

Auftrieb & Widerstand

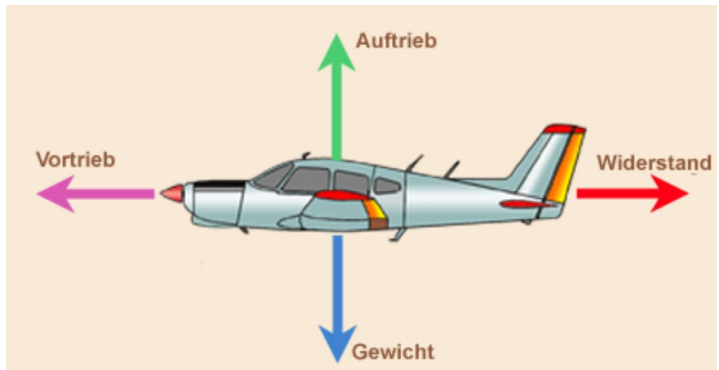
ZIEMLICH BESTE FREUNDE ...

Auftrieb ist super. Widerstand eher nicht. Aber es gibt die beiden immer nur im Doppelpack. Für die richtigen Entscheidungen im Cockpit ist es wichtig, das Zusammenspiel von Auftrieb und Widerstand zu verstehen. Wir zeigen Unfälle, die mit einem besseren Verständnis von Auftrieb & Widerstand hätten verhindert werden können.

Dass der Auftrieb unser Freund ist, weiß jeder Pilot. Daher beschäftigen wir uns hier mehr mit dem Widerstand ...

Keine „echten“ Kräfte

Auftrieb und Widerstand werden generell als separate Kräfte angesehen, die auf ein Flugzeug wirken. Das Gewicht und der Schub sind „echte“ Kräfte, die in jeweils einer Richtung wirken. Auftrieb und Widerstand sind jedoch keine unabhängigen Kräfte. Vielmehr sind sie Komponenten der Luftkraft, die insgesamt auf ein Flugzeug wirkt. Die Aufteilung der Luftkraft in diese beiden Komponenten ist jedoch äußerst praktisch und erlaubt es, viele aerodynamische Zusammenhänge einfacher zu erklären, als wenn man nur die Luftkraft insgesamt betrachten würde.



Die wesentlichen Kräfte, die auf ein Flugzeug wirken: Schub, Gewicht sowie Auftrieb und Widerstand. aus.lavionnaire.fr

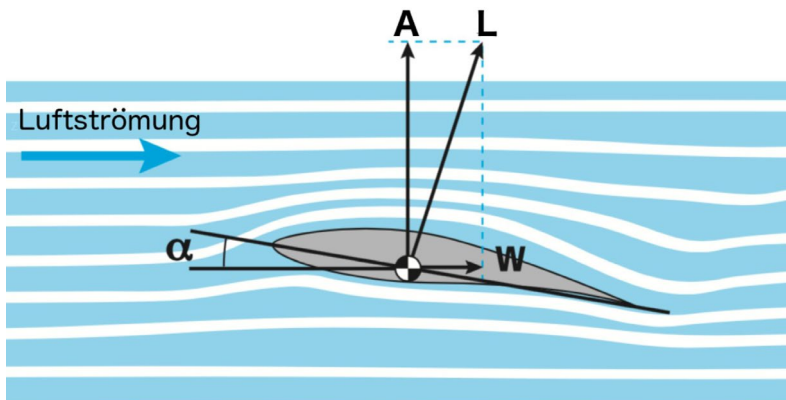
Einige Definitionen

Auftrieb ist definiert als der Teil der aerodynamischen Kraft, der senkrecht zur Flugrichtung bzw. zur Anströmrichtung wirkt. Bildlich wird der Auftrieb als Vektor dargestellt. Zudem steht diese Kraft auch senkrecht zur Querachse. Fliegt also das Flugzeug mit 30° Querlage, so ist der Auftriebsvektor ebenfalls um 30° gekippt.

Der **Widerstand** hingegen ist der Teil der aerodynamischen Kraft, der entgegen der Flugrichtung bzw. der Anströmrichtung wirkt.

Der **Anstellwinkel** α ist der Winkel zwischen der Anströmrichtung und der Profilschneide. Die Profilschneide ist die Verbindung von Flügelvorderkante zur Flügelhinterkante.

Die **Fluglage**, neu-deutsch „Pitch“ genannt, ist der Winkel zwischen dem Horizont und der Flugzeuglängsachse. Aus der Fluglage allein lässt sich nicht auf den Anstellwinkel schließen.



Auftrieb A und Widerstand W als Vektoren der Luftkraft L, die auf den Flügel wirkt. Der Anstellwinkel wird mit dem griechischen Buchstaben Alpha α gekennzeichnet.

aus segelfliegenausbildung.de

Der **Einstellwinkel** ist der Winkel zwischen der Flugzeuglängsachse und der Profilsehne. Oft ist der Einstellwinkel so gewählt, dass im Reiseflug die Nase am Horizont liegt. So liefert der Rumpf den geringsten Widerstand. Aber auch andere Faktoren müssen bei der Wahl des Einstellwinkels berücksichtigt werden. Ist der Einstellwinkel zu klein, berührt das Heck beim Rotieren zum Start den Boden. Ist er zu groß, setzt das Flugzeug bei der Landung mit dem Bugrad zuerst auf.

Wie entsteht Auftrieb?

Generationen von Flugschülern wurde beigebracht, dass der Auftrieb durch Unterdruck an der Oberseite und Überdruck an der Unterseite des gewölbten Flügels entsteht, kurz: durch den Bernoulli-Effekt. Am Staupunkt vorne am Flügel würden sich die Luftmoleküle trennen, um sich an der Hinterkante wieder zu treffen. Da die Moleküle dieselbe Zeit bis zur Hinterkante benötigen würden, der obere Weg über die gewölbte Fläche aber länger sei, müssten die Moleküle auf der Oberseite sich schneller bewegen, um „rechtzeitig“ mit denen von der

Unterseite an der Hinterkante einzutreffen. Höhere Geschwindigkeit eines Gases führt tatsächlich zu einem Unterdruck durch den Bernoulli-Effekt. Allerdings ist diese Erklärung grundsätzlich falsch.

Es ist richtig, dass an der Flügeloberseite ein Unterdruck herrscht und an der Unterseite ein Überdruck. Falsch ist jedoch die sog. „Equal Time Theorie“, nach der die Luftteilchen oben wie unten dieselbe Zeit brauchen würden bis zur Flügelhinterkante. Dass diese Erklärung für den Unterdruck Unsinn ist, lässt sich allein durch Nachdenken verstehen. Moleküle besitzen keinerlei Intelligenz und auch keine innere Uhr. Woher sollen sie wissen, wann genau sie an der Hinterkante sein müssten, um dort ihre Kollegen von der Unterseite wieder zu treffen? Wer sich das nicht selbst erklären möchte, dem sei empfohlen, sich Windkanal-Videos im Internet anzuschauen. Auf solchen Aufnahmen ist zu sehen, dass die Luftmoleküle auf der Oberseite des Flügels deutlich schneller an der Hinterkante ankommen als die Moleküle, die untenrum müssen.

Die uns in den Flugschulen beigebrachte falsche Theorie kann also den Auftrieb nicht exakt erklären. Ein Autor meinte dazu, eine Cessna 172 müsste 400 Knoten schnell fliegen, damit allein der Unterdruck an der Oberseite der Tragfläche das Gewicht des Flugzeugs tragen könnte. Wo also kommt der Auftrieb her?

Man muss keine sechs Semester Aerodynamik studieren, um das zu verstehen. Der Auftrieb entsteht im Wesentlichen durch die Umlenkung der Luft nach unten. Nach den Gesetzen Newtons erzeugt das eine nach oben gerichtete Kraft. Die Gesetze von Bernoulli, der Coanda-Effekt und andere aerodynamische Phänomene spielen ebenfalls eine Rolle. Aber für den Piloten bleibt die Erkenntnis, dass auch beim Fliegen wieder mal Isaak Newton der Mann fürs Grobe ist, der uns mit seiner Kraft in der Luft hält.

Wie man an einigen Modellflugzeugen (fliegendes Brett) sehen kann, ist eine gewölbte Oberfläche nicht erforderlich, um Auftrieb zu erzeugen. Der Aufwand, der mit den Tragflächenprofilen betrieben wird, soll den Auf-

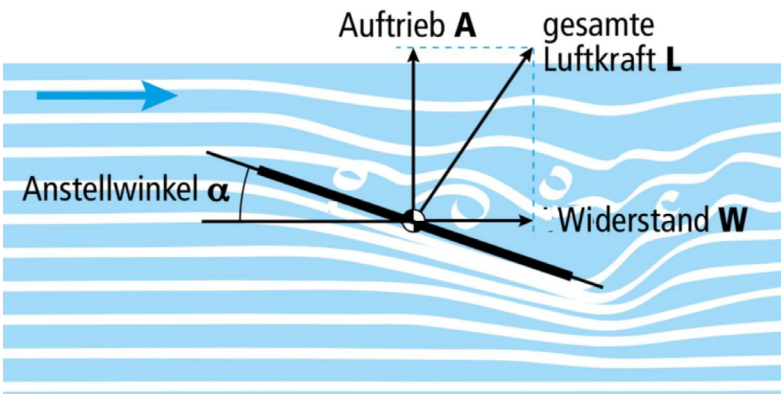
trieb bei möglichst geringem Widerstand maximieren und für angenehme Flugeigenschaften sorgen (geringe Stall-Speed, beherrschbares Stall-Verhalten usw.).

