



Flugdynamik

Flugmodell - Aerodynamik - FLCS

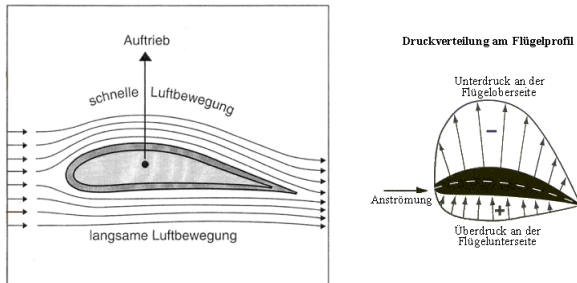
Take-Off - Cruise - Landing

Eine Einführung in die Grundzüge des Fliegens der F-16

BMS 4.32

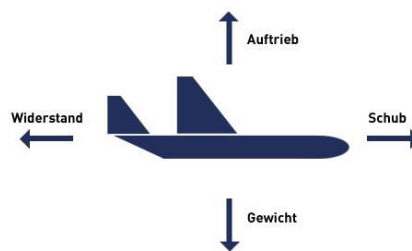
Flugmodell der F-16 - Aerodynamik

Die F-16 fliegt, weil sie wie jedes Flugzeug über die Tragflächen einen gewissen Auftrieb erzeugt. Luft strömt oberhalb der Tragflächen über einen weiteren Weg als unterhalb und so entsteht ein Unterdruck, der die Tragflächen und damit das ganze Flugzeug nach oben zieht.



http://www.hak-vk.at/uploads/pics/auftrieb_2.jpg <http://www.aviation4u.de/school/allgemein%20auftrieb%2002.gif>

Das funktioniert aber erst ab einer gewissen **Minimalgeschwindigkeit**, in der F-16 liegt die bei **ca. 170 -180 Knoten**. Dabei spreche ich nicht vom Landeanflug, sondern ohne Klappen bei Normalflug - dem Cruise. Das wiederum bedeutet, wir brauchen Schub, denn ohne Schub kein Auftrieb.



http://www.planet-schule.de/warum/fliegen/themenseiten/t4/images_content/7.jpg

Auftrieb erfolgt nur in eine Richtung nämlich nach oben in Bezug auf die Tragflächen. Das ist ein entscheidender Punkt. Blicken die Tragflächen 90° nach links, weil der Jet eine Rolle fliegt, zieht uns der Auftrieb in die Kurve! Daher sprechen wir auch von der Liftline des Jets. Entlang der Liftline ist unser Jet am wenigsten und wir bemühen uns immer diese Auftriebskraft gleichzeitig als Moment für die Drehung einzusetzen.

Tatsächlich ist es so, dass **Ruderausschläge am Leitwerk keine Richtungsänderung des Jets bewirken**. Sie bewirken nur ein Drehmoment und eine **Drehung um den Schwerpunkt**. **Das Flugzeug fliegt weiter seinen Kurs**. Erst wenn dadurch auch **Auftriebsänderungen** bewirkt werden, und zwar in Stärke und Richtung, wirkt sich das auf den Kurs und die Höhe aus. Das kann man auch in der F-16 ganz gut beobachten. Betätigt man das Seitenruder schwankt die F-16 entlang der Hochachse zur Seite. Lässt man es wieder los, fällt sie wieder zurück. Es ist keine Änderung der Auftriebskraft erfolgt. Stimmt nicht ganz, weil die Tragflächen leicht gepfeilt sind und dadurch Druckunterschiede entstehen, aber man erkennt das Prinzip. Deswegen **lenken wir auch nicht mit dem Seitenruder**, sondern indem wir unsere F-16 **über die Flügel kippen**. Damit **ziehen uns die Flügel über den Auftrieb nach links oder rechts**. Klarerweise ist die **Richtung des Auftriebs** jetzt nicht mehr nur **nach oben** gerichtet, und wir **verlieren Höhe**. Daher muss man auch **leicht am Stick nach hinten ziehen** während man eine Kurve fliegt, aber eben nur soviel, um den **Auftriebsverlust nach oben**

auszugleichen. Da man nicht zaubern kann, und Energie aus dem Nichts hervorbringt, geht das auf **Kosten den Schubs.** Also werden wir in so einer Kurve langsamer, oder müssen mehr Schub geben, um gleiche Geschwindigkeit zu halten.

