeutet, dass Verlust einzelner Fliesen den Gesamtschub kaum beeinflusst.

Vom Auftrieb zum Schub

Der Flug beginnt sanft. Beim Start steigt das Luftschiff auftriebsbasiert in die Stratosphäre. Während des Aufstiegs arbeitet das EAD-System im Niedrigleistungsmodus und liefert geringen Schub für Stabilisierung und Driftkontrolle.

Bei etwa 30–40 km Höhe, wo die Luft dünn, aber noch kollisional ist, beginnt die Hauptbeschleunigung. Das Luftschiff dreht sich allmählich zu horizontalem Flug und orientiert seine Längsachse in die gewünschte Orbitrichtung.

Zunächst wird Schub zwischen horizontaler Beschleunigung und Auftriebsverstärkung balanciert. Der Restauftrieb des Fahrzeugs gleicht viel von seinem Gewicht aus; der EAD-Schub liefert sowohl vordere als auch leicht aufwärts gerichtete Komponenten. Mit zuneh-

mender Geschwindigkeit wächst dynamischer Auftrieb, und Auftrieb wird vernachlässigbar. Der Übergang ist sanft – es gibt keinen „Abhebemoment“, da das Luftschiff nie auf einer Landebahn saß.

Der Dreiwochen-Anstieg

Betrachten wir eine repräsentative Fahrzeugmasse von $m = 2000 \text{ kg}$. Um Orbitgeschwindigkeit $v = 7.8 \times 10^3 \text{ m/s}$ in $t = 1.8 \times 10^6 \text{ s}$ (drei Wochen) zu erreichen, beträgt der erforderliche durchschnittliche Schub

$$T = m \frac{v}{t} = 2000 \times \frac{7.8 \times 10^3}{1.8 \times 10^6} \approx 8.7 \text{ N}.$$

Acht Newton – das Gewicht einer kleinen Orange – ist der Gesamtschub, der benötigt wird, um den Orbit zu erreichen, wenn kontinuierlich über drei Wochen angewendet.

Wenn das T/P des Systems **0.03 N/W** beträgt, typisch für effizienten EAD-Betrieb bei niedrigem Druck, erfordert die Erzeugung von 8,7 N nur etwa **290 W** Leistung. Das scheint verblüffend klein, und in der Praxis werden zusätzliche Widerstandsverluste den Bedarf auf Zehn Kilowatt heben. Aber Solarpaneele, die einige Hundert Quadratmeter abdecken, können das leicht liefern.

Lassen wir einen Sicherheitsfaktor von 100 für Ineffizienzen und Widerstand ein: Etwa **30 kW** elektrische Leistung. Mit 15 % Gesamteffizienz von Sonnenlicht zu Schub muss das Fahrzeug etwa **200 kW Solarleistung** ernten. Das entspricht etwa 700 Quadratmetern aktiver Solarfläche bei 300 W/m² Ausgang – eine Fläche kleiner als ein Fußballfeld, leicht in ein 100 Meter langes Luftschiff integriert.

Diese einfache Arithmetik demonstriert, dass der **Energiefluss plausibel** ist. Was Raketen durch Leistungsdichte erreichen, erreicht das Luftschiff durch Geduld und Fläche.

Widerstand und der Hochaltitude-Korridor

Widerstand bleibt der Hauptenergie-Senke. Die Widerstandskraft ist $F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_D$, und die entsprechende Leistung $P_D = F_D v = \frac{1}{2} \rho v^3 A C_D$.

Bei 50 km gilt $\rho \approx 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Bei $A = 100 \text{ m}^2$, $C_D = 0.05$ und $v = 1000 \text{ m/s}$ ergibt $P_D = 0.5 \times 10^{-3} \times (10^3)^3 \times 100 \times 0.05 = 2.5 \times 10^6 \text{ W}$.