Widerstand

Aerodynamischer Widerstand ist so ziemlich das Unnötigste, was man zum Fliegen braucht. Daher unternehmen Flugzeugbauer große Anstrengungen, den Widerstand eines Flugzeugs möglichst gering zu halten. Da ist zunächst der lästige Widerstand aller Flugzeugteile, die nichts mit der Auftriebserzeugung zu tun haben. Also Rumpf, Antennen, Fahrwerke, Leitwerke usw. Die Amerikaner haben für diesen hässlichen Widerstand ein ebenso hässliches Wort: Parasite Drag.

Die Größe des Parasite Drags ist null bei null Geschwindigkeit auf der Runway. Er steigt mit zunehmender Geschwindigkeit immer weiter an, was der Höchstgeschwindigkeit eines Flugzeugs eine natürliche Grenze setzt.

Dann gibt es noch den induzierten Widerstand. Dieser „Induced Drag“ wird durch den



Mit Bernoulli lässt sich der Auftrieb einer flachen Platte nicht erklären. Mit Newton schon. Aber das ist in dieser Darstellung falsch: Die Platte lenkt tatsächlich die Luft nach unten um, nicht wie dargestellt nach oben ...
aus segelfliegenausbildung.de

Auftrieb erzeugt. Durch den Druckunterschied zwischen Ober- und Unterseite der Tragflächen entsteht an den Tragflächenspitzen eine seitliche Strömung, die zu den berühmten Wirbelschleppen führt, die jedes Flugzeug hinter sich herzieht – auch Segelflugzeuge. Dieser induzierte Widerstand nimmt mit zunehmenden

der Geschwindigkeit ab. Im Langsamflugbereich jedoch ist der induzierte Widerstand deutlich größer als der parasitäre. Je langsamer ein Flugzeug fliegt, umso größer wird er. Am größten ist er bei Erreichen der Überzieh-Geschwindigkeit.

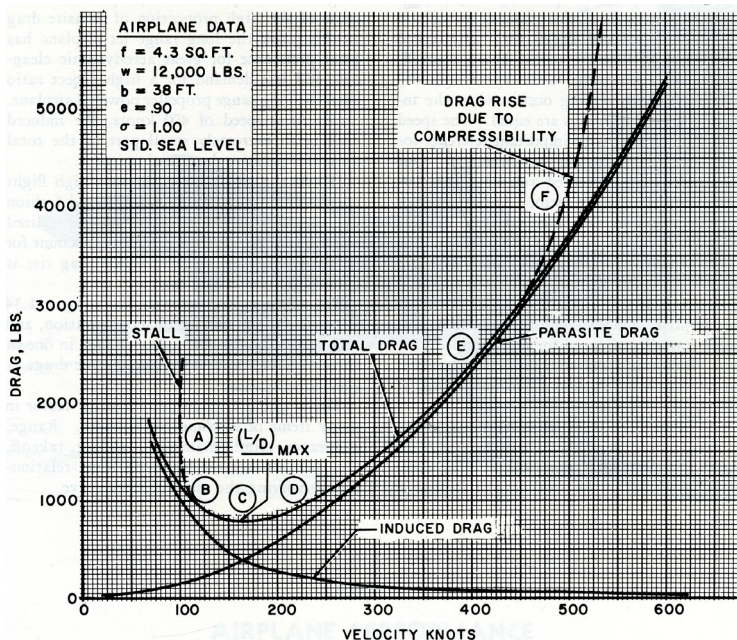
Woher der Widerstand eigentlich kommt, der noch viele weitere Ursachen haben kann, wie zum Beispiel den Interferenzwiderstand zwischen einzelnen Bauteilen u.a., kann dem Piloten eigentlich egal sein. Wichtig ist nur, zu wissen, dass der Gesamtwiderstand im Langsamflug sehr stark ansteigt. Außerdem sollte jeder Pilot wissen, wie er persönlich den Widerstand seines Flugzeugs verringern kann: durch saubere, glatte Oberflächen sowie mücken-, schnee- und eisfreie Tragflügel und Leitwerke.

An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass der Widerstand des Flugzeugs nicht nur von der Geschwindigkeit abhängt, sondern auch vom Treibstoffpreis. So fliegen die weit verbreiteten Boeing 737 immer noch mit dem Tragflächendesign von 1967, die Airbus A320 mit Tragflächen von 1987. Würde der Treibstoffpreis stark ansteigen, dann wären die



Ein Learjet des Irish Air Corps hinterlässt einen Graben in den Wolken hinter sich. Hier kann man ohne Windkanal sehen, dass der Auftrieb durch die Umlenkung der Luft nach unten entsteht.
Foto: Irish Defence Forces

Flugzeughersteller gezwungen, sich mal bei den Segelfliegern zu erkundigen, wie das mit der laminaren Strömung über den Tragflächen geht. Konzepte dazu gibt es auch für Verkehrsflugzeuge (z.B. Grenzschichtabsaugung u.a.). Aber solange die Airlines kein frisches Brot wollen, können die Hersteller weiter ihre alten Semmeln verkaufen.



Das sind die wichtigsten Kurven zum Widerstand des Flugzeugs, die jeder Pilot verinnerlicht haben muss: Der Anstieg des Parasit Drags von null an mit steigender Geschwindigkeit sowie der induzierte Widerstand, der sein Minimum bei Höchstgeschwindigkeit hat und der mit abnehmender Geschwindigkeit zunimmt, besonders stark unter der Geschwindigkeit des L/D max, also des besten Gleitwinkels.

Aerodynamics for Naval Aviators, U.S. Navy 1965

Widerstand als Unfallursache

Der enorm ansteigende Widerstand eines Flugzeugs im Langsamflugbereich hat schon öfters zu schweren Flugunfällen geführt. Und zwar vor allem beim Start. Nur wenn die Pilotinnen und Piloten die Zusammenhänge zwischen Auftrieb und Widerstand im Langsamflug voll verstanden und verinnerlicht haben, kann es gelingen, die Zahl solcher Unfälle zu verringern.

Ein gängiges Eingangs-Szenario für solche Unfälle ist ein Start, bei dem – aus welchen Gründen auch immer – das Flugzeug nicht wie sonst abheben oder steigen will. Ursachen dafür könnten sein: eine zu geringe Motorleistung durch Fehlbedienung oder Motorschaden, zu hohes nasses Gras auf

der Startbahn, falsche Startstreckenberechnung mit daraus resultierendem Start auf zu kurzer Bahn, falsche Klappenstellung, Rückenwind.

Jeder Pilot ist gewohnt, dass man durch Ziehen beim Start das Flugzeug zum Steigen bringen kann. Das ist aber nur so, wenn die Konfiguration des Flugzeugs stimmt und die richtige Geschwindigkeit anliegt. Es hat Unfälle gegeben, bei denen das Flugzeug viel zu langsam in die Luft gezwungen wurde und dann so Richtung Hindernisse, z.B. Bäume, flog. In dem Bemühen, über die Hindernisse zu kommen,

wird dann das Flugzeug durch Ziehen aus dem Bodeneffekt gezwungen. Dadurch erhöht sich zunächst der Anstellwinkel. Wenn die Maschine so nicht sofort überzogen wird, erhöht sich der Widerstand schnell so stark, dass die Maschine langsamer wird und wieder sinkt. Trotz Full Power.

PA 28-181 Unfall in Coburg-Steinrücken

Ich möchte dazu einen tragischen Unfall als Beispiel anführen, bei dem vier Menschen ums Leben gekommen sind. Am 5. August 2012 startete eine junge, unerfahrene Pilotin mit einer PA 28-181 vom Sonderlandeplatz Coburg-Steinrücken. Mit an Bord waren drei Passagiere. Der Start erfolgte bei nahezu windstillem Wetter auf der Graspiste 07.

Nach Berechnungen der BFU betrug die zu erwartende Startrollstrecke an diesem Tag 372 Meter mit Klappen in der zweiten Raste des Landeklappenhebels (25° Klappen). Tatsächlich wurde die Nase des Flugzeugs schon vor dieser Distanz hochgezogen. Das Flugzeug hob mit hoher Fluglage ab und flog ohne Höhe zu gewinnen die Bahn entlang. 650 Meter hinter dem Bahnende kollidierte die Maschine mit Bäumen, deren Kronen 20 Meter tiefer lagen als das Bahnende. Das Flugzeug zerbrach und ging in Flammen auf. Die BFU fand den Landeklappenhebel in der dritten Raste vor (40° Klappen, die Stellung für die Landung).

Die BFU schrieb dazu in ihrer Beurteilung u.a.:

„Das Luftfahrzeug hob anscheinend mit einem großen Anstellwinkel und voll ausgefahrenen Landeklappen im Bodeneffekt ab. Das Abheben von der Piste erfolgte wahrscheinlich noch früher als die Startrollstreckenberechnung mit einer Klappenstellung von 25° ergab. Im Anschluss driftete es in geringer Höhe und ohne Geschwindigkeitszunahme nach links und streifte mit der linken Tragfläche einen Baum. Das Luftfahrzeug flog wahrscheinlich in einem Sackflug bis zur Waldkante weiter und kollidierte mit den ersten Bäumen. Aufgrund der sehr geringen Mustererfahrung und der geringen Gesamtflugerfahrung gelang es der Pilotin möglicherweise nicht, einen überzogenen Flugzustand zu erkennen und diesen durch Nachlassen des Höhenruders zu beenden. Ein beitragender Faktor können die voll ausgefahrenen Landeklappen gewesen sein, die eine Geschwin-

digkeitszunahme des Luftfahrzeuges erschwerten.