Das war eine winzige **Basiseinführung zum Auftrieb und zur Kurve.** Ähnliches gilt für Steigen und Sinken. Durch Veränderungen am Höhenruder erzeuge ich in einer ersten Näherung nur geringfügig anderen Auftrieb am Höhenleitwerk selbst, aber aufgrund des **langen Hebelarms** zwischen Höhenleitwerk und Tragflächen werden doch massive **Veränderung des Drehmoments** sichtbar und spürbar. Das Flugzeug steigt oder sinkt.

Und jetzt etwas genauer: Das Höhenleitwerk übt natürlich auch eine Auftriebskraft aus, und wenn wir seine Position verändern (wir ziehen am Stick), dann verändern wir auch die Richtung des Auftriebs, wenn auch geringfügig. Daher kennt man in der Flugzeugsprache den sogenannten **Neutralpunkt (aerodynamic center).** **Das ist jener Punkt, wo die Summe aller Luftkräfte ein konstantes Drehmoment ausüben, egal bei welchem Anstellwinkel.** Würden wir das nicht so bedenken, müssten wir einen Druckpunkt definieren, der einmal vor und einmal hinter dem Schwerpunkt liegt. Dieser Druckpunkt wandert, je nach Lage des Höhenruders nach vor oder zurück. Das ist natürlich eine sehr einfache Näherung und beschreibt nicht die Realität. Deswegen der Neutralpunkt. **Also am Neutralpunkt ist das Drehmoment unabhängig vom Anstellwinkel.**

Das wiederum bedeutet (für den Geradeausflug):

- Der Schwerpunkt bewirkt kein Drehmoment (eh klar), der Auftrieb gleicht die Schwerkraft aus, übt aber gleichzeitig ein Drehmoment aus. Der Hebelarm ist der Abstand von Schwerpunkt zu Neutralpunkt!
- Am Neutralpunkt gibt es ein konstantes Drehmoment (unabhängig vom Anstellwinkel), das das Drehmoment von Auftrieb ganz oder teilweise kompensiert!

Und das ist der schlagende Punkt! Kann das Drehmoment am Neutralpunkt das Drehmoment der Auftriebskraft kompensieren? Es gibt zwei (und einen hypothetischen dritten) Fälle.

1. Das konstante Drehmoment kann nicht das Auftriebsdrehmoment ausgleichen, das heißt die Nase ist konstant am Runterziehen. **Der Schwerpunkt liegt vor dem Neutralpunkt.** Wenn die Nase nach unten zieht, ändert sich der Anstellwinkel und damit das Drehmoment des Auftriebs (das Drehmoment am Neutralpunkt ist ja gleich, egal welcher Anstellwinkel!). Dadurch dreht das Flugzeug wieder zurück. Man spricht von einer stabilen Fluglage!
2. Derselbe Fall, nur liegt der **Schwerpunkt hinter dem Neutralpunkt.** Es gibt kein selbstaufrichtendes Moment und man muss ständig gegen ein "Abstürzen" kämpfen. Man kann mit Ruderbewegungen gegensteuern - instabiler Flug.
3. Ein **theoretischer** dritter Fall lautet, dass das konstante Drehmoment für das Auftriebsdrehmoment überkompensiert. Das ist ident mit Fall 2, wenn auch aus anderer Überlegung heraus. Das ist aber zu instabil, und kann auch kaum mehr durch Höhenruderbewegungen ausgeglichen werden.

Stabilität bedeutet, dass das Flugzeug nach einer Störung, z.B. Windböe, Ruderbewegung von alleine wieder in die Ausgangslage zurückfindet. Je stabiler ein Flugzeug ist, desto reaktionsunfreudiger ist es auch. Logisch, denn wir müssen ja dann für Drehungen etc. erst einmal gegen die stabilisierende Kraft vorgehen.

Die F-16 ist, wie alle heutigen Kampfflugzeuge, ein instabiles Flugzeug. Tun wir nichts, stürzt sie ab. Dafür ist sie dreh- und reaktionsfreudig.

Nochmals: **Die F-16 ist ein instabiles Flugzeug.** Sie würde **ständig überkippen**, wenn man nichts dagegen tut. Deswegen haben wir das **Flight Control System FLCS**, das uns dabei hilft, die F-16 zu steuern. **Fällt das FLCS komplett aus, stürzen wir ab.** Wir **können nicht so schnell reagieren**, um die Instabilität der F-16 abzufangen. Das ist auch der **Hauptgrund für die EPU**. Fällt das Triebwerk aus, brauchen wir zumindest Strom, um - neben anderen Systemen - das FLCS bedienen zu können. Haben wir dafür keinen Strom mehr, **gleiten wir eben nicht, sondern stürzen ab**, da die F-16 im Gegensatz zu vielen Verkehrsfliegern **kein selbstaufrichtendes Moment** besitzt.