Das sind 2,5 Megawatt – zu hoch. Aber bei 70 km, wo $\rho = 10^{-5} \text{ kg/m}^3$, ergibt dieselbe Konfiguration nur 25 kW Widerstandsleistung. Daher die Strategie: **Klettern während der Beschleunigung**, auf einer Trajektorie bleiben, wo ρv^3 ungefähr konstant bleibt.

Der optimale Korridor ist einer mit stetig verdünnernder Luft, vielleicht 40–80 km Höhe, wo die Atmosphäre gerade genug neutrale Dichte für EAD-Funktion bietet, aber wenig genug, um Widerstand handhabbar zu halten.

Fahrzeugsteuerung und Stabilität

Ohne Propeller oder Flossen kommt Stabilität aus Feldsymmetrie. Differentiale Aktivierung von Fliesen liefert Drehmoment. Wenn die vorderen Fliesen links etwas mehr Schub erzeugen als rechts, gähnt das Fahrzeug sanft. Nicksteuerung wird durch Bias von oberen und unteren Fliesen erreicht. Da der Schub pro Fliese klein ist, ist die Reaktion langsam, aber das Fahrzeug operiert in einem Regime, wo Wendigkeit unnötig ist.

Haltungsensoren – Gyroskope, Beschleunigungsmesser, Stern-Tracker – füttern ein digitales Steuersystem, das Orientierung für maximale Sonneneinstrahlung und korrekten Flugpfad hält. Die enorme Größe des Fahrzeugs und das langsame Flugregime machen es bemerkenswert stabil.

Thermische und elektrische Sicherheit

EAD-Betrieb beinhaltet Zehn bis Hunderte Kilovolt bei niedrigem Strom. In der dünnen, trockenen Luft der Stratosphäre verhält sich Isolation anders: Bögen können lange Distanzen über Oberflächen propagieren. Das elektrische Design des Luftschiffs behandelt daher die gesamte Struktur als kontrolliertes Potentialsystem. Leitende Pfade sind redundant, mit Isolationsschichten, die Gas-Zellen von HV-Leitungen trennen.

Bögen sind nicht katastrophal – sie neigen dazu, lokal und selbstlöschend zu sein –, können aber Elektroden schädigen. Jede Fliese überwacht ihre Stromwellenform; bei Spiken-durchschlag reduziert der Controller Spannung oder schaltet das betroffene Modul für Sekunden aus.

Thermisch bedeutet das Fehlen von Konvektion, dass jede lokale Erwärmung durch Leitung zu strahlenden Paneelen verteilt werden muss. Die Materialien werden für hohe Emissivität und niedrige Absorption im Infrarot gewählt, um überschüssige Wärme ins All zu strahlen.

Skalierung und Modularität

Das System skaliert durch Fliesen, nicht durch Erhöhung der Spannung. Verdopplung der Fliesenanzahl verdoppelt den Schub; es gibt keinen Bedarf für größere Entladungen. Dies macht die Architektur **linear skalierbar** von Labor-Modellen zu orbitalen Fahrzeugen.

Ein praktischer Prototyp könnte als kleines, heliumgefülltes Plattform mit einem Dutzend Quadratmetern EAD-Oberfläche beginnen, das Millinewton-Schübe über Stunden misst. Größere Demonstratoren könnten folgen, jeder erweiternd in Fläche und Leistung. Die finale orbitale Version könnte Hunderte Meter umspannen, mit Tausenden unabhängig gesteuerter Fliesen, betrieben unter voller Solarleistung für Monate am Stück.

Da alle Komponenten festkörperbasiert sind, hat das System inherent langes Service-Leben. Es gibt keine Turbinenlager oder Verbrennungszyklen zum Verschleiß – nur graduelle Elektroden-Erosion und Materialalterung. Mit sorgfältigem Design könnte die mittlere Zeit zwischen Ausfällen Jahre erreichen.

Aufstiegsprofile und Höhenübergänge

Die komplette Mission kann als glatte Spirale in der (v, ρ) -Ebene visualisiert werden: Mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt Dichte ab. Der Pfad wird so gewählt, dass das Produkt ρv^3 – das die Widerstandsleistung bestimmt – unter einer Schwelle bleibt, die das Solar-System liefern kann.

