



Theoriematerial zur Ausbildung für Fortgeschrittene

Energie im Luftkampf

Inhaltsverzeichnis

1) Einführung – was, wie und warum	2
2) Das Triebwerk – die große Energiequelle und ihre Tücken	2
3) Zwei Formen von Energie – viele, viele Faktoren	3
4) Energie verlagern – geschicktes Tauschen bringt Vorteile	4
5) Energie effizient einsetzen – 3 „E“s sichern den Sieg	5
6) Energiezustände schätzen – den Feind nicht unterschätzen	5

1) Einführung – was, wie und warum

Dieses Dokument ist Teil der theoretischen Grundlagen für das Modul „Luftkampf“ der virtuellen Jagdfliegerschule (<http://jfs.sturmovik.de>). Der Schüler sollte es deshalb vor Absolvierung des Moduls sorgfältig gelesen und überdacht haben. Falls Fragen offen geblieben sind, können diese im Forum der JFS gestellt werden, es gibt dort einen eigenen Thread für dieses Modul.

Es muß vorausgesetzt werden, daß der Schüler das „1 x 1 für junge Adler“ kennt und seine Inhalte verstanden hat.

Energie ist im Luftkampf ein Schlüsselement. Die Energie bestimmt die möglichen Taktiken und Manöver. Den Energievorteil zu besitzen bedeutet, die Initiative zu haben. Warum das so ist, soll mit diesem Text erläutert werden. Um dieses Thema vollständig darzustellen, könnte man mehrere Kapitel eines Buches schreiben. Für das grundlegende Verständnis reicht es aber aus, drei wichtige Abschnitte zu betrachten: Die Energie und ihre „Entstehung“; der korrekte und effiziente Einsatz von Energie im Luftkampf; und das Abschätzen der Energiezustände feindlicher Maschinen im Verhältnis zur eigenen.

2) Das Triebwerk – die große Energiequelle und ihre Tücken

Wer im Physikunterricht auch nur einmal aufgepaßt hat, der weiß: Energie entsteht nicht, sondern existiert. Allerdings gibt es für uns nutzbare Formen von Energie und solche, die wir nicht nutzen können. Im Luftkampf gibt es zwei Formen von Energie, die wir nutzen können – dazu später mehr – und nur eine Energiequelle.

Die Quelle unserer Energie ist das Triebwerk. Es wandelt die chemisch gebundene Energie des Kraftstoffs in Bewegungsenergie um. Das Triebwerk wird dabei von drei Faktoren begrenzt: Dem Luftwiderstand, seiner eigenen Erwärmung und dem Kraftstoffvorrat.

Zunächst der Luftwiderstand, der das Flugzeug auf eine Maximalgeschwindigkeit begrenzt. Um noch schneller zu werden, können wir nur zwei Dinge tun. Die erste Möglichkeit ist, in höhere, dünnere Luftschichten zu steigen, wo der Luftwiderstand geringer ist; das ermöglicht eine schnellere Bewegung. Dem stehen jedoch die Probleme entgegen, die der abnehmende Luftdruck beim Motor verursacht. Deshalb können nur solche Flugzeuge einen Geschwindigkeitsvorteil aus größeren Flughöhen ziehen, die für den Einsatz in großen Höhen konzipiert sind. Unser Schulungsmuster, die Bf 109, gehört allerdings dazu.

Die zweite Möglichkeit ist, Höhe im Sturzflug aufzugeben. Die Erdanziehungskraft beschleunigt das Flugzeug dabei auf größtmögliche Geschwindigkeiten. Hier gibt es zwei Beschränkungen: die strukturelle Belastungsgrenze und der Erdboden. Vor allem letzterer macht aus dieser Art der Geschwindigkeitserhöhung eine vorübergehende Freude. Sobald wir keine Höhe mehr haben, die wir für Geschwindigkeit aufgeben können, wird das Flugzeug vom erhöhten Luftwiderstand auf seine Maximalgeschwindigkeit gebremst.

Je mehr Leistung das Triebwerk liefern soll, desto mehr Wärme produziert es. Um funktionieren zu können, ist es auf das Kühlsystem des Flugzeugs angewiesen. Die Fähigkeit des Kühlsystems, den Motor auf Betriebstemperatur zu halten, ist von der Geschwindigkeit des Flugzeugs abhängig. Nur bei ausreichender Eigengeschwindigkeit kann das Kühlsystem die überschüssige Wärme abführen. Es gibt deshalb für jede Motorleistung eine Minimalgeschwindigkeit, bei der der Motor ununterbrochen laufen kann; wird sie unterschritten, überhitzt der Motor. Viele Motoren benötigen für ihre maximal mögliche Leistung eine Mindestgeschwindigkeit zur Kühlung, die im Geradeausflug nicht erreicht werden kann. Dadurch ist diese Leistung nur kurzzeitig verfügbar – nämlich so lange, bis der Motor an die Grenze der Überhitzung kommt.