In der Betrachtung weggelassen wurde, dass diese Stabilitätsbetrachtung auch geschwindigkeits- und gewichtsabhängig ist. Klar, dass unterschiedliche Beladungen Schwerpunktsverlagerungen zur Folge haben. Und auch klar, dass je schneller wir fliegen, desto stabiler die Fluglage wird. Je schwerer die F-16, desto stabiler. Der Sprit ist ungleich in der Maschine verteilt.

In BMS wird der **Schwerpunkt exakt berechnet, und laufend neu berechnet**, je nach Ladung, Sprit, etc. Je **leerer die F-16 wird, desto mehr wandert der Schwerpunkt nach hinten** (vorderen Tanks werden leer), und dadurch werden wir (noch) instabiler. Wenn wir volle Tanks haben, reagiert die F-16 weniger stark auf Höhenveränderungen (ziehen am Stick). Jetzt wissen wir warum, denn so ist die F-16 ein wenig stabiler (wenngleich noch immer insgesamt instabil), und weniger drehfreudig als mit leereren Tanks.

Das FLCS ist so gebaut, dass es bei einem Schwerpunkt bei 35% des MAC (mean aerodynamic chord) gut gegen die Instabilität der F-16 arbeiten kann. Die genaue Berechnung ist irrelevant; chord steht für Profilschneide, und die gemittelte aerodynamische Profilschneide ist ein Maß, um unterschiedliche Flügelformen miteinander vergleichen zu können. Es gibt ein Maß für den Auftrieb. Viel wichtiger als die Zahl des MAC ist aber, dass **der Schwerpunkt meist in % des MAC angegeben** wird. Der Schwerpunkt verändert sich, wie oben erwähnt in Laufe des Fluges, und das **FLCS kann nur in einem gewissen Rahmen gegen die Instabilität der F-16 arbeiten**. Die Kunst liegt also darin, dass die F-16 so ausgelegt ist, dass ihr **Schwerpunkt kaum verändert wird**. Und das ist auch der Fall. Die Tanks und auch die Reihenfolge ihrer Entleerung, sowie die Pylonenposition wurde so geplant, dass sie sich möglichst gering auf den Schwerpunkt ausüben.

Das exakte Flugmodell der F-16, wie es in BMS umgesetzt wurde, basiert auf Studien der NASA (NASA Technical Paper 1538). Diese Studien decken Flug komplett ab, aber nicht Starts und Landungen. Ergänzt wurde es daher durch Originalhandbuchangaben. Es werden wichtige Werte, wie z.B. der Schwerpunkt, laufend neu berechnet und umgesetzt. Wettereffekte werden auch miteinbezogen. Das Flugmodell, wie es sich uns in BMS präsentiert, ist "as good as it gets". Nämlich fast 100% exakt.

Um einen Eindruck zu geben, wie viele **real-time** Parameter einfließen, eine Zusammenfassung:

Ein **Mechanikmodul** berechnet das Gesamtgewicht, sowie den Schwerpunkt laufend neu, sowie zwei- bis dreidimensionale Kräfte (Torsion), die sich daraus ergeben. Eine **Aerodynamikmodul** berechnet die Kräfte (und auch Torsionen), die sich durch die Luftströmungen an den unterschiedlichen Teilen der F-16 ergeben. Eine **Triebwerksmodul** behandelt alle Kräfte des Triebwerks. Am Boden sorgt ein **Bodenmodul** für die Berechnung der Kräfte zwischen Reifen, Boden, Fahrwerksstruktur, aber auch bei direkten Kontakt (schleifen entlang der Runway). Ein **komplett zu 100% zum realen FLCs identen Modul** setzt die Pilotensteuerung um. Und zum Schluss führen die **Bewegungsgleichungen** (13 Stück) zum Zusammensetzen des ganzen.

Nichtlinear gekoppelt sind 6 Gleichungen des starren Körpers, 3 Gleichungen zum Schwerpunkt sowie 4 Quaternionen-Gleichungen für die Lage gelöst in 4 Iterationen nach Runge Kutta RK4 **ohne Näherungsverfahren** (für die Mathematiker unter uns).