1. **Auftriebsklettern** auf 30–40 km.
2. **Beschleunigungsphase:** Halten von $P_D \approx 20\text{--}50 \text{ kW}$ ungefähr durch Anpassung von Nick und Höhe.
3. **Übergang zum orbitalen Regime:** Oberhalb 70 km verschwinden Auftrieb und Auftrieb, und das Luftschiff wird effektiv zu einem Satelliten, der noch die Atmosphäre streift.

Der Übergang von „Flug“ zu „Orbit“ ist keine scharfe Grenze. Die Atmosphäre verblasst graduell; Schub kompensiert Widerstand, bis Widerstand irrelevant wird. Der Pfad des Fahrzeugs wird kreisförmig statt ballistisch, und es bleibt unbestimmt in der Luft.

Energiebilanz und Ausdauer

Integriert über den vollen Aufstieg ist die Gesamteingangsenergie von der Sonne enorm im Vergleich zu dem Benötigten. Sogar bei bescheidener Sammelrate von 100 kW akkumuliert drei Wochen kontinuierlicher Betrieb

$$E = 100,000 \times 1.8 \times 10^6 = 1.8 \times 10^{11} \text{ J.}$$

Für ein 2000 kg Fahrzeug sind das **90 MJ/kg** – dreimal die orbitale kinetische Energieanforderung. Der Großteil dieser Energie wird an Widerstand und Ineffizienzen verloren, aber der Spielraum ist großzügig.

Das ist die stille Magie solarer Geduld: Wenn Zeit ausgedehnt wird, ersetzt Energieüberfluss Leistungsnot.

Wartung, Rückkehr und Wiederverwendung

Nach Abschluss seiner orbitalen Mission kann das Luftschiff graduell durch Umkehrung der EAD-Feldpolarität abbremsen. Widerstand steigt beim Abstieg; derselbe Mechanismus, der es hob, wirkt nun als Bremse. Das Fahrzeug kann in die Stratosphäre eintreten und unter Restauftrieb schweben.

Da keine verbrauchbaren Stufen verworfen werden, ist das System **vollständig wiederverwendbar**. Der Umschlag kann gewartet, neu befüllt und neu gestartet werden. Wartung beinhaltet Austausch degraderter Fliesen oder Folien statt Motoren-Neubau.

Im Kontrast zu chemischen Raketen, wo jeder Start Tanks und Treibstoff verbraucht, ist das EAD-Luftschiff ein **energie-recycling Raumfahrzeug**. Die Sonne betankt es kontinuierlich; nur Verschleiß erfordert menschliches Eingreifen.

Die breitere ingenieurtechnische Bedeutung

Dieselben Technologien, die ein solar-EAD-Luftschiff ermöglichen – leichte Photovoltaik, Hochspannungs-Power-Elektronik, Dünnfilm-Dielektrika – haben unmittelbare terrestrische Anwendungen. Stratosphärische Kommunikationsplattformen, hochaltitude-Klimasensoren und langlebige Drohnen profitieren von denselben Entwicklungen.

Indem wir ein System verfolgen, das ohne Treibstoff in den Orbit gelangen kann, erfinden wir auch eine neue Klasse **festkörperbasierter Luftfahrzeuge** – Maschinen, die nicht durch Verbrennung, sondern durch Feldmanipulation fliegen.

In diesem Sinne steht das Rise-Fly-Orbit-Projekt in einer Linie mit dem Wright Flyer und den ersten flüssigkeitgetriebenen Raketen: Nicht eine perfekte Technologie, sondern ein **Beweis des Prinzips**, das transformiert, was „Flug“ bedeuten kann.