Zum Kraftstoffvorrat muß nicht viel gesagt werden – wenn der Sprit alle ist, dürfen wir segeln.

3) Zwei Formen von Energie – viele, viele Faktoren

Im Luftkampf können wir zwei Formen von Energie nutzen: Bewegungsenergie, oder kinetische Energie, und Lageenergie, auch potentielle Energie genannt.

Die kinetische Energie wurde im vorigen Kapitel bereits skizziert. Jeder, der schon einmal im vollen Lauf vor ein unverhofftes Hindernis geprallt ist, hat eine Ahnung von ihrer Leistungsfähigkeit. Sie berechnet sich nach der Formel

$$(1) \quad W_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

mit „m“ für die Flugzeugmasse und „v“ für die Eigengeschwindigkeit des Flugzeugs. Da sich nur die Geschwindigkeit bemerkenswert ändern kann, behalten wir als Daumenregel im Kopf:

Mehr Geschwindigkeit ist mehr Energie.

Allerdings mit dem Abstrich, daß wir nur „echte“ Geschwindigkeit für diese Daumenregel gelten lassen. Das bedeutet, daß unsere Geschwindigkeit vom Motor stammen soll und nicht aus einem Sturzflug. Ebenfalls aus dem vorigen Kapitel sind die Grenzen der kinetischen Energie beim Fliegen ersichtlich: Entweder erreichen wir im Geradeausflug die Maximalgeschwindigkeit, oder im Sturzflug die strukturelle Belastungsgrenze. Nach unten ist die kinetische Energie für uns mit der Abhebegeschwindigkeit begrenzt, unterhalb der wir nicht fliegen können, ohne Höhe zu verlieren. Alles in allem liefert die kinetische Energie also einen eher knapp bemessenen Spielraum.

Wesentlich spannender ist die potentielle Energie. Sie berechnet sich nach der Formel

$$(2) \quad W_{pot} = m \cdot g \cdot h$$

mit „m“ für die Flugzeugmasse, „g“ für die Erdschwerebeschleunigung und „h“ für die Flughöhe. Man sieht deutlich, daß sich nur die Höhe bemerkenswert ändern kann, deshalb die Daumenregel:

Mehr Höhe ist mehr Energie.

Die Grenze ist hier nach unten natürlich mit dem Boden gesetzt; nach oben könnten wir sie mit der Dienstgipfelhöhe festlegen; allerdings werden wir schon ein ganzes Stück vor der Dienstgipfelhöhe so langsam, daß das Flugzeug wie eine reife Pflaume in der Luft hängt. Es ist zwar sehr schwer, an ein so hoch fliegendes Flugzeug heranzukommen, aber hat man das erst einmal geschafft, ist es ziemlich wehrlos. Deshalb sollten wir nur so hoch steigen, daß wir nicht unter die sogenannte Manövergeschwindigkeit kommen.

Als Manövriergeschwindigkeit wird die Eigengeschwindigkeit des Flugzeugs bezeichnet, bei der man schnelle Ausweichbewegungen ausführen kann. Sie zu unterschreiten bedeutet, sich selbst auf den Präsentierteller zu setzen – man hängt als leichtes Ziel in der Luft. Die Manövriergeschwindigkeit ist vom Flugzeugtyp abhängig, für die Bf 109 liegt sie etwa bei 250 km/h angezeigter Eigengeschwindigkeit.

Um Höhe aufzubauen, ist ein Steigflug nötig. Natürlich ist es wünschenswert, so schnell zu steigen wie möglich, damit wir so schnell wie möglich so viel Energie wie möglich aufbauen. Um schnell zu steigen, muß man einen steilen Steigwinkel einnehmen; der sorgt für langsame Eigengeschwindigkeit. Wie oben ausgeführt, kann der Motor aber nur bei ausreichender Geschwindigkeit permanent gekühlt werden. Im Steigflug ist man meist unterhalb dieser Geschwindigkeit – deshalb kann man nur kurze Zeit mit maximaler Leistung steigen und je steiler man steigt, desto kürzer ist diese Zeit.

Deshalb ist es wichtig, den besten Kompromiß zwischen hoher Steigrate und lang verfügbarer Motorleistung zu finden. Für die Bf 109 liegt dieser Kompromiß bei 250 bis 270 km/h.

Ein zweiter Aspekt ist wiederum die Manövriergeschwindigkeit. Diese sollte auch im Steigflug nicht unterschritten werden.