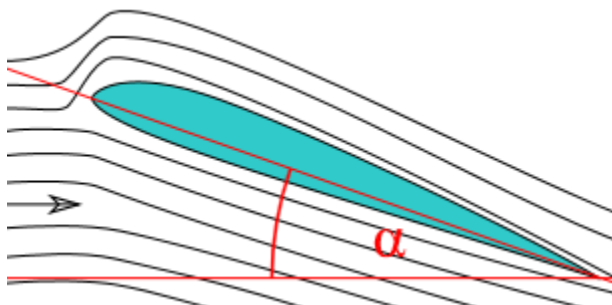
Dabei fließen ein: Ausgangsstandort, Ausgangsgeschwindigkeit, Ausgangslage, Ausgangsdrehraten, Kräfte und Torsionen vom Triebwerk, der Luft und falls anwendbar des Bodens sowie die mechanischen Daten zum Schwerpunkt.

Ausgerechnet werden: neue Position, neue Geschwindigkeiten und Drehraten, neue Lage.

Daraus werden berechnet: Angle of Attack α , Side Slip Angle β , Geschwindigkeitsvektor, Änderungsraten von AOA und SSA.

Ich finde das immens beeindruckend und genial!

Zum Abschluss müssen wir uns noch über den **Flugpfadmarker** und den **AoA** unterhalten, denn das ist die Basis für das tägliche Fliegen und erst das Wissen darüber macht das Reden übers Fliegen möglich.



Der **AoA oder Angle of Attack** beschreibt die **Differenz als Winkel zwischen den Richtungen wohin der Flügel zeigt und wohin er sich bewegt**. Im Basic T findet sich eine Anzeige für den AoA, links vom HUD gibt es einen AoA Indexer für Landungen, und nicht zuletzt im HUD selber gibt es den Flugpfadmarker.

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6d/Angle_of_attack.svg

Der Flugpfadmarker FPM zeigt an, wohin sich die F-16 hinbewegt. Die Nase der F-16 zeigt meist deutlich weiter nach oben, als wo wir tatsächlich hinfliegen. Das liegt zu einen daran, dass die Flügel natürlich einen gewissen Auftrieb erzeugen müssen, damit wir überhaupt fliegen. Je langsamer wir fliegen und schneller steigen, desto höher wird der AoA, weil wir immer mehr "statischen" Auftrieb

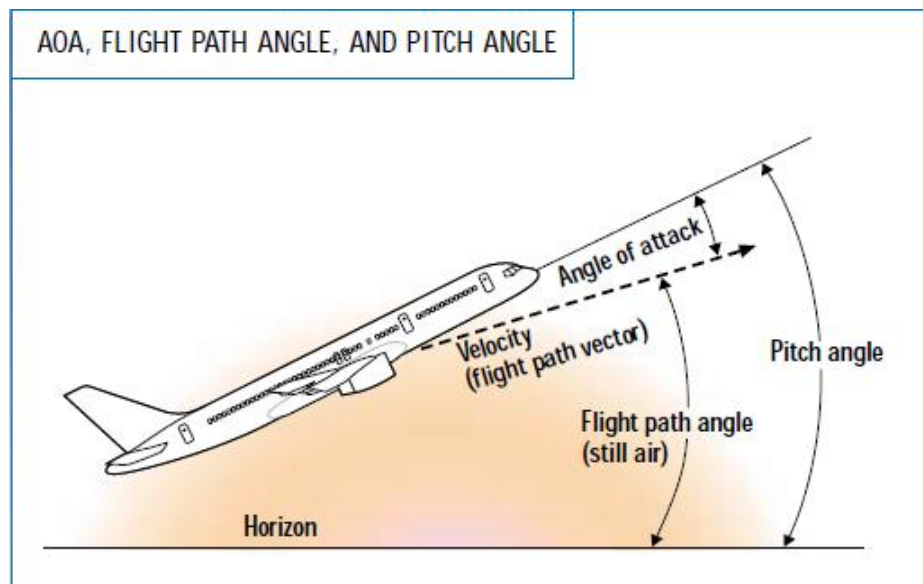
erzeugen müssen. Irgendwann geht das nicht mehr gut, und der AoA wird zu hoch. Dagegen kämpft das FLCS. Es unterstützt nicht nur, die Instabilität der F-16 zu kontrollieren, sondern setzt die Stickbewegungen so um, dass die die F-16 möglichst lange kontrollieren können, und keine unkontrollierten Situationen erreichen (sogenannte Departures). Der FPM berücksichtigt aber auch Windeffekte und sonstige Störungen! Ähnlich zum AoA gibt es einen Side Slip Angle, der dasselbe wie der AoA ist, nur statt für Höhenänderungen für Queränderungen. Wir werden uns hier nicht damit beschäftigen. Der FPM bezieht auch das mit ein. **Der FPM zeigt an, wohin die F-16 tatsächlich fliegt.** Wer den FPM auf ein Ziel hält, kracht genau an dem Punkt irgendwann hinein.