Bedingt durch das abfallende Gelände am Ende der Piste wäre es durch Nachlassen des Höhenruders möglich gewesen, Geschwindigkeit aufzunehmen und die Landeklappen in Startkonfiguration zurückzuführen.“

Mit der Beurteilung der BFU stimme ich nicht überein. Ich vermute, dass die meisten Piloten, auch sehr erfahrene, eine falsche Landeklappenstellung nach dem Start nicht sofort erkennen würden. Man denke nur an den Lufthansa 747 Absturz in Nairobi, bei dem die erfahrene, professionelle Cockpitbesatzung nach der Realisierung echter Probleme die falsche Klappenstellung nicht erkannt hat. Es gibt nur eine sichere Möglichkeit, und das ist die Klappenstellung vor dem Start mit der Checkliste zu überprüfen. Dieser Check hätte in diesem Fall möglicherweise vier Menschen das Leben gerettet. Die Ursache des Problems hätten also viele Piloten nach dem Start nicht so schnell erkannt. Was aber ein erfahrener Pilot erkennen müsste, ist, dass das Flugzeug überzogen war und nicht würde sicher fliegen können. Die richtige Maßnahme wäre ein Startabbruch gewesen, auch noch nach Ende der Bahn mit einer Außenlandung.

Den letzten Satz der Beurteilung der BFU halte ich für besonders verwegen. Ich denke, es ist eine unüberlegte Behauptung ohne jeden Nachweis der Durchführbarkeit:

„Bedingt durch das abfallende Gelände am Ende der Piste wäre es durch Nachlassen des Höhenruders möglich gewesen, Geschwindigkeit aufzunehmen und

die Landeklappen in Startkonfiguration zurückzuführen.“

Die BFU hat meines Wissens keinerlei Test durchgeführt, ob dieses Manöver in unmittelbarer Bodennähe tatsächlich zu einer Geschwindigkeitszunahme bei einer PA 28-181 mit voll ausgefahrenen Klappen geführt hätte. (Wer hätte sich auch zu so einem Test ins Cockpit gesetzt?) Ein Nachlassen des Höhenruders in Bodennähe hätte eine sofortige Auftriebsminderung bedeutet, die die bestehende Sinkrate Richtung Wald weiter erhöht hätte. Zudem hätte das Manöver erfordert, dass vorher die falsche Klappenstellung erkannt worden wäre. Außerdem: Die Kollision mit den Bäumen (Kronen 20 Meter unter dem Bahnende) erfolgte in etwa 8 Metern Höhe über dem Boden, also 12 Meter unterhalb dem Bahnende. Wenn man die ungefähre Flugzeit zwischen dem Bahnende und dem Absturzort 650 Meter dahinter berechnet, kommt man selbst bei einer angenommenen Mindestgeschwindigkeit von 65 MPH auf eine Flugzeit von ledig-

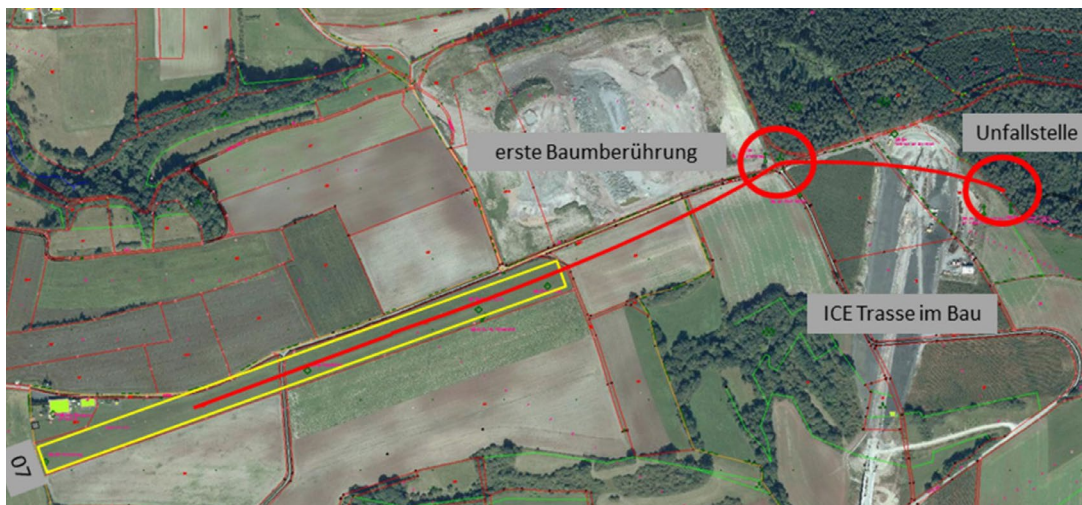
lich 22 Sekunden. Wie soll irgendein Pilot in der Lage sein, in nur 22 Sekunden so zu beschleunigen, dass man die Klappen einfahren und danach die Bäume noch überfliegen kann?

Die BFU hat bei diesem Bericht versäumt, darauf hinzuweisen, dass im extremen Langsamflug der Widerstand so groß sein kann, dass ein Beschleunigen auch durch Nachlassen des Höhenruders nicht mehr möglich ist.

Zwei Startunfälle in Lommis, Schweiz

Ein anderer Flugunfall durch den hohen induzierten Widerstand gibt Einblicke, warum Pilotinnen und Piloten in dieser Situation den Start fortsetzen. Die Schwere der Flugunfälle durch dieses Phänomen wurde nämlich in der Regel dadurch verursacht, dass der Start nicht abgebrochen wurde.

Am 31. März 2023 verunglückte eine Aquila beim Start in Lommis in der Schweiz. Der Flug war ein Schulungsflug und glücklicherweise wurde die Flugschülerin nur leicht ver-



PA 28 Startunfall in Coburg Steinrücken 2013. Eine unerfahrene Pilotin startete versehentlich mit den Klappen in Landstellung. Foto: Vermessungsamt Coburg/Bearbeitung BFU

letzt. Der Fluglehrer blieb unverletzt. Das Flugzeug jedoch geriet in Brand und wurde zerstört.

Die Crew flog sich selbst in diese ausweglose Situation. Die Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle SUST schrieb dazu:

„Das Flugzeug beschleunigte nach Angaben der Besatzung normal und hob kurz nach der Pistenmitte ab. Noch im Bodeneffekt habe gemäss der Besatzung der Motor an Leistung verloren. Das Flugzeug habe sodann wieder aufgesetzt, worauf der Motor gemäss der Besatzung wieder normal funktioniert habe. Von diesem Moment an sei ein Startabbruch keine Option mehr gewesen.“

Gelehrt wird eigentlich, dass eine Motorstörung beim Start auf der Bahn in jedem Fall zu einem Startabbruch führen sollte. Auch dann, wenn dadurch ein Überrollen des Bahnendes unvermeidbar ist.

Warum der Fluglehrer dennoch den Start fortgesetzt hat – mit einem Motor, der deutlich eine Störung gezeigt hat –, kann man eigentlich nur mit dem Überraschungseffekt erklären. Es entspricht jedenfalls nicht dem Verhalten bei Motorstörung, das vor dem Start gebrieft werden sollte.

In der Videosequenz, die die SUST¹ in ihrem Untersuchungsbericht veröffentlicht hat, sind einige Phänomene beim Flug in der Nähe der Überziehggeschwindigkeit zu beobachten:

- Es ist möglich, ein Flugzeug – gerade einen Tiefdecker – unterhalb der Stallspeed im Bodeneffekt in die Luft zu bringen.
- Durch den hohen Anstellwinkel ist dann der Widerstand so hoch, dass das Flugzeug u.U. weder beschleunigen noch steigen kann.
- Nahe der Stallspeed nimmt die Stabilität um die Längsachse stark ab. Das hier abgebildete schnelle rechts-links Rollen um die Längsachse kann man auf mehreren Videos sehen, die Flugzeuge im Stall nach dem Abheben zeigen. Der Versuch, die Flügel wie sonst mit den Querrudern grade zu halten, kann zu einer Ruderumkehr führen: Das nach unten ausgeschlagene Querruder erhöht auf dieser Seite den Anstellwinkel und lässt die Strömung abreißen.

Die SUST stellt fest, dass der beschriebene Unfall kein Einzelfall war. Sie schreibt: *„Zwischenfälle, bei denen ein startendes Flugzeug mit geringer Geschwindigkeit vom Boden abgehoben wird und anschliessend trotz intaktem Antrieb nicht in der Lage ist, über den Einflussbereich des Bodeneffekts zu steigen, ereignen sich vergleichsweise häufig. Von dieser Unfallart betroffen sind fast ausschliesslich von kurzen Graspisten startende Tiefdecker.“*

Dabei verweisen die Schweizer auf den Unfall einer Mooney (ebenfalls in Lommis), die dort am 14. August 2019 verunglückte. Die Mooney wurde bei geringer Geschwin-

1) SUST - Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle



Eine Aquila wird erst 50 Meter nach Bahnende auf der Rückseite der Power-Kurve in die Luft gezwungen, stallt und stürzt ab.
Gelbe Pfeile: Bodenberührung der Tragfläche
Montage aus Videosequenz, SUST

digkeit in die Luft gezwungen. Der Pilot, der danach im Bodeneffekt beschleunigen wollte, stellte einen Leistungsverlust des Triebwerks fest und setzte trotzdem den Start fort. Die SUST schrieb damals:

„Sicher ist, dass das Flugzeug abhob, es dem Piloten aber nicht gelang, an Geschwindigkeit oder Flughöhe zu gewinnen.“

Das Flugzeug kollidierte mit einem Straßenschild außerhalb des Flugplatzgeländes. Der Pilot entschied sich erst zur Notlandung, nachdem er in 1,4 Meter Höhe ein weiteres Schild mitgerissen hatte.