Noch ein Wort zur Flugzeugmasse: Diese ändert sich nicht wesentlich, aber ständig – durch das Verbrennen von Kraftstoff. Das mag in einem Luftkampf von 2 Minuten Dauer keine Rolle spielen, aber es spielt eine Rolle, ob wir mit vollem, oder zu zwei Dritteln geleerten Tank in einen Kampf gehen. Unsere Steigleistung und Massenträgheit nimmt um einen spürbaren Faktor ab. Auf der anderen Seite haben wir wesentlich weniger Zeit für den Luftkampf und das kann uns den Sieg und sogar das Flugzeug kosten, wenn wir mangels Treibstoff fliehen müssen – und womöglich abgeschossen werden oder mit leeren Tanks notlanden müssen.

4) Energie verlagern – geschicktes Tauschen bringt Vorteile

Wir haben bis hierher zwei Formen von Energie, die wir für den Luftkampf aufspeichern können. Gut und schön – nur was nützt uns das? Im ACM- und Schießtrainingsmodul haben wir gelernt, daß wir uns Schußmöglichkeiten erfliegen müssen, um den Gegner zu besiegen. Schußmöglichkeiten erfliegen wir mit Manövern und im Normalfall brauchen wir umso mehr und radikalere Manöver, je stärker sich der Gegner zur Wehr setzt. Jedes Manöver kostet uns Geschwindigkeit, weil wir gegen die Massenträgheit unserer Maschine und den Luftwiderstand ankämpfen müssen. Der Luftwiderstand steigt enorm mit der Erhöhung des Anstellwinkels und genau das passiert, wenn wir radikal manövrieren müssen. Man könnte jetzt also sagen: Je schneller wir sind, desto besser sind unsere Chancen im Luftkampf? Beinahe, denn:

Unsere Chancen im Luftkampf sind umso besser, je mehr Energie wir haben!

Wir können unsere Geschwindigkeit nämlich nicht nur durch eine hohe Anfangsgeschwindigkeit oben halten, sondern auch, indem wir im Sturzflug kurven, oder besser: indem wir Höhe aufgeben.

Ein Flugzeug im Sturzflug tauscht Höhe gegen Geschwindigkeit. Also können wir umso länger manövrieren, je mehr Höhe wir mit ins Gefecht bringen. Wenn wir höher oder schneller sind als der Gegner oder beides, können wir länger Höhe gegen Geschwindigkeit tauschen und haben damit einen Energievorteil.

Wir können aber nicht nur Höhe in Geschwindigkeit umtauschen, sondern auch umgekehrt Geschwindigkeit in Höhe tauschen. Dies geschieht jedesmal, wenn wir steiler steigen, als unser Motor zu leisten in der Lage wäre. Dabei nimmt unsere Geschwindigkeit ab, während unsere Höhe schnell zunimmt. Ein solches Steigen wird auch als „zoomen“ bezeichnet. Warum ist dies sinnvoll? Die Antwort darauf liefert zum Beispiel das „High Yoyo“, das wir im ACM-Modul kennengelernt haben. Indem wir Geschwindigkeit in Höhe tauschen, bleiben wir hinter dem Gegner. Wir können außerdem enger kurven, weil die Fliehkräfte geringer sind; und zum Schluß verlieren wir bei radikalen Kurswechseln weniger Energie, wenn wir sie bei niedriger Geschwindigkeit ausführen – denn der Luftwiderstand ist abhängig von unserer Eigengeschwindigkeit. Alle diese Vorteile lassen sich durch einen kurzen Steigflug erreichen. In drei Dimensionen zu denken und zu fliegen, das ist der Schlüssel zum Erfolg.

Nun stellt sich die Frage, welcher Energiespeicher der bessere ist. Dies können wir uns an einem einfachen Experiment verdeutlichen: Wir beschleunigen zuerst in niedriger Höhe auf maximale Geschwindigkeit und dann zoomen wir bis zur Abhebegeschwindigkeit. Je nach Flugzeugtyp werden wir zwischen 1500 und 2500 Höhenmeter gewinnen. Wir können aber mit jedem Flugzeugtyp leicht über 3000 Meter und noch höher steigen. Ein Sturzflug aus dieser Höhe würde uns nach 2500 Metern Höhenverlust auf unsere Maximalgeschwindigkeit beschleunigen – und wir könnten trotzdem noch weiter stürzen.

Es ist also deutlich, daß die Flughöhe ein viel besserer Energiespeicher ist als die Eigengeschwindigkeit. An diesem Beispiel werden aber auch die Grenzen deutlich: Wenn wir in einer Bf 109 E4 mit einem Sturzflug auf 700 km/h beschleunigen und dann geradeaus weiterfliegen, wird

uns der Luftwiderstand auf unsere Maximalgeschwindigkeit bremsen. Die Differenz zwischen unserer Sturzgeschwindigkeit und der Maximalgeschwindigkeit ist also durch Reibungswiderstand verloren gegangen – und genauso hat sich unserer Energieniveau verringert.