So und jetzt kommt es dick:

- Der Flugpfadwinkel (flight path angle) ist der Winkel zwischen Flugpfadvektor und Horizont.
- Der Höhenwinkel (Pitch Angle) ist die Attitude, der Winkel zwischen dem Punkt, wo die Nase der F-16 hinzeigt, und dem Horizont.
- Der AoA ist die Differenz zwischen Pitch und Flight Path Angle.

Nochmal:

- Pitch zeigt, wo die Nase hinzeigt.
- Pitch Angle ist zwischen Pitch und Horizont.
- Flugpfad - wohin wir fliegen.
- Flightpath Angle ist zwischen dem Horizont und dem Flugpfad.
- AoA ist zwischen Pitch und Flightpath Angle.



http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/aero_12/whatisaoa.pdf

Der Pitch Angle wird uns am ADI, dem künstlichen Horizont angezeigt und am Gun Cross. Der FPM zeigt uns dem Flight Path Angle an, und die Differenz ist der AoA.

Der Zusammenhang ist wichtig. Denn, wenn unser **Schub nicht ausreicht**, um die **Fluggeschwindigkeit aufrecht zu erhalten, können wir auch die Attitude nicht halten**. Um auf **Höhe zu bleiben** und nicht zu sinken, **halten wir den FPM auf der Nulllinie**. Das **Gun Cross** wird **höher steigen**, d.h. der **AoA wird größer und die vertikale Geschwindigkeit wird sinken**.

Beschleunigen wir im Horizontalflug, wandert der FPM nach oben, weil der AoA kleiner wird - wir steigen. Erst, wenn wir den FPM an der Nulllinie halten, dann werden wir schneller, und die Nase sinkt ein wenig, der AoA ist deshalb nicht anders!

Anders ausgedrückt, unser Triebwerk muss genügend Schub erzeugen. Den brauchen wir für beides, Auftrieb und Vertikalgeschwindigkeit. Diese beiden Größen beeinflussen einander aber (leider) auch.

Da jetzt die Grundbegriffe abgeklärt sind, schauen wir, wie unsere Steuerungsbefehle durch das FLCs umgesetzt werden, und beschäftigen uns dann mit **Cruise, Take-Off and Landing**.

FLCS - Flight Control System

Das FLCS sorgt gerne für Verwirrung. Es ist dafür verantwortlich, dass die Steuerbefehle eben nicht 1:1 an die F-16 weitergegeben werden. In einer Cessna zieht man am Horn, und die Höhenruder schlagen aus. Zieht man voll, schlagen sie voll aus, zieht man halb, schlagen sie halb aus - und nur die Höhenruder.

In einer F-16 nicht. Jeder Steuerbefehl wird analysiert (was wurde bewegt), die Ist- Situation analysiert (welche Lage hat die F-16) und dementsprechend nach mehreren Schemata Befehle ausgegeben.

Dabei werden oft alle Ruder angesprochen, auch wenn wir "nur" am Stick nach hinten ziehen. Manchmal wird sogar gar nicht das Höhenruder betätigt, auch wenn wir nach hinten ziehen. Zudem werden automatisch die Klappen (vorne und hinten am Flügel) bedient.

Die Umsetzung in BMS entspricht zu 100% dem realen FLCS!