Die SUST stellte fest, dass der Plan des Piloten, früh abzuheben, um dann im Bodeneffekt zu beschleunigen, keine gute Idee gewesen war. Die Maschine hatte nie die normale Abhebegeschwindigkeit erreicht. Die SUST dazu:

„Der Bodeneffekt kann in diesem Flugzustand auch mit normaler Motorleistung nicht nach oben verlassen werden, wie die zahlreichen vergleichbaren Zwischenfälle zeigen. Das Rotieren und Abheben des Flugzeugs bei zu geringer Geschwindigkeit war deshalb ursächlich für die Entstehung des Unfalls. Die verminderte Motorleistung hat zum Unfall beigetragen.“

Auch bei diesem Unfall weist die SUST darauf hin, dass hauptsächlich Tiefdecker von diesem Unfall-Szenarium betroffen sind, und stellt fest:

„Als Faustregel gilt, dass der Bodeneffekt auf einer Höhe des Tragflügels über Grund, die 10 % der Flügelspannweite entspricht, eine Reduktion des induzierten Widerstandes um 50 % bewirkt.“

Andersherum betrachtet: Versucht man mit Mindestgeschwindigkeit aus diesem Boden-

effekt zu steigen, dann verdoppelt sich der Widerstand!

Startunfall Piper Tomahawk in Grenchen, 2014

Ein Unfall in Grenchen in der Schweiz zeigt mehr als deutlich, dass es nicht immer möglich ist, ein zu früh abgehobenes Flugzeug im Bodeneffekt auf die normale Flugeschwindigkeit zu beschleunigen. Bei einem Ausbildungsflug mit einer Piper Tomahawk verunglückte die Maschine nach dem Start auf der trockenen Graspiste 25L (700 m lang). Beide Insassen blieben unverletzt, das Flugzeug wurde schwer beschädigt.

Beigetragen hat zu dem Unfall, dass das Flugzeug durch die von der Crew vorgefundene Betankung 50 kg überladen war und dass die Zündkerzen verrußt waren. Letzteres führte zu einem unbemerkten Leistungsverlust von 4 %, was noch im Limit der zulässigen Toleranz lag.

Nach Auskunft des Fluglehrers war der Start bis zum Abheben normal verlaufen. Wie es dann weiterging, beschrieb die SUST so:

„Das Abheben erfolgte kurz vor dem Pistenende auf Höhe des Rollwegs T. Nach dem Abheben versuchte der Flugschüler auf Anweisung des Fluglehrers, durch eine Reduktion des Anstellwinkels Geschwindigkeit aufzunehmen. Nachdem ihm dies nicht gelang, übernahm der Fluglehrer die Kontrolle über das Flugzeug und versuchte nun selbst, in Bodennähe Geschwindigkeit aufzunehmen. In dieser Phase nahm er die akustische Überziehwarnung (stall warning) wahr. [...]

Die Kantonsstrasse, welche die Pistenachse in einem Abstand von rund 100 m zum Pistenende kreuzt, wurde in sehr geringer Höhe überflogen. Nachdem es dem Fluglehrer gelungen war, eine maximale Flughöhe von geschätzten fünf Metern zu erreichen, nahm er erneut das Eintönen der stall warning wahr. In der Folge entschied sich der Fluglehrer, auf dem vor ihm liegenden Feld zu landen. Dazu liess er das Flugzeug ohne Reduktion der Triebwerksleistung zu Boden sinken und setzte die Landeklappen kurz vor dem Aufsetzen auf Landesstellung (34°). Der Fluglehrer gab später zu Protokoll, vom Verhalten des Flugzeuges nach dem Abheben überrascht gewesen zu sein.“

Am Ende dieses Artikels finden Sie den Link zu diesem Unfallbericht, der sehr lesenswert ist. Anders als die BFU im Bericht zu dem Unfall in Coburg beschrieb die SUST ausführlich die aerodynamischen Besonderheiten des Fluges mit hohem Anstellwinkel. Der Bericht geht auch auf das abnormale Stallverhalten der Tomahawk ein, das die SUST als „lebhaft“ bezeichnet. Zudem enthält der Bericht eine Liste mit 14 ähnlichen Unfällen von Piper Tomahawks in den USA. In allen 14 Fällen war ein Fluglehrer mit an Bord. Darunter waren diese Ereignisse:

- *„The instructor pilot who was doing a demonstration flight stated that ,the aircraft rotated to a normal climb attitude but did not climb out of ground effect'. After electing to abort*



Ende eines Schulungsflugs mit einer Piper Tomahawk in Grenchen. Es gelang nicht, das Flugzeug im Bodeneffekt zu beschleunigen. **SUST Schlussbericht**

the takeoff insufficient runway remained to stop [...]“

sounded [...] The aircraft began descending & subsequently hit trees & crash landed.“

- *Short Field Takeoff: „As the aircraft was rotated, the stall warning horn sounded [...]. The CFI took control & tried to recover from the stall [...] came to rest about 300 yards past the end of the runway.“*
- *„The CFI reported that during a subsequent soft field takeoff, acceleration seemed a little slow, and after lift-off, the aircraft seemed to stop accelerating altogether. Reportedly, the stall warning system beeped a few times and the aircraft subsequently struck uneven terrain (a road) and crashed.“*
- *„The instructor pilot (CFI) reported that shortly after takeoff, after climbing out of ground effect, the aircraft seemed to level off & stop climbing. He took control [...] The stall warning*

Das beschriebene Verhalten im Bereich des hohen induzierten Widerstands ist kein Privileg der Piper Tomahawk. Jan Brill hat in seinem Artikel „Fehlerhafte Starttechnik unter schwierigen Bedingungen“ in **Pilot und Flugzeug** 2026-01 berichtet, wie eine Grumman nach dem Abheben von der Gras piste von Konstanz in die Bäume flog. Beide Insassen wurden schwer verletzt. In der Vergangenheit hat es mehrere ähnliche Unfälle in Konstanz gegeben.

Soft Field Takeoff – muss das sein?

Die schiere Anzahl ähnlich gelagerte Unfälle, bei denen jeweils so früh wie möglich abgehoben wurde, um dann im Bodeneffekt zu beschleunigen, hat mich dazu veranlasst, mir noch einmal Gedanken über das Thema „Soft Field Takeoff“ zu machen.

Der Soft Field Takeoff gehörte 1978 zum meinem Ausbildungsprogramm an der Verkehrsfliegerschule der Lufthansa in Phoenix, Arizona. Damals übten wir das Manöver mit der Beechcraft Bonanza auf einer ewig langen Asphaltpiste. Ich nehme an, der Soft Field Takeoff gehört auch heute noch zum Ausbildungsprogramm für den PPL. Warum eigentlich? Fliegen wir immer noch mit Doppeldeckern auf schlammigen Ackerflächen wie 1914?

Den ersten Unfall bei einem Soft Field Takeoff hatten wir gleich 1978 während unserer Ausbildung gesehen. Eine Bonanza fuhr nach dem Abheben zu früh das Fahrwerk ein, die Beschleunigung lief nicht wie vorgesehen und das Flugzeug sank zurück auf die Runway. Die Werft war danach eine Weile mit der Maschine beschäftigt.

Ich fand den Soft Field Takeoff damals einfach ein cooles Manöver, ohne darüber nachzudenken, wann man das jemals anwenden sollte. Darüber wurde uns in der Ausbildung nichts beigebracht. Es ging nur um die Beherrschung des Manövers an sich. Wichtige Bedenken wurden damals – wie wahrscheinlich auch heute noch – überhaupt nicht angesprochen.

Einen Soft Field Takeoff braucht man eigentlich nur, wenn ein normaler Start nicht möglich ist. Sei es, dass die Graspiste klatschnass, hoch bewachsen oder schlammig ist. Oder auf einer tief verschneiten Asphaltpiste. Das größte Problem bei einem Soft Field Takeoff wird in der Ausbildung gar nicht erwähnt. Anders als bei einer trockenen Piste gibt es keinerlei Möglichkeit, für so einen schlechten Bahnzustand die erforderliche Startstrecke zu berechnen. In dem

Moment, wo man auf so einer Matschpiste das Gas reinschiebt, hat man sein Schicksal dem Zufall überlassen. Man weiß nämlich nicht, ob die Bahn zum sicheren Start überhaupt ausreicht. Und selbst wenn man sich Abbruchkriterien überlegt hat, wie z.B. eine Mindestgeschwindigkeit bei der Bahnmitte, gibt das keine Garantie, dass die Beschleunigung auf der zweiten Bahnhälfte munter so weitergeht. Und man weiß auch nicht, ob dann bei einem Startabbruch die verbleibende glitschige Strecke zum sicheren Stoppen ausreicht.

Die schweizerische SUST geht mit der im Internet oft beschriebenen 70/50-Regel hart ins Gericht. Diese Regel hat ihren Ursprung im „Alaskan Off Airport Operations Guide“ der FAA. Nach dieser Faustformel muss bei 50 % der Bahnlänge 70 % der Endgeschwindigkeit erreicht sein, um diese Geschwindigkeit am Bahnende zu erreichen. Eine solche Endgeschwindigkeit, im Guide der FAA als „lift off speed“ bezeichnet, ist jedoch in keinem Flughandbuch angegeben. Der Pilot der Mooney hatte diese Regel bei seinem Start als Kriterium aufgeführt, dass die Fortsetzung des Starts nach der halben Bahn sicher sei.