Regulierung, Strategie und die Philosophie des langsam Aufstiegs

Die Physik eines solar-elektroaerodynamischen Luftschiffs ist permissiv; das Gesetz nicht. Heutige Flugregeln teilen den Himmel in sauber abgegrenzte Domänen: **Luftraum**, regiert von Luftfahrtgesetzen, und **Weltraum**, regiert von Raumgesetzen. Dazwischen liegt eine graue Zone – zu hoch für Flugzeugzertifizierung, zu niedrig für Orbit-Registrierung. Das Luftschiff zum Orbit lebt genau in diesem Grau, bewegt sich kontinuierlich durch Höhen, die auf dem Papier keiner Kategorie angehören.

Warum es „unmöglich“ ist

Luftraum-Gesetze gehen von Fahrzeugen aus, die innerhalb von Stunden starten und landen. Sie erfordern zertifizierte Motoren, aerodynamische Steuerflächen und die Fähigkeit, Verkehr nachzugeben. Keine dieser Annahmen passt zu einem autonomen, solarbetriebenen Ballon, der Wochen über 60 km verweilen kann.

Startfahrzeug-Regulierungen beginnen, wo Raketen zünden: Ein diskreter Zündung, ein Startplatz und ein Flugabbruchsystem, das Explosionen enthält. Unser Luftschiff hat keines davon. Es steigt so langsam wie eine Wolke; es gibt keinen „Startmoment.“ Trotzdem, da es schließlich Mach 1 überschreitet und Orbitgeschwindigkeit erreicht, fällt es unter Raumfahrt-Jurisdiktion. Das Ergebnis ist paradox: Es kann nicht legal als Flugzeug fliegen, muss aber als Rakete lizenziert werden, der es nicht ähnelt.

Eine hybride atmosphärisch-orbitale Fahrzeugklasse

Das Heilmittel ist die Anerkennung einer neuen Kategorie – ein **Hybrides Atmosphärisch-Orbitales Fahrzeug (HAOV)**. Seine definierenden Merkmale wären:

- **Kontinuierliches Domänenüberschreiten:** Aufstieg von der Oberfläche zum Nahraum ohne diskrete Stufen.
- **Niedriger kinetischer Energiefloss:** Gesamtmomentenaustausch mit der Atmosphäre um Größenordnungen unter dem von Raketen.

- **Passives Fehlersicheres Verhalten:** Bei Leistungsverlust treibt und sinkt das Fahrzeug; es fällt nicht ballistisch.
- **Kooperatives Tracking:** Immer sichtbar für Radar und Satellitensensoren, sendet seinen Statusvektor wie ADS-B-Transponder für Flugzeuge.

Der HAOV-Rahmen würde Zertifizierung solcher Fahrzeuge unter **leistungsbasierter** statt **hardwarebasierter** Kriterien erlauben – Sicherheit definieren in Terms von Energieabgabe, Bodenfußabdruck und autonomer Sinkfähigkeit statt Präsenz von Motoren oder Treibstoff.

Ozeanische oder Wüsten-**Korridore** könnten designiert werden, wo HAOVs kontinuierlich operieren dürfen, überwacht durch bestehende Raumverkehrsnetze. Ihr Aufstieg würde weniger Gefahr für Luftfahrt darstellen als ein einzelner Wetterballon, doch aktuelle Regeln bieten keinen Pfad.

Die Politik der Geduld

Regulierung folgt Kultur, und Kultur ist speed-süchtig. Luft- und Raumfahrtmeilensteine werden in Schub-Gewicht-Verhältnissen und Minuten zum Orbit gemessen. Die Idee, dass ein Fahrzeug **drei Wochen** zum Orbit braucht, klingt zunächst wie Regression. Aber Geduld ist der Preis der Nachhaltigkeit. Das Luftschiff schlägt ein anderes Maß vor: Nicht „wie schnell können wir Energie verbrennen“, sondern „wie kontinuierlich können wir sie ansammeln.“

Für Raumagenturen, die an Startfenstern und Countdowns gewöhnt sind, fordert ein solches Fahrzeug einen Operationswechsel: Missionsplanung nach Jahreszeiten statt Sekunden; orbitale Einsätze, die von Sonnenlichtgeometrie abhängen, nicht von Plattformverfügbarkeit. Doch dieser Wandel passt zum breiteren Turn zu **steady-state Infrastruktur** – solar-elektrische Raumfahrzeuge, wiederverwendbare Stationen, persistente Klimaplattformen.