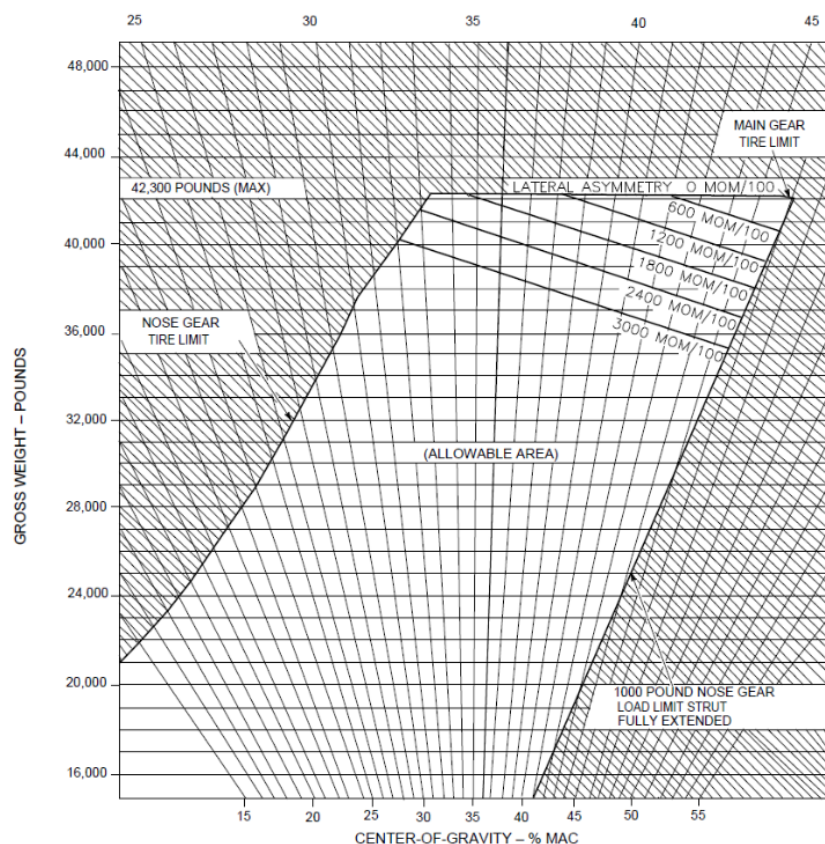
Erinnern wir uns: Die F-16 ist ein instabiles Flugzeug, d.h. selbst wenn wir nichts tun, droht sie abzustürzen, und nur durch ständiges Eingreifen vom FLCS verhindern wir das. Oben drauf setzt das FLCS unsere Steuerbefehle um.

Die Graphik rechts zeigt, in welchen Limits das FLCS arbeiten kann. Ohne genau zu wissen, was es heißt, sehen wir schon einmal die Assymetrie und dass die F-16 mithilfe des FLCS doch in vielen Bereichen "stabil" geflogen werden kann.

Des weiteren versucht das FLCS, quasi aus Eigenschutz innerhalb dieses Limits zu bleiben.

CENTER-OF-GRAVITY LIMITS - TAXI, TAKEOFF AND LANDING (Includes Lateral Asymmetry Limits)

MAXIMUM GROSS WEIGHT - 42,300 POUNDS



NOTE: 1000-POUND NOSE GEAR LOAD LIMIT APPLIES FOR 5 MPH OR LESS AIRCRAFT GROUND SPEED.
FOR MORE THAN 5 MPH GROUND SPEED, THE CENTER-OF-GRAVITY LIMITS IN-FLIGHT ARE APPLICABLE.

<http://www.benchmarksim.org/forum/attachment.php?attachmentid=2643&d=1281036055>

Das FLCS gleicht also die Instabilität der F-16 aus, und setzt unsere Steuerbefehle so um, dass die F-16 den gewünschten Effekt bei maximaler "Stabilität" erzielt.

Um einige Effekte zu beschreiben nachfolgende Übersicht - herausgearbeitet aus den Originalunterlagen von **Mav-JP**.

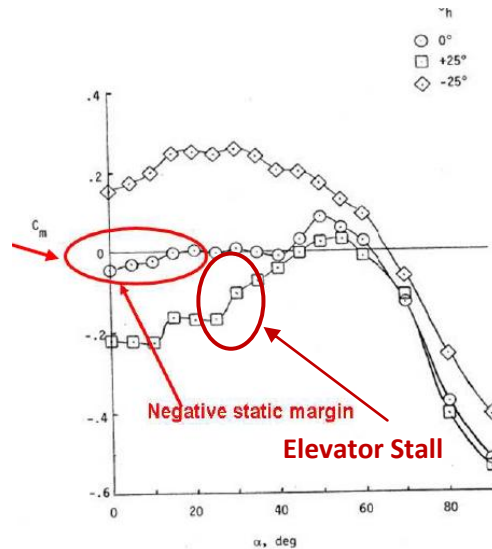


Figure 1: Pitch Momentum (C_m) vs AOA at low speed: static margin

- ganz links haben wir den Fall, dass die F-16 instabil ist. Gut, das wissen wir schon. Die Folge ist, dass das FLCS immer dagegen arbeitet, auch wenn wir keine Eingabe machen.
- Bei 25° AoA hat das Höhenruder bei vollem Ausschlag einen lokalen AoA von 50° (!), und damit fast keine Wirkung mehr. -> vermeiden.
- AoA > 60° bedeutet immer Stall -> vermeiden
- nicht gezeigt: Wenn man seitlich versetzt wird (z.B. durch Böen), so hat man ab 25° AoA fast keine Chance mehr zurückzukommen

Alles zusammengefasst, versucht das FLCS immer maximal 25° AoA einzuhalten. Das macht u.a. das CAT System.