Die SUST dazu:

„Die Anwendung dieser vermeintlich aus der fliegerischen Praxis hervorgegangenen Faustregel führt zudem zu einem Entscheid zwischen ‚go‘ oder ‚stop‘ in der Pistenmitte. Im Unterschied zur Anwendung des bei mehrmotorigen Flugzeugen gebräuchlichen Abbruchkriteriums ist damit jedoch keineswegs sichergestellt, dass die verbleibende Pistenlänge zur Fortsetzung des Startvor-

gangs bzw. zum Anhalten vor dem Pistenende noch ausreicht; hingegen kann ein Startabbruch auch nach dem ‚go‘ noch zulässig und bisweilen sogar sinnvoll sein.“

Ich finde, ein Soft Field Takeoff ist kein sicheres Verfahren. Es gibt keine Möglichkeit, vor dem Start zu berechnen, ob die Startstrecke ausreicht, und erst recht nicht, ob danach die Hindernisse sicher zu überfliegen sind. Zudem gibt es in keinem Flughandbuch Daten, bis zu welcher Kombination von Gewicht und Density Altitude ein sicheres Beschleunigen im Bodeneffekt überhaupt möglich ist. Auch das Training auf einer Asphaltbahn oder einer trockenen Graspiste bereitet in keiner Weise darauf vor, wie es sich anfühlt, auf einer matschigen Wiese zu starten bzw. das zu versuchen.

Vielleicht sollte man umdenken: Genauso wie es keine gute Idee ist, bei Gewitter, Sturm und Schneefall zu fliegen, sollte man bei überfluteten oder matschigen Graspisten einfach nach Hause oder ins Hotel gehen, bis alles abgetrocknet ist.

Ein anderer Punkt gibt ebenfalls zu denken. Bei vielen der beschriebenen Unfälle gab es überhaupt keine Probleme mit der Bahn. Bei den Unfällen wie denen in Konstanz dürften die nahen Bäume hinter dem Bahnende den Piloten suggeriert haben, es sei besser, so früh wie möglich abzuheben. Die Pilotin in Coburg hat sich vielleicht erschrocken, als vor ihr plötzlich eine Straße auftauchte, und hat zu früh gezogen, weil sie sich bereits am Bahnende glaubte. Das wäre eine Möglichkeit. An dem Flugplatz quert eine mit Ampel gesicherte Straße die Graspiste. Die BFU hat

nicht erwähnt, ob die Pilotin mit dem Flugplatz gut vertraut war.

Mit der Kenntnis der hier beschriebenen aerodynamischen Besonderheiten im Langsamflug müsste jeder Pilot einsehen, dass die größte Hindernisfreiheit nur dann erreicht werden kann, wenn man einen normalen Start durchführt, auf V_x beschleunigt und V_x beibehält, bis die Hindernisse überflogen sind.

Der induzierte Widerstand in Zahlen – ein Beispiel

In meinem Artikel „Go-Around Probleme“ in *Pilot und Flugzeug* 2023-03 habe ich darauf hingewiesen, dass es essenziell ist, die Klappen beim Go-Around sofort aus der Landstellung etwas einzufahren. Auch wenn das Flugzeug noch nicht steigt. Denn durch den hohen induzierten Widerstand im Langsamflug ist wie beim Soft Field Takeoff der Widerstand so hoch, dass u.U. auch mit Full Power die Höhe mit vollen Klappen nicht gehalten werden kann.

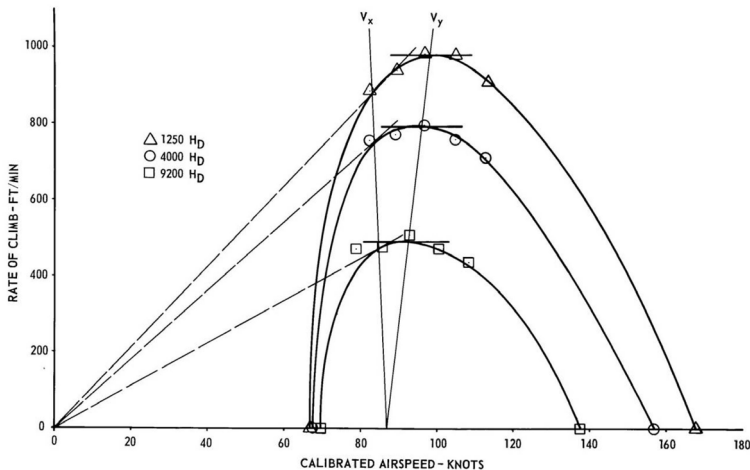
Auch Bernd Hamacher hat in *Pilot und Flugzeug* über den Go-Around geschrieben („Go-around“ – flugphysikalisch, *Pilot und Flugzeug* 2018-06). Er erwähnt darin den Flight Test Guide der FAA, in dem eine interessante Grafik abgebildet ist: Die mögliche Steigrate bei einem bestimmten Gewicht und in einer Höhe in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Diese Grafik möchte ich hier noch einmal zeigen. Die Daten sind von einem nicht benannten Flugzeugtyp, zeigen aber exemplarisch, wie die mögliche Steigrate zusammenbricht, wenn man die Fahrt unter die V_y und erst recht unter die V_x reduziert.

In dieser Grafik beträgt die V_x in der obersten Kurve (niedrigste getestete Höhe) 83 Knoten bei einer Steigrate von 880 ft/min. 10 Knoten unter der V_x ist die Steigrate nur noch 650 ft/min. Nur 5 Knoten langsamer – also bei 68 Knoten – ist die Steigrate NULL.

Bei dieser niedrigen Geschwindigkeit wird die komplette Startleistung des Motors benötigt, nur um die Höhe zu halten. Ein Beschleunigen, um diese Situation zu beenden, ist ohne Höhenaufgabe nicht mehr möglich. Ziehen am Höhenruder wird – wenn es nicht sofort zum Stall führt – umgehend zum Sinken führen!

Eine Kurve macht alles nur noch schlimmer

Wir haben gesehen, dass die Steigleistung bei Full Power durch den induzierten Widerstand unterhalb von V_x drastisch in die Knie geht. Gravierender ist die Situation, wenn man unter V_x , z.B. nach einer Motorstörung, eine Kurve einleitet. Die Erhöhung des induzierten Widerstands führt dann unweigerlich zu weiterem Fahrtverlust und erhöht die Sinkrate. Beim Fliegen sollte man wirklich nur das tun, was man auch vorher trainiert hat. Wenn man mit seinem eigenen Flugzeug sehr gut vertraut ist und eine Umkehrkurve nach Motorstörung oft trainiert hat, dann mag das Manöver sicher zu fliegen sein. Die Erfahrung aus etlichen Unfällen jedoch lehrt, dass es sehr gefährlich ist, nach einer Motor-



Diese Grafik aus dem FAA Flight Test Guide zeigt, wie schnell die mögliche Steigrate zusammenbricht, wenn man die Fahrt unter V_x verringert. FAA AC 23-8C, v. 16.11.2011, S. 51

störung zu versuchen, zum Platz zurückzukommen.

In einem Unfallbericht des britischen Aircraft Accident Investigation Board (AAIB Bulletin 1/2026) wird der Absturz einer Jodel bei so einem Manöver beschrieben. Das AAIB empfiehlt dazu:

„Do not consider making a ‘turn-back’ manoeuvre – it is always safer to aim for a point in front of you or to the side.“

Und weiter:

„During the period 2011–2021 the AAIB completed 16 field investigations in which partial loss of power was involved. Arising from those 16 accidents, there were 15 fatalities and 9 serious or life-threatening injuries. In two of these accidents there were no injuries, and both were as a result of flying the aircraft under control to a successful forced landing or ditching.“

Warum also verschlimmert eine Kurve in niedriger Höhe mit Geschwindigkeiten unter V_x die Lage deutlich?

Zunächst – wir nehmen mal an, der Start erfolgte gegen den Wind – wird ein Turnback zu einer Rückenwindlandung führen, mit deutliche höherer Groundspeed beim Aufsetzen als bei einer Landung geradeaus. Und die Entscheidung dafür wird u.U. zu einem Zeitpunkt gefällt, zu dem man noch nicht sicher weiß, ob die Landebahn überhaupt erreicht werden kann.

Zudem muss für eine koordinierte Kurve gezogen werden. Der Anstellwinkel erhöht sich (auch bei gleichbleibender Geschwindigkeit), was zu höherem induzierten Widerstand führt. Daraus resultiert eine erhöhte Sinkrate. Diese optisch wahrgenommene schnellere Annäherung an den Boden hat in vielen Fällen die Piloten so überrascht, dass sie die Kurve noch enger gezogen haben. Eine tödliche Spirale: Entweder kam es zur frühzeitigen Bodenberührung oder zu einem Stall- / Spin-Unfall.

Die Liste der tödlichen Unfälle bei solchen Turnbacks ist leider sehr lang. Darunter auch so prominente Unfälle wie der Stall des Traditionsflugzeugs Saab 91B Safir in Bremen 2014 mit zwei Toten. Jeder einzelne dieser Unfälle ist einer zu viel.

Mythos „Kurve in Rückenwind“

In der Fliegerwelt gibt es einige aerodynamische Mythen, die in Pilotenkreisen und im Internet immer wieder diskutiert werden. Einen Mythos habe ich bereits erwähnt, die Sache mit Bernoulli und dem Auftrieb.

Nun gibt es ein noch viel schrilleres Thema: Leute behaupten, eine Kurve in den Rückenwind sei gefährlich, weil durch das Zunehmen der Ground Speed die angezeigte Geschwindigkeit zurückgehen würde – bis

hin zum Stall. Als ein Beispiel wird eine Kurve nach links gleich nach dem Start mit Seitenwind von rechts genannt.

