

Konstruktiver Gegenwind - oder: Am Widerstand wachsen

H. Joachim Schlichting, Christian Ucke

*In dem Morast...hätte ich unfehlbar umkommen müssen,
wenn nicht die Stärke meines eigenen Armes
mich an meinem eigenen Haarzopfe, samt dem Pferde,
das ich fest zwischen meine Kniee schloß,
wieder herausgezogen hätte.*

Freiherr von Münchhausen

Welcher Radfahrer kennt nicht das schöne Gefühl, von einem kräftigen Rückenwind zu ungeahnten Geschwindigkeiten beflügelt zu werden. Wer hätte umgekehrt bei kräftigen Gegenwind nicht schon einmal den Wunsch gehabt, diesen einfach umzudrehen, um gewissermaßen mit Hilfe des Gegenwindes gegen den Wind zu fahren. Auf den ersten Blick erscheint dieser Wunsch abwegig, weil - so wird man vielleicht denken - der Wind sich auf keinen Fall gegen sich selbst richten läßt. Allenfalls Münchhausen hätte hier eine Chance. In der Tat: Stellt man sich beispielsweise vor, der Propeller eines Flugzeuges werde wie bei



einer Windmühle durch Gegenwind betrieben und diene gleichzeitig dazu, das Flugzeug gegen eben diesen antreibenden Wind zu bewegen, so erscheint ein solches Münchhausen-Kunststück als äußerst plummes Perpetuum mobile. Man macht sich aber leicht klar, daß ein solches Gegenwind-Flugzeug ebenso wenig gegen den Energiesatz verstoßen würde wie Münchhausen. Was Münchhausens obige Behauptung zur Lüge macht, ist nicht die fehlende Energie, sondern der fehlende archimedische Punkt, mit dessen Hilfe bekanntlich die Welt aus den Angeln und damit erst recht Münchhausen aus dem Sumpf gehoben werden könnte. Für einen solchen Punkt wäre ein über den Sumpf ragender kräftiger Ast völlig ausreichend.

Bild 1: Münchhausen, den Impulssatz mißachtend.

Was hier als eklatanter Widerspruch zur Erfahrung erscheint, ist physikalisch gesehen nicht die Verletzung des Energiesatzes, sondern des Impulssatzes. Weder Münchhausen noch die gegen die Flugvorrichtung anströmende Luft können aus sich heraus den für die Bewegungsänderung nötigen Impuls aufbringen. Das wäre nur durch "Export" eines gleich großen entgegengesetzten Impulses, also durch Wechselwirkung mit einem anderen System möglich. Die Situation änderte sich jedoch entscheidend, wenn man die mit einem Windrad versehene Vorrichtung nicht fliegen, sondern fahren ließe. Das heißt konkret: Wenn man die Windmühle auf Räder stellte. Auf diese Weise könnte sich das Fahrzeug durch die Haftreibung der rollenden Räder vom Boden "abdrücken" und die aus dem Gegenwind gewonnene Energie zur Fahrt gegen den Wind ausnutzen. Der dazu nötige Impuls würde dann durch die Wechselwirkung aufgrund der Haftreibung mit der Erde eingebracht.

Um ein Gefühl dafür zu entwickeln, welche Geschwindigkeiten im Prinzip erreichbar sind und wie sie durch die Haftreibung begrenzt werden, müssen die Verhältnisse quantitativ abgeschätzt werden („**Mit doppelter Windgeschwindigkeit gegen den Wind**“ und: „**Maximale Windgeschwindigkeit**“).

Demnach ergibt sich das auf den ersten Blick der Intuition abermals widersprechende Ergebnis, daß die erreichbare Geschwindigkeit größer werden kann als die Geschwindigkeit des von vorn blasenden Windes. Vernachlässigt man den Rollwiderstand und beschränkt sich auf den Luftwiderstand des Propellers, (was im Falle des abgebildeten filigranen Modells nicht ganz abwegig erscheint), so erhält man das schöne Ergebnis, daß das Fahrzeug im Extremfall sogar das Doppelte der Windgeschwindigkeit erreichen

kann. Wie läßt sich das anschaulich verstehen? Relativ zum gegen den Wind fahrenden Fahrzeug, trifft die Luft in jedem Fall mit einer größeren Geschwindigkeit auf die Propeller als der Wind, was einen merkwürdig erscheinenden Verstärkungseffekt zur Folge hat: Je schneller sich das Fahrzeug bewegt, desto größer wird die Windgeschwindigkeit bzw. die durch den Wind transportierte Bewegungsenergie. Wir haben es also mit einer Bezugssystemproblematik zu tun: Während die Windgeschwindigkeit normalerweise aus der Sicht des ruhenden Beobachters beurteilt wird, ist für den Antrieb die Luftströmungsgeschwindigkeit in Bezug auf das mitbewegte System ausschlaggebend.