Strategischer Wert

Ein wiederverwendbares solar-EAD-Fahrzeug bietet Fähigkeiten, die keine Rakete oder Flugzeug matchen kann:

- **Persistente Hochaltitude-Beobachtung und Kommunikation:** Vor vollem Orbit kann das Luftschiff Monate in der oberen Stratosphäre schweben, Daten relayen oder Erde abbilden.
- **Inkrementelle Frachtlieferung:** Kleine Nutzlasten können sanft gehoben werden, ohne akustische und thermische Schocks des Starts.
- **Planetare Analoge:** Auf dem Mars, wo Orbitgeschwindigkeit nur 3,6 km/s ist und Atmosphärendruck lange Ionenbeschleunigung begünstigt, könnte dieselbe Architektur noch besser funktionieren.
- **Umweltstewardship:** Kein Abgas, keine Treibstoffauslässe, vernachlässigbarer akustischer Impact.

Wirtschaftlich würden die ersten operativen HAOVs Raketen nicht ersetzen, sondern ergänzen, Nischen bedienen, wo Nutzlast-Geduld Dringlichkeit überwiegt. Strategisch würden sie den Zugang zum Nahraum von Treibstoffversorgungsketten entkoppeln – ein attraktives Feature für Raumagenturen, die nachhaltige Infrastruktur suchen.

Die Regelbuch-Ingenieurkunst

Eine HAOV-Kategorie zu schaffen ist weniger Lobbying als **Messung**. Regulatoren vertrauen Daten. Der Weg vorwärts ist experimentelle Transparenz:

1. **Helium-basierte Demonstratoren** in abgelegenen Korridoren, instrumentiert, um Trajektorie, Energieverbrauch und Fehlverhalten aufzuzeichnen.
2. **Kontinuierliche Telemetrie**, geteilt mit Zivilluftfahrt- und Raumtracking-Netzen, um vorhersehbare Flugdynamiken zu beweisen.
3. **Simulation und Risikomodelle**, die zeigen, dass schlammster Fall kinetischer Energiefluss über bewohnten Gebieten vernachlässigbar ist.

Sobald Agenturen quantifizierte Evidenz sehen, dass ein HAOV Flugzeuge oder Bodenpopulationen nicht schaden kann, folgt die rechtliche Architektur – wie sie es für Hochaltitude-Ballons und Drohnen zuvor tat.

Ethische Dimension

Langsamer Flug hat moralisches Gewicht. Chemische Starter verschmutzen nicht, weil Ingenieure achtlos sind, sondern weil Physik keine Zeit zum Recyceln ihrer Wärme bietet. Ein solar-Luftschiff verbraucht hingegen nichts Unwiederbringliches. Es ersetzt Lärm durch Stille, Blitz durch Glühen. Sein Aufstieg wäre von der Erde sichtbar als heller, ungetriebener Punkt, ein menschliches Artefakt, das ohne Gewalt klettert.

In einem Zeitalter der Dringlichkeit ist eine solche bewusste Bewegung eine Aussage: Dass technologischer Ehrgeiz nicht explosiv sein muss, um tiefgehend zu sein.

Die Geduld des Lichts

Wenn eine Rakete den Orbit erreicht, tut sie das durch rohe Beschleunigung: Sekunden der Verbrennung, die den Himmel erzittern lassen. Das elektroaerodynamische Luftschiff kommt anders an. Jeder Photon, der seine Haut trifft, trägt ein Flüstern von Impuls, vermittelt durch Elektronen, Ionen und die ruhige Mathematik von Maxwells Gleichungen. Über drei Wochen akkumulieren diese Flüster zum Orbit.