Tatsächlich weiß das Flugzeug in einer sich homogen bewegenden Luftmasse nicht, woher der Wind weht. Man kann einfach Kreise mit gleicher IAS fliegen. Bei starkem Wind ändert sich lediglich die Groundspeed, ohne die IAS zu beeinflussen.

Zur Erklärung kann man ein in einem Fluss kreisendes Motorboot nehmen. Im Nebel kann man beim Kreisen (z.B. mit der Hand im Wasser) keine Änderung der „angezeigten“ Geschwindigkeit erkennen. Lichtet sich der Nebel, stellt man jedoch beim Blick ans Ufer fest, dass sich die Geschwindigkeit gegenüber dem Land ständig ändert.

Nun könnte man das Thema als Spinnerei abtun, wenn nicht tatsächlich schon Flugzeuge abgestürzt wären, die zuvor nach dem Abheben „in den Rückenwind“ gekurvt waren. Der Mythos hält sich vielleicht auch so lange, weil ihm Unfalluntersuchungsbehörden ebenso verfallen wie seriöse Luftfahrt-Magazine.

Bevor ich Beispiele für solche Fehlinterpretationen nenne, möchte ich erklären, warum u.U. bei starkem Seitenwind z.B. von rechts eine frühe, tiefe Kurve nach links mit Risiken verbunden ist. Die Risiken sind hier: Windscherungen, Turbulenzen, optische Illusionen und unerwartet schnelle Annäherung an Hindernisse auf der Downwind-Seite.

Zunächst einmal spielt hier eine Rolle, dass die Windgeschwindigkeit in der Höhe größer ist als am Boden. In der Höhe wird der Wind durch die Corioliskraft abgelenkt. In der Grenzschicht, die über Land etwa 1.000

Meter dick ist, wird der Wind abgebremst. Dadurch verringert sich die Corioliskraft und die Ablenkung durch sie. In der Folge dreht der Wind von unten kommend mit der Höhe über Land (auf der Nordhalbkugel in unseren Breiten) etwa um 30° nach rechts und er ist in der Höhe ungefähr doppelt so stark wie am Boden.²

Hat man beim Start einen Seitenwind von etwa 15 Knoten von rechts und fliegt dann eine Kurve im Steigflug nach links „in den Rückenwind“, nimmt die IAS rasch um bis zu 15 Knoten ab. Aber nicht, weil die Groundspeed steigt, sondern durch die Windscherung mit 15 Knoten stärkerem Wind als am Boden. Infolge müsste der Pilot, wenn er denn ordentlich fliegt, die Nase runternehmen, um die Fahrt zu halten. Der Steigwinkel wird deutlich flacher, die nun viel höhere Geschwindigkeit über Grund suggeriert eine zu hohe Fluggeschwindigkeit. Das und die nun schneller als erwartet größer werdenden Hindernisse, z.B. eine Baumreihe, führen dazu, dass der Pilot, statt die Nase zu senken, diese hochzieht, ohne den Fahrtmesser zu beachten. Er will, dass die Fahrt wieder „normal aussieht“, er will den erwarteten Steigwinkel beibehalten und die Hindernisse im erwarteten sicherem Abstand überfliegen. All das kann zum schnellen Erhöhen des Anstellwinkels führen. Damit verbunden ist ein rascher Anstieg des induzierten Widerstands und ein weiterer Fahrtverlust mit noch flacherem Steigwinkel. Dies führt letztlich zum Strömungsabriss.

Das ist keine Theorie, sondern gelegentlich Unfallursache, der Leute zum Opfer fallen,

2) Das ist der Grund, warum Windkraftanlagen so hoch sind...

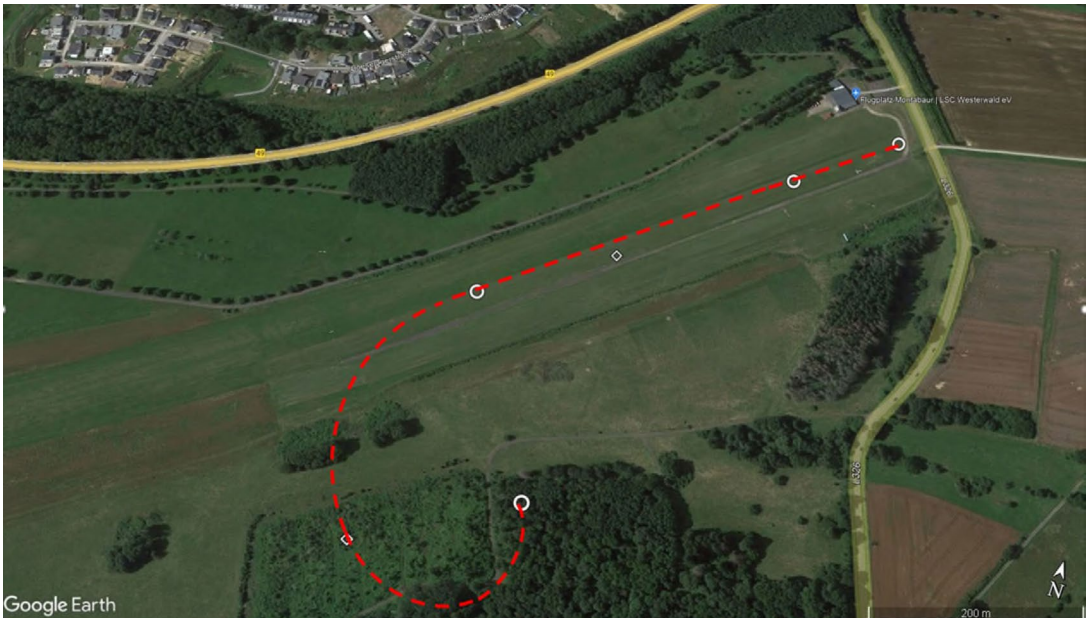
die es nicht erwarten können, die erste Kurve zu fliegen.

Ein solcher Unfall hat sich am 12. Juni 2021 auf dem Segelfluggelände Montabaur ereignet. Der Pilot einer Breezer entschloss sich, entgegen der Platzrunde (die erst mal geradeaus geführt hätte) in nur 150 Fuß eine enge Steilkurve mit am Ende über 60° Querlage zu fliegen. Dabei verlor die Maschine schnell an Höhe und stürzte in den Wald. Der Passagier konnte sich retten, der Pilot verbrannte im Wrack des Flugzeugs.

Die BFU hat den Unfallbericht dazu am 8. Juli 2025 veröffentlicht. Und nahm offenbar den Mythos „Kurve in Rückenwind“ in ihrem Bericht mit auf. Der aerokurier hat das in seiner Ausgabe 11/2025 unkommentiert übernommen. Die BFU schrieb u.a.:

„Mit dem Eindrehen auf südwestlichen Kurs erhöhte sich die Geschwindigkeit über Grund durch den Rückenwind um ca. 15 kt bzw. 28 km/h. Die wahre Fluggeschwindigkeit³ des ULs betrug somit ca. 107 km/h, als es in 150 ft in südöstlicher Richtung flog und sich die Querneigung auf über 60° erhöhte. Dem Piloten war wahrscheinlich nicht bewusst, dass die wahre Fluggeschwindigkeit des ULs zu diesem Zeitpunkt nur knapp über 100 km/h betrug, da auf Grund des Rückenwindes und der niedrigen Flughöhe der optische Eindruck eine wesentlich höhere Fluggeschwindigkeit suggerierte.“

3) Aus dem Zusammenhang des Berichts ergibt sich, dass mit „wahre Fluggeschwindigkeit“ nicht die „True Airspeed“, sondern die IAS, die Indicated Airspeed, also die am Fahrtmesser angezeigte Geschwindigkeit gemeint ist.



Ungefährer Flugweg der Breezer in Montabaur nach Zeugenaussagen

Google Earth / BFU

Hier theoretisiert die BFU ohne Beleg aufgrund des Mythos „Kurve in Rückenwind“ über die IAS, die dem Piloten angezeigt wurde. Tatsächlich wurde die IAS ebenso wenig aufgezeichnet, wie die BFU die tatsächliche Windgeschwindigkeit in der Flughöhe ermitteln konnte. Immerhin hat die BFU deutlich auf die optischen Illusionen im Tiefflug mit Rückenwind hingewiesen.