Diese Überlegungen gelten natürlich nur, sofern und solange die mit dem Rollen der Räder verbundene Haftreibungskraft $F_H = \mu \cdot m \cdot g$ die Luftwiderstandskraft F_A kompensiert. (Hier ist μ der sogenannte Haftreibungskoeffizient, eine Größe, die je nach Beschaffenheit des Untergrunds und der Räder des Fahrzeugs einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen kann, m die Masse des Fahrzeugs und g die Erdbeschleunigung).

Bei gegebenem (maximalen) Haftreibungskoeffizienten μ_{\max} darf F_A den durch

$$F_{H\max} \geq F_A$$

begrenzten Wert nicht überschreiten. Damit unterliegt aber auch die Windgeschwindigkeit einer oberen Grenze, jenseits derer kein Antrieb mehr möglich ist („Maximale Windgeschwindigkeit“). Die maximal verträgliche Windgeschwindigkeit ließe sich allenfalls durch eine Erhöhung der Masse m steigern. Damit würde aber auch die Rollreibungskraft proportional zur Masse zunehmen und der Rollreibungsverlust entsprechend zu Buche schlagen. Eine Alternative wäre, die Übertragung zwischen Boden und Fahrzeug mit einem Zahnradmechanismus zu vermitteln.

Doch bevor die Überlegungen zu raffiniert werden, sollten wir uns daran erinnern, daß unser Fahrzeug in erster Linie als physikalische Spielerei konzipiert wurde und versuchen, die theoretischen Überlegungen durch ein funktionsfähiges Modell mit Leben zu erfüllen.

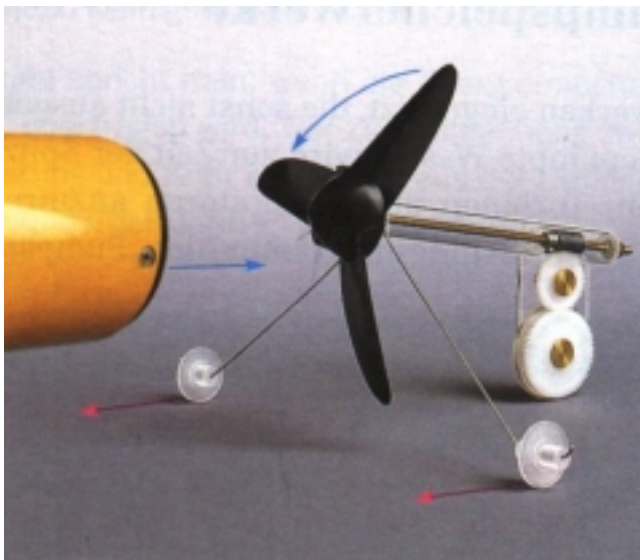


Bild 2: Das in den Luftstrahl hineinlaufende Gegenwindfahrzeug. Zur Stabilisierung gegen seitliche Ablenkungen müssen die Vorderräder möglichst weit auseinander angebracht sein.

Dieser Versuch sollte schon durch das erste praktische Modell von Erfolg gekrönt sein. Das in Bild 2 dargestellte Modell bewegte sich auf den Fön zu, mit dem es angeblasen wurde. Laien, denen wir unser Fahrzeug vorführten, mutmaßten zunächst, daß unser Fön nicht blasen, sondern „saugen“ würde. (Davon, daß man in einiger Entfernung mit Saugen überhaupt nichts erreicht, überzeugt man sich am besten durch den Versuch, eine Kerze auszusaugen statt auszublasen. (siehe auch Spielwiese in Phiuz 6/96)). Durch weitere Optimierung gelang es uns sogar, ein Modell herzustellen, daß sich infolge kräftigen „mündlichen“ Blasens auf den Bläser zubewegte. Die einfachste Konstruktion besteht im wesentlichen aus einem auf einer drehbaren Achse montierten Propeller, dessen Drehung mit einem Gummiband auf die Achse eines Antriebsrades übertragen wird

Wie bereits durch die theoretischen Überlegungen nahegelegt, machen sich die Grenzen des Gegenwindfahrzeugs dann bemerkbar, wenn der antreibende Luftstrom zu kräftig wird: Die Haftreibung der Räder mit dem Untergrund reicht nicht mehr aus, einen hinreichenden Impuls auf die Fahrbahn zu übertragen: Man bläst das Fahrzeug mit durchdrehenden Rädern vor sich her. Eine einfache - zugegeben sehr prinzipielle Konstruktion - bei der dieses Problem nicht auftritt, besteht aus einem mit einer Schraubenmutter auf einer Gewindestange gedrehten Propeller. Setzt man den Propeller einem Luftstrom aus, so dreht er sich entlang der Gewindestange in den Luftstrom hinein.