5) Energie effizient einsetzen – 3 „E“s sichern den Sieg

Besonders wichtig ist die Frage, wie wir möglichst verlustfrei Höhe in Geschwindigkeit umwandeln und umgekehrt. Dies ist im Prinzip relativ leicht zu beantworten: Das Flugzeug sollte „entladen“ sein. Das heißt, die Flügel sollten keinen Auftrieb produzieren müssen, weil das Flugzeug in einer ballistischen Bahn steigt oder stürzt. Jeglicher Auftrieb, ob durch Tragflächengeometrie oder Anstellwinkel erzeugt, verursacht einen gewissen Widerstand, wodurch wir Energie in Form von Reibungswärme ausbluten. Problematisch ist nur, daß wir in unserer Simulation einen schwerelosen Zustand leider nicht fühlen können. Deshalb ist hier Erfahrung der Schlüssel. Ein guter Trick, um den entladenen Zustand am eigenen Flugzeug auszutesten, ist der „Rolltest“: Das Flugzeug rollt am besten, wenn die Flügel keinen Auftrieb produzieren. Wir können also unser ballistisches Fliegen trainieren, indem wir Sturzflüge üben und dabei mit kurzen Rollbewegungen unsere Rollrate testen – ist sie maximal, stürzen wir ballistisch, also im freien Fall. Dasselbe gilt für Zoom-Steigflüge. Wo wir schon beim Rollen sind – Rollbewegungen sollten wir nicht ausführen, während wir am Höhenruder ziehen. Das kostet viel Energie! Statt dessen sollten wir unsere Manöver so planen, daß wir die Richtungsänderung mit dem Querruder zwischen zwei Zügen am Höhenruder ausführen können. Wer auf diese Weise manövriert, blutet viel langsamer Energie aus als sein Gegner.

Bei all diesen Techniken sollten wir aber nie vergessen, wofür wir überhaupt die Energie aufbauen und sparen. Wenn sich die Möglichkeit bietet, sollten wir rigoros Energie gegen einen Positions- oder Winkelvorteil tauschen. Mit anderen Worten: Wenn wir direkt hinter dem Gegner eindrehen, oder durch einen harten Zug am Knüppel den richtigen Vorhalt bekommen können, MÜSSEN wir Energie verschleudern, damit der Kampf sofort endet. Entscheidend ist dabei aber:

Nur dann Energie opfern, wenn wir uns sicher sind, daß es sich lohnt.

Dies setzt viel Übung in den Luftkampfmanövern voraus, am besten in Zusammenarbeit mit anderen Piloten.

6) Energiezustände schätzen – den Feind nicht unterschätzen

Es ist wichtig zu wissen, ob ein Gegner mehr oder weniger Energie hat als man selbst, also ob er den Energievorteil besitzt oder im Nachteil ist. Vor einem Kampf kann man dies relativ gut an der Höhe abschätzen – wenn wir 2000 Meter über dem Gegner kreisen, hat er definitiv einen Energienachteil. Dagegen stellt bei Höhenunterschieden von weniger als 500 Metern die Eigengeschwindigkeit einen deutlichen Faktor dar. Die Geschwindigkeit eines anderen Flugzeugs zu schätzen, daß nicht auf unserem eigenen Kurs fliegt, ist aber ziemlich schwer. Besonders tückisch ist dies bei Flugzeugen, die sehr schnell fliegen können. Glücklicherweise sind solche Flugzeuge in diesem Spiel sehr leicht zu erkennen – nämlich die Düsen- und Raketenflugzeuge. Hier ist also doppelte Vorsicht geboten. Im Luftkampf sollten wir einschätzen können, ob der Gegner uns gegenüber Energie verliert oder gewinnt. Dies läßt sich nur schwer messen, aber eine gute Schätzmethode ist es zu beobachten, ob der Gegner aus Zoom-Steigflügen höher oder niedriger herauskommt als wir selbst.

Ein wichtiger Gedankengang zum Schluß: Energie verliert man normalerweise nicht in großen Stücken. Man blutet sie mehr oder weniger schnell aus. Aus verschiedenen Gründen stellt das einen Trend dar, der sich nur schwer umdrehen läßt. Wenn man also früh im Gefecht merkt, daß man gegenüber dem Gegner verliert, sollte man einen besonders guten Trick auf Lager haben – oder schlau genug sein und sich zurückziehen, solange man das noch kann.