Derselbe Ausdruck – $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ –, der einen Mikroampere Ion-Drift in einem Labor beschreibt, regiert auch einen Tausend-Tonnen-Tragkörper, der durch die obere Atmosphäre gleitet. Die Skala ändert sich; das Prinzip nicht. Maxwells Tensor, Coulombs Gesetz und die Geduld des Sonnenlichts sind universal.

Wenn die Menschheit lernt, diese Geduld auszunutzen, gewinnen wir einen neuen Weg, die Erde zu verlassen – einen, der unbestimmt wiederholbar ist, angetrieben von demselben Stern, der uns erhält.

Zu einem Zeitalter reversiblen Flugs

Chemische Raketentechnik ist eine Einweg-Geste: Enormer Aufwand, um den Orbit zu erreichen, und abruptes Ende bei Wiedereintritt. Das elektroaerodynamische Luftschiff schlägt einen **reversiblen Pfad** vor. Es kann nach Belieben klettern und sinken, verweilen irgendwo von der Troposphäre bis zum Orbit. Es ist sowohl Raumfahrzeug als auch Habitat, Fahrzeug und Station.

In dieser Kontinuität liegt eine philosophische Umkehrung: Raumfahrt nicht als Abreise, sondern als Erweiterung der Atmosphäre. Der Gradient von Luft zu Vakuum wird zu navigierbarem Terrain. Solche Fahrzeuge würden die Linie zwischen Meteorologie und Astronautik verwischen, die „Raumkante“ in einen lebendigen Arbeitsraum statt Barriere verwandeln.

Schlussreflexionen

Keine neue Physik ist nötig – nur Ausdauer, Präzision und neu erdachtes Regulierung. Das orbitale Energiebudget kann mit Sonnenlicht bezahlt werden; der Schub kann aus elektrischen Feldern auf Ionen entstehen; die Zeit kann von der Geduld der Ingenieure geliehen werden.

Die Hindernisse sind kulturell und bürokratisch: Agenturen überzeugen, dass etwas, das wie ein Ballon aussieht, durch Mathematik und Beharrlichkeit zu einem Satelliten werden kann. Doch jede transformative Technologie begann als Anomalie im Papierkram.

Wenn das erste dieser solar-elektroaerodynamischen Gefäße aufsteigt, wird sein Fortschritt Stunde für Stunde fast unmerklich sein. Aber Tag für Tag wird es Geschwindigkeit sammeln, bis es schließlich jenseits des Wetters gleitet. Es wird kein Dröhnen geben – nur das schwache, kontinuierliche Summen von Feldern und die stetige Akkumulation von Sonnenlicht in Bewegung.

Das wird den Beginn von **wiederverwendbarem, nachhaltigem und sanftem Zugang zum Orbit** markieren: Einem Weg, aufzusteigen, zu fliegen und – ohne je ein Streichholz anzuzünden – zu orbitieren.

Referenzen & Weiterführende Lektüre

- **Rise Fly Orbit Projekt:** <https://riseflyorbit.org/> – Überblick über das Konzept des solarbetriebenen Luftschiffs zum Orbit und verwandte Forschung.
- **Essay zum elektroaerodynamischen Antrieb:**
https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html – Tiefgehende theoretische Behandlung des elektroaerodynamischen Schubs unter Verwendung des Maxwell-Spannungstensors und der Coulomb-Körperkraft-Formulierung.
- Barrett, S. et al., *Nature* (2018). „Flight of an Aeroplane with Solid-State Ionic Propulsion.“ – Erste Demonstration eines festflüglichen ionenangetriebenen Flugzeugs.
- Paschen, F. (1889). „Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure erforderliche Potentialdifferenz.“ *Annalen der Physik*, 273(5).

- Sutton & Biblarz, *Rocket Propulsion Elements*, 9. Aufl. – Zum Vergleich in Energiebudgets und Δv -Betrachtungen.
- NASA Glenn Research Center, „Solar Electric Propulsion Basics.“ – Hintergrund zu hoch effizienten elektrischen Schubsystemen.