Zusammenfassend kann man also sagen, daß sich der Münchhausenverdacht des Gegenwindfahrzeugs nicht auf den energetischen Aspekt des Vorgangs bezieht, sondern auf die Tatsache, daß man unbedingt die Wechselwirkung mit einem dritten Körper, in unserem Beispiel der Erde, benötigt, um sich sozusagen von etwas abstoßen zu können. Fachlich gesehen geht es um die Einhaltung des Impulssatzes, der hier an

einem nichttrivialen Beispiel nicht nur seine Existenzberechtigung, sondern sich darüber hinaus als äußerst praktisches Prinzip erweist. Schließlich sei darauf hingewiesen, daß unser Fahrzeug nur eine weitere Illustration einer sehr allgemeinen Einsicht darstellt: *Gegensätze soll man nicht auszugleichen trachten, sondern produktiv gestalten* (Richard Schaukal).

Mit doppelter Windgeschwindigkeit gegen den Wind

Zur Abschätzung der Geschwindigkeit des windbetriebenen Fahrzeugs beschränken wir uns der Einfachheit halber auf die spezielle Situation des direkt von vorn kommenden Windes. In diesem Fall genügt es, mit den Beträgen der Vektorgößen zu rechnen.

Bei einem Wind mit der Geschwindigkeit v_w und einer Geschwindigkeit v_F des Fahrzeugs gegenüber dem Boden sind die Propeller einem Luftstrom der Geschwindigkeit $v = (v_w + v_F)$ ausgesetzt.

Diesem Luftstrom kann im günstigsten Fall eine Leistung von

$$P = \frac{1}{2} c \rho A v^3 \quad (1)$$

entzogen werden. Dabei bezeichnet ρ die Dichte der Luft, A die Querschnittsfläche des Propellers, und c ist ein Beiwert, der maximal den Wert $c_{\max} = 16/27$ annehmen kann (siehe z.B. [1]).

Wenn das Fahrzeug mit der Geschwindigkeit v_F gegen den Wind fährt, muß eine Kraft F_A überwunden werden, die sich aus der Widerstandskraft der Flügel

$$F_{FI} = \frac{1}{2} c_{FI} \rho A v^2,$$

der Luftwiderstandskraft des übrigen Fahrzeugs

$$F_F = \frac{1}{2} c_w \rho A' v^2$$

und der als unabhängig von der Geschwindigkeit angenommenen Rollreibungskraft $F_r = f m g$ ($f = \text{const}$) zusammensetzt:

$$F_A = F_{FI} + F_F + F_r. \quad (2)$$

(Dabei ist c_{FI} ein Beiwert, der maximal den Wert $c_{FI\max} = 8/9$ annehmen kann (siehe z.B. [1]), c_w ist ein von der Form des Fahrzeugs abhängiger Beiwert und A' die Querschnittsfläche des Fahrzeugs exklusive der Flügel).

Die mit der Überwindung von F_A verbundene Leistung $P_A = F_A v_F$ kann maximal gleich der Leistung P (Gl. (1)) werden, die der Luftströmung entzogen wird. Im stationären Fall gilt also:

$$P_A = P.$$

Daraus läßt sich gemäß Gl. (2) die Geschwindigkeit $v_{F\max}$ abschätzen, die das Fahrzeug maximal erreichen kann:

$$[(\frac{1}{2} c_{FI\max} \rho A (v_w + v_{F\max})^2 + \frac{1}{2} c_w \rho A' (v_w + v_{F\max})^2 + F_r] v_{F\max} = \frac{1}{2} c_{\max} \rho A (v_w + v_{F\max})^3 \quad (3)$$

Diese Gleichung läßt sich nicht explizit nach $v_{F\max}$ auflösen. Wenn man jedoch die Rollreibung F_r und den Luftwiderstand des restlichen Fahrzeugs ($A' = 0$) vernachlässigt, so erhält man als grobe Abschätzung einen ebenso einfachen wie verblüffenden Zusammenhang:

$$v_{F\max} = 2 v_w. \quad (4)$$

Maximale Windgeschwindigkeit

Vernachlässigt man wieder wie oben f und A' , so erhält man einen einfachen Zusammenhang für die maximal zulässige Windgeschwindigkeit $v_{w\max}$:

$$\frac{1}{2} c_{FI\max} \rho A (3v_{w\max})^2 \leq \mu_{\max} m g$$

$$4 \rho A v_{w\max}^2 \leq \mu_{\max} m g$$

$$v_{w\max} \geq \sqrt{(\mu_{\max} m g / 4 \rho A)}$$

Literatur

[1] Schlichting, H.J., Walter, R., Waßmann, H.: Mit Gegenwind gegen den Wind. Physik in der Schule 31/4 (1993), S. 134.

Auch in den folgenden Artikeln werden verschiedene Gegenwindfahrzeuge diskutiert:

[2] Blackford, B.L. A push-me pull-you wind vehicle. Am.J.Phys. 49 (1981), 282-283

[3] Blackford, B.L.: The physics of a push-me pull-you boat. Am.J.Phys. 46 (1978), 1004-1006

[4] Schulenburg, Mathias: Ein Fahrrad für Gegenwind (Das Kabinett). Bild der Wissenschaft 28 (1991), Heft 7, 116-117