Bei einem anderen Unfall hat sich ebenfalls eine Unfalluntersuchungsbehörde bei der Bewertung eines Flugunfalls auf den Mythos „Kurve in Rückenwind“ kapriziert. Das war die irische Air Accident Investigation Unit (AAIU). Die irrigen Zeilen im Unfallbericht wurden jedoch später geändert, offenbar aufgrund von Hinweisen anderer Piloten. Bei dem Unfall 2008 war eine PA 28-180 Archer im Tiefflug bei böigem Wetter nach einer

Kurve in den Rückenwind in einen Berghang geflogen. Vier Menschen fanden den Tod. Aufmerksam auf den Unfall wurde ich durch einen Blog, in dem sich Piloten über die Erfassung des Unfallberichts austauschten. Im „THE STRAIGHT DOPE MESSAGE BOARD“ schrieb ein Nutzer unter der Headline „Aircraft turns from headwind to tailwind – loss of IAS?“ über den Unfallbericht, sofort einen Tag, nachdem dieser veröffentlicht worden war:

„The report contains the following: This turn is significant, as the aircraft would be manoeuvring from a high indicated speed/low groundspeed condition when heading into wind, to a low indicated speed when turned downwind. If the turn is made quickly, the effect of inertia may not allow the aircraft's speed to increase sufficiently to maintain flight. This will result in a substantial loss of lift

across the wing precipitating an aerodynamic stall.“

Dieser haarsträubende aerodynamische Unsinn hat offenbar so viel Widerspruch erzeugt, dass der Unfallbericht später geändert wurde. So etwas sieht man wirklich nicht alle Tage. Der jetzige Text desselben Abschnitts liest sich jetzt so:

„This turn is significant, as it placed the aircraft downwind in severe gusting conditions. It is also highly probable that windshear and severe turbulence were present in this area of mountainous terrain. If the turn was made quickly in these conditions, the effect of drag together with the changes in relative air-flow, may have resulted in a substantial loss of lift across the wing precipitating an aerodynamic stall. Ultimately, the aircraft probably entered an aerodynamic

stall downwind at a low airspeed. Recovery from such a stall was not possible in the height available.“

Was können wir aus diesen Unfällen lernen? Kurven in Bodennähe in einen Rückenwind können zu bösen Überraschungen für die Piloten führen: Die höhere Geschwindigkeit über Grund suggeriert optisch, man sei schneller (IAS), als man tatsächlich ist. Das kann dazu verleiten, die Nase hochzunehmen. Beim Abflug in niedriger Höhe bei niedriger Geschwindigkeit nahe V_x führt das zusätzlich zum Kurvenflug zu einem rasanten Anstieg des induzierten Widerstands, zum Zusammenbruch der Steiggeschwindigkeit und zu der alarmierenden Erkenntnis, dass die Hindernisse voraus nun schnell näherkommen. Kommen Windscherungen mit plötzlich stärkerem Rückenwind dazu, kann der kritische Anstellwinkel schnell überschritten werden und die Strömung reißt



Rescue Teams 2008 am Corriebracks Mountain in Irland, wo es nichts mehr zu retten gab. Alle vier Insassen der Piper PA 28 fanden den Tod ...

ab. Geradeaus zu steigen mit angemessenen höherer Geschwindigkeit sichert nicht nur bei windigem Wetter ein längeres Leben. Die Behauptung hingegen, allein die Kurve in den Rückenwind verringere die angezeigte Geschwindigkeit, gehört in den dunklen Märchenwald der Aerodynamik.

What goes up must come down ...

Nachdem wir uns mit dem induzierten Widerstand beim Start beschäftigt haben, stellt sich die Frage: Stört der auch bei der Landung? Aber ja.

Im Langsamflugbereich bei Start und Landung und im Anflug kommt man in die „Region of the Reverse Command“. Die Bezeichnung kommt daher, dass in dieser Region ein Ziehen am Höhenruder nicht zwangsläufig zum Steigen führt. Wenn man im Endanflug z.B. zu tief kommt und dann zieht, erhöht sich zwar kurz der Auftrieb durch den höheren Anstellwinkel, aber durch die verringerte Fahrt erhöht sich der Widerstand rasant und die Fahrt geht noch weiter in den Keller. Durch den nun höheren Widerstand sinkt das Flugzeug, statt dass es steigt.

Der induzierte Widerstand kann bei Unterschreiten der empfohlenen Anfluggeschwindigkeit für Kurzlandungen schnell so hoch werden, dass man selbst mit Full Power den Zustand nicht beenden kann. Das Flugzeug beschleunigt nicht mehr, und die Sinkrate erhöht sich durch den größer gewordenen Widerstand. Beenden kann man so einen Zustand nur durch Nachlassen des Höhenruders, wenn dazu überhaupt noch die verbleibende Höhe ausreicht.

Ich möchte zwei Beispiele aus meiner eigenen Fliegerei vorstellen:

Einmal war ich mit meiner Piper Arrow im kurzen Anflug auf die steil ansteigende Landebahn auf der Wasserkuppe. Den Anflug machte ich wie üblich mit vollen Klappen (3. Raste, 40°). Die Motorleistung war sicherlich schon durch die große Höhe und die sommerliche Temperatur etwas eingeschränkt, als ich in einen starken Abwind einflog. Schlagartig sank die Arrow unter den beabsichtigten Anflugwinkel, und die Fahrt war im Keller. Vollgas konnte die Situation nicht beenden. Glücklicherweise erkannte ich meinen Fehler: Ich hatte den Propellerhebel noch auf 2.300 RPM stehen, statt ganz vorne. Nachschieben auf 2.700 RPM streckte den Gleitweg so weit, dass ich die Landebahn noch erreichen konnte. Ein Durchstarten wäre nun wegen des unstabilierten Anflugs erforderlich, angesichts der ansteigenden Landebahn aber nicht sicher durchführbar gewesen.⁴

Klar habe ich es danach auf der Wasserkuppe anders gemacht: Anflug nur noch mit Klappen 25°, 2. Raste, und frühzeitigeres Konfigurieren für die Landung inklusive der Landing Checklist ...

Das zweite Event war eine Ziellandeübung in Mainz. Wie ich es 1979 in Phoenix gelernt hatte, bin ich mit Best Glide Speed etwas auf der hohen Seite angefliegen, um dann nach und nach Fahrwerk und Klappen zu fahren und dabei bis auf die Anflugfluggeschwindigkeit zu reduzieren. Kurz vor der Bahn stellte ich jedoch fest, dass das in einer abartig hohen Sinkrate endete. Ich hatte Zweifel, den Abfangbogen sicher zu schaffen.

4) Siehe dazu mein Artikel „Einweisung Wasserkuppe“, *Pilot und Flugzeug* 2021-07

fen, ohne Stall oder extrem harte Landung. Mit einem sofortigen Go-Around beendete ich die Übung.

Nach diesem Erlebnis habe ich meine Notlandeübungen komplett geändert und bin damit auch nie mehr in die Situation gekommen, dass ich am Ende zu tief gekommen wäre und nichts mehr hätte machen können. Wie ich danach einige Jahre Ziellandungen geflogen bin, stand in keinem Lehrbuch, ich fand das aber viel sicherer:

Meine Anflüge waren eine Mischung aus Segelflug- und Space-Shuttle-Anflug: Anflug konsequent mit Best Glide Speed, dann auf der hohen Seite nach und nach Fahrwerk und Klappen ausfahren und dabei aber die Best Glide Speed beibehalten. Das hat den Vorteil, dass man nun jederzeit, zum Beispiel in einem plötzlichen Abwindfeld, die Klappen wieder einfahren kann. Erst in Bodennähe, wenn das Erreichen des Landefeldes gesichert war, habe ich wie beim Space Shuttle einen flacheren Anflugwinkel eingenommen, um die Fahrt bis kurz vor dem Aufsetzen auf die Mindestgeschwindigkeit zu reduzieren.

Klappen als Speedbrake wie beim Segelflugzeug geht mit den manuellen Landeklappen der Arrow wunderbar. Extrem hohe Sinkraten kurz vor dem Aufsetzen konnte ich so vermeiden.

Zwei Piloten, die ich sehr schätze, empfehlen für Notlandungen etwas genau anderes, was ich nie machen würde: Den Anflug im Sackflug bzw. mit 1,2 Vstall.

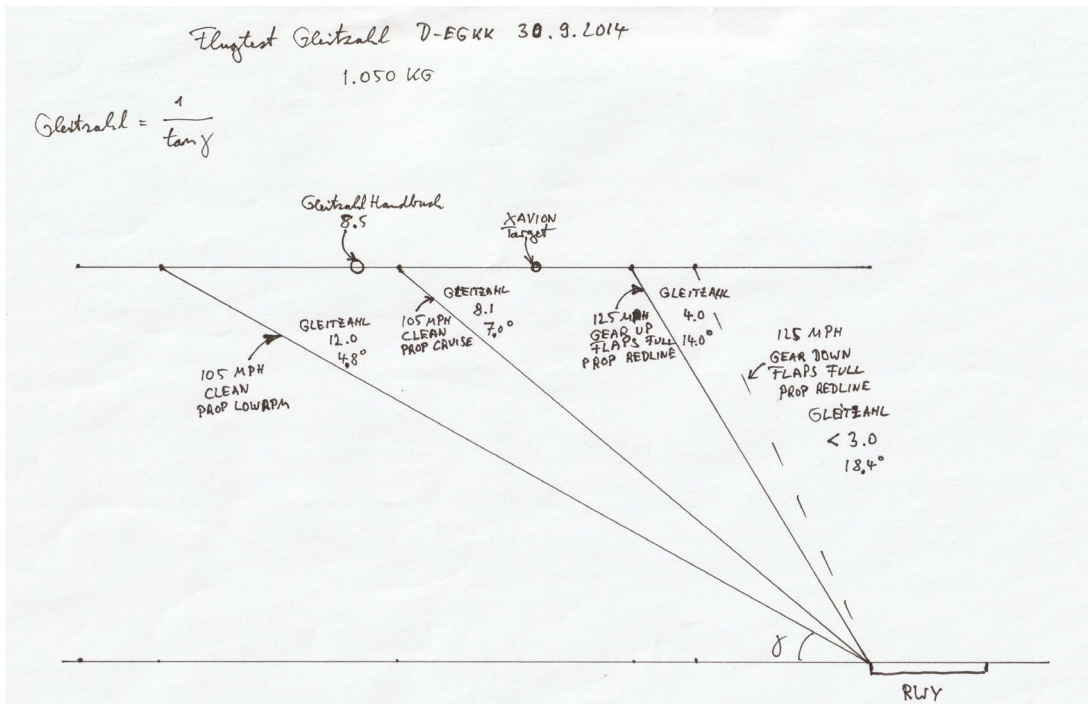
Der eine Pilot ist Thomas Schüttoff, Experte für Oldtimerflugzeuge und Fluglehrer. In seinem Artikel „Die Kunst der Langsamkeit –

Mindestfahrt und Stall Speed“ im aerokurier 11/2025 beschreibt er den Sackflug, also den Flug in unmittelbarer Stall-Nähe, als Option, bei einer Notlandung über einer Waldfläche mit Mindestfahrt anzufliegen.