Das sind nur Anfangsüberlegungen der FLCS Programmierung. Das ganze ist hier nachzulesen <http://www.benchmarksim.org/forum/content.php?45-documentation>.

Besprechen wir kurz die Auswirkungen des FLCS - was bemerken wir beim Flug:

Das FLCS arbeitet in **drei Modulen**

- **Stand-by Gains**
- **Landing Gear Gains**
- **Cruise gains (normale Operation)**

Je nachdem, welche Bedingungen gelten, z.B. Gear Down, greift der andere oder andere Modus.

Cruise Gains

- **Pitchbewegungen** werden immer als **G-Input** verstanden. Beim Ziehen am Stick "will man soundsoviel Gs". Man kann zwischen **-3G und +9G** vom System verlangen. (1G liegen immer an.)
- Ein **negative G Limiter** kann die negativen G bis auf -1G begrenzen. Im HUD steht dann 0G.
- **Angle of attack / normal-acceleration limiting system (CAT limiter). Der CAT Limiter ist kein G-Limiter.** Das kann man gar nicht laut genug sagen. Das **AoA Limit liegt bei 15.5 bis 15.8°**. Bis dahin kann das Flugzeug auch 9G Kurven ziehen! Aber ab 15.8° AoA wird der AoA dort begrenzt und das schränkt die Gs automatisch mit ein. Das erklärt aber auch, warum man trotz CAT III hohe Gs ziehen kann. Wieviele Gs genau gezogen werden können, hängt natürlich vom Gewicht ab. Bei 30000lbs, Mach 0.8, 15.5° AoA bis zu 8.3g! Ist man schwerer, kann man weniger ziehen, leichter mehr. Klar!

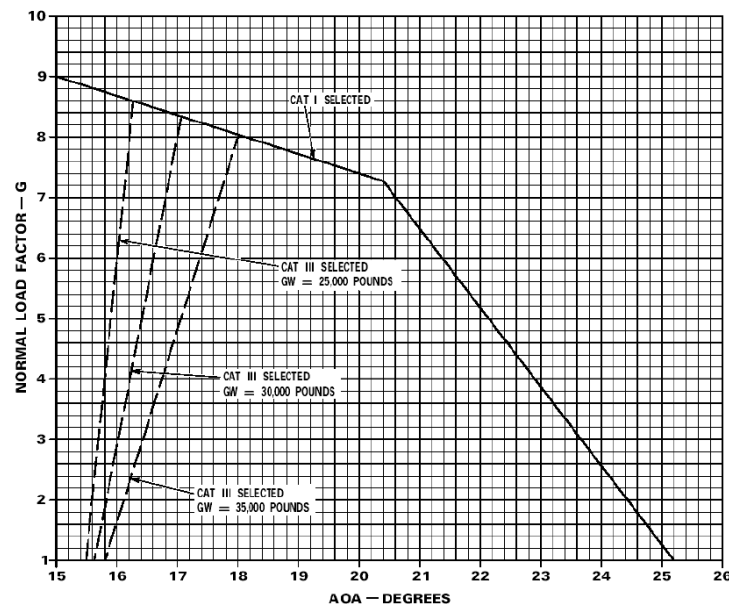


Figure 10: CAT1 & CAT3 limiter (from Dash 1)

- Das FLCS versucht **immer 1G zu halten**, wenn der Pilot keine Steuereingabe tätigt. 1G unter Berücksichtigung der Schwerkraft, die sogenannte normalisierte Beschleunigung. Fliegt man genau 90° nach oben, hat man daher 0G!
- Die **Rollrate ist max. limitiert auf 80°/sec**. Mehr geht nicht!
- Das **Seitenruder wird automatisch bedient** in Kurven, um Stabilität zu gewährleisten. Sollte im Flug überhaupt nicht bedient werden!
- Ein **Stability Augmentation System (SAS)** ist verbaut, um korrelative Bewegungen von Rollen und Gieren einzuschränken.
- Unter -5° AoA und 170kn wird ein anti-spin Befehl vom FLCS ausgegeben.
- Der **MPO Switch (Manual Pitch Override)**, der ausschließlich beim Strömungsabriss verwendet werden soll, schaltet das FLCS keineswegs aus! Ohne FLCS ist die F-16 nicht flugfähig. Damit wird der **negative G-Limiter ausgeschaltet** (siehe oben), damit man die Maschine wieder "aufschaukeln" kann, was sonst durch das normale Verhalten des FLCS gedämpft werden würde. Damit kann man **mehr negative Gs ziehen**.