Sicher hat er recht, dass auf unlandbarem Gelände das Aufsetzen mit absoluter Mindestfahrt die geringste kinetische Energie in den Crash bringt. Aber zwei Dinge würden mich von so etwas abhalten:

- So eine Art Anflug wird nicht trainiert und kann auch nicht trainiert werden, weil man mit nahezu Stall Speed nicht sicher zur Landung abfangen kann. Man sollte nur Manöver fliegen, die man sicher beherrscht und geübt hat.
- Ein Anflug ohne Power mit Fahrwerk und Klappen draußen bei Mindestgeschwindigkeit erzeugt extrem hohe Sinkraten und lässt nicht mehr zu, dass man den Aufsetzpunkt selbst auswählt: Ziehen oder Nachdrücken würden lediglich die Sinkrate weiter unkontrolliert erhöhen. Kurven können sofort zum Stall führen.

Der andere Pilot, der zu diesem Thema geschrieben hat, ist Bernd Hamacher. In seinem ansonsten ausgezeichneten Artikel „Die Notlandung“ in *Pilot und Flugzeug* 2016/10 empfiehlt er wegen der niedrigen kinetischen Energie beim Aufsetzen den Anflug zur Notlandung mit 1,2 Vstall. Diese Art des Anflugs würde ich aus exakt denselben Gründen wie oben beschrieben nicht in Erwägung ziehen. Wie hoch ist eigentlich die Sinkrate im Anflug zur Notlandung? Das wird sicher kaum ein Pilot genau beantworten können, denn er



Gleitahl meiner Arrow mit Motor im Leerlauf bei verschiedenen Konfigurationen. Erfolgen für die Programmierung von Xavion.

hat z.B. bei einer Ziellandeübung die Augen vorrangig draußen und im Cockpit wird er sich wahrscheinlich lediglich für den Airspeed Indicator interessieren.

Also: Steigen Sie mal in sichere Höhe, konfigurieren das Flugzeug für eine Notlandung und ziehen die Power raus. Dann halten Sie die Fahrt und gucken mal, was passiert. Wenn Sie das bei einer Geschwindigkeit knapp über dem Überziehen machen, werden Sie sehen, wie schnell das runtergeht, verglichen mit Anflügen bei einer normalen Anfluggeschwindigkeit.

Software wie Xavion⁵, die eine Flugführung zur Notlandung auf der nächsten Runway auch in IMC anbieten, erwarten weit höhere Geschwindigkeiten jenseits der Best Glide

Speed. Dann ist man auf der anderen, normalen Seite der Power-Curve. Mit Nachdrücken kann man die Fahrt und den Widerstand erhöhen und mit Ziehen den Flugweg strecken. Erst wenn man dann nach Sicht die Runway vor sich hat, ist es an der Zeit, die Geschwindigkeit zur Landung zu reduzieren. Entweder mit den Landeklappen oder einem Slip. Klappt wunderbar ...

Mit meiner Arrow habe ich einmal ein paar Testflüge gemacht, um die Gleitzahlen für verschiedene Konfigurationen beim Anflug zu einer Notlandung zu bestimmen. Die Daten dienen zur Programmierung der Notlande-Software Xavion. Ich brauchte jeweils nur mit Leerlauf für eine Konfiguration für eine Weile die gewünschte Fahrt zu halten, Xavion hat dann die Gleitahl dazu gemessen und angezeigt. Die letzte, steilste Mes-

5) Siehe dazu mein Artikel „Xavion – Retter in der Not“, *Pilot und Flugzeug* 2013-07

sung (Power Idle, Fahrwerk ausgefahren, Klappen Landstellung, Fahrt am Klappenlimit 125 MPH) musste ich abbrechen: Inzwischen war ich über eine Ortschaft angekommen und ich wollte nicht, dass jemand die Feuerwehr anruft, weil dort ein Flugzeug abstürzen würde ...

Immerhin, mit der Arrow kann man eine Gleitzahl von unter 3 erreichen, also einen Anflugwinkel steiler als 18° – fast wie ein Space Shuttle, nur nicht so schnell.

Fazit

- Beim Abheben mit Geschwindigkeiten unter V_x hat man sich u.U. extremen induzierten Widerstand mit an Bord geholt. Es ist nicht sichergestellt, dass man so sicher auf Fluggeschwindigkeit beschleunigen kann.
- Der Versuch, mit Geschwindigkeiten unter V_x aus dem Bodeneffekt zu steigen, führt zur Verdoppelung des Widerstands, erhöht den Anstellwinkel und kann zum Stall führen.
- Ein echter Soft Field Takeoff birgt Risiken:
 - Es gibt keine Möglichkeit, vor dem Start die erforderliche Startstrecke zu berechnen.
 - Unter Umständen ist kein Beschleunigen nach dem Abheben möglich.
- Bei einer trockenen Grasbahn besteht keine Notwendigkeit, einen Soft Field Takeoff durchzuführen. Ein normaler Start mit anschließendem Steigflug mit mindestens V_x ist hier das Mittel der Wahl.
- Findet man sich nach dem Abheben unter V_x in einer Situation wieder, in der das Flugzeug nicht beschleunigt, sollte man den Start abbrechen.
- Stellt man fest, dass man mit V_x die Hindernisse voraus nicht überfliegen kann – dann kann man sie nicht überfliegen! Hier muss unter Umständen der Flug mit einer Außenlandung abgebrochen werden.
- Tiefe Kurven nach dem Start – vor allem in den Rückenwind – bergen erhebliche Risiken: optische Illusionen, verringerte Steigleistung durch Windscherungen und hohe Geschwindigkeit über Grund können zum Verlust der Hindernisfreiheit führen oder zu einem Stall durch „instinktives“ Hochziehen.

Für die Landung gibt es ebenfalls Risiken durch hohen induzierten Widerstand:

- Bei einer Motorstörung nach dem Abheben muss sehr schnell nachgedrückt werden, damit der Anstellwinkel im Limit bleibt. Daher empfiehlt sich (außer wenn man Hindernisse vor sich hat), mit einer erhöhten Geschwindigkeit den Anfangssteigflug zu fliegen.
- Umkehrkurven bei Motorstörung nach dem Start enden zu oft tödlich, besser nicht machen.
- Anflüge auf sehr kurze Runways mit reduzierter Anfluggeschwindigkeit, z.B. mit $1,2 V_{stall}$, erfordern eine schnelle Hand am Gas. Niemals zulassen, dass die Fahrt unter die Anfluggeschwindigkeit geht.

- Gerät man auf einer solchen Short Field Landing zu tief, empfiehlt sich ein sofortiger Go-Around. Man sollte nicht abwarten, bis der hohe induzierte Widerstand das unmöglich macht.
- Eine frühzeitige Go-Around-Entscheidung kann lebensverlängernd sein. Nicht vergessen, dabei sofort die Landeklappen nach Handbuch etwas einzufahren, auch wenn das Flugzeug noch sinkt.
- In der Platzrunde beim unbeabsichtigten Überschießen des Endanflugs – z.B. durch Rückenwind auf dem Queranflug – sich niemals dazu verleiten lassen, mit einer Steilkurve die Situation zu retten. Besser sofort einen Go-Around einleiten und niemals mit mehr als 30° kurven.

 peter.klant@pilotundflugzeug.de

Einige Quellen:

- [1] Aerodynamics for Naval Aviators
U.S. Navy, 1965

Startunfälle:

- [2] BFU Bericht Unfall mit einer Piper PA28 bei Coburg Steinrücken
<https://tinyurl.com/PA28-Coburg>
- [3] SUST Bericht Startunfall Aquila Lommis, 31.3.2023; https://www.sust.admin.ch/inhalte/AV-berichte/HB-SGU_EdU_D.pdf
- [4] SUST Bericht Mooney Startunfall Lommis, 14.8.2019; https://www.sust.admin.ch/inhalte/AV-berichte/HB-DIL_SumB.pdf

[sust.admin.ch/inhalte/AV-berichte/HB-DIL_SumB.pdf](https://www.sust.admin.ch/inhalte/AV-berichte/HB-DIL_SumB.pdf)

- [5] SUST Bericht Startunfall Piper Tomahawk in Grenchen, 2014
Mit Informationen zum Thema induzierter Widerstand, Bodeneffekt und zum Stall-Verhalten der Tomahawk; <https://www.sust.admin.ch/inhalte/AV-berichte/2263.pdf>
- [6] Startunfall Grumman in Konstanz Fehlerhafte Starttechnik unter schwierigen Bedingungen; Von Jan Brill, *Pilot und Flugzeug* 2026/01
- [7] BFU-Bericht Startunfall Breezer in Montabaur, 2021; <https://tinyurl.com/Breezer-Montabaur>

Artikel mit Informationen zum induzierten Widerstand:

- [8] „Go-around“ – flugphysikalisch; von Bernd Hamacher, *Pilot und Flugzeug* 2018-06
- [9] Go-Around Probleme – Nicht immer gelingt ein Durchstartmanöver ...; von Peter Klant, *Pilot und Flugzeug* 2023/03
- [10] Why all pilots need to understand the ‘region of reverse command’ GoFly Flight Training; <https://gofly.online/region-of-reverse-command/>