Landing Gear Gains

- **Schaltet** sich ein, wenn der **Landing Gear Hebel in der "Down" Position** ist, oder wenn der **ALT FLAPS** Schalter in **"Extend"** gesetzt ist bei einer **Geschwindigkeit <400Knoten** oder die **Air-Refuel Door offen** ist (unter 400 Knoten).
- **Hier wird nicht mehr 1G gehalten, sondern der Pitch konstant gehalten.** Das wird uns bei der Landung noch beschäftigen.
- Das bedeutet, dass die Nase konstant gehalten wird (Pitch Angle!!!) und der FPM wandert, je nach AoA! Das gilt bis 10° AoA.
- Darüber gilt der **blended submode**, ein Mischmodus. Hier wird der AoA Moment dafür genutzt, die **Nase hinunter zu drücken**. Das heißt, beim Landen mit einem AoA >10° muss man konstant den Stick nach hinten ziehen, um konstanten Pitch zu halten.
- Die Rollraten sind etwa auf die Hälfte vom Cruise Gain limitiert.

Standby Gains

- **Ist nicht wirklich implementiert.**
- **Schaltet sich ein**, wenn die anderen Modi nicht anwählbar sind - also **wenn ein FLCS Fehler vorliegt**.
- **FLCS Reset** kann **manchmal den Fehler beheben**.
- Funktioniert wie der Cruise Gain, gibt standardisierte Werte der Steuerung ab, als ob die F-16 bei ca. 600 Knoten (gear up) oder 230 Knoten (gear down) geflogen wird.

Die Klappen der F-16

- Werden **vollautomatisch kontrolliert**.
- **Trailing Edge Flaps** sind 20° unten, wenn die Geschwindigkeit <240 Knoten, darüber ziehen sie sich kontinuierlich zurück, bei 370 Knoten sind sie vollständig eingezogen. Das gilt nur wenn der Fahrwerkshebel unten ist, oder ALT FLAP auf EXTEND gesetzt sind.
- Die **Leading Edge Flaps** sind 2° oben bei Supersonic Speed.

Kompensation für die Bordkanone

- Das FLCS kompensiert automatisch für die Benützung der Gun, die Gasausstöße und den Rückstoß.

Asymmetrie im Rollen

Leider hat die F-16 und das FLCS **keine Möglichkeit, einer Asymmetrie an der Rollachse entgegenzuwirken**. Sprich, wirft man eine Bombe auf einer Seite ab, zieht es einen auf die gegenüberliegende Seite hinunter. Daher darf man das auch nicht bei schweren Dingen...

Wie trimmt man richtig?

- Man befiehlt **OG** im Flug durch nach vor Drücken des Sticks. Erst dann wird das Rollen aufhören!
- Jetzt trimmt man und lässt den Stick los. Rollt man weiter, muss nachkorrigiert werden.
- **Trimmung ist G- abhängig**, denn die **Asymmetrie entsteht nicht durch mehr Gewicht an einer Seite** (dann würde das Rollen ja aufhören, wenn diese Seite am nach unten schaut, also am tiefsten Punkt angelangt ist), sondern durch die **ungleiche Massenverteilung**. Das Objekt, die F-16, wird immer weiter um ihren Massenschwerpunkt rotieren bis Trimmung hergestellt ist. **Höhere G-Werte multiplizieren Massen** und deswegen muss man bei mehr Gs entsprechen nachtrimmen oder ein Rollmoment erwarten.

Zusammenfassung (BMS Dash 1 von RedDog)

	PITCH	ROLL	YAW
CAT I	• Maximum AoA = 25° • Bis 15° AoA g-command • Kombiniertes G & AoA Command ab 15° AoA	Max Rollrate nimmt ab, wenn • AoA >15° • Speed < 250 Knoten • Ruderausschlag >20° • Klappenstellung	Max Gierrate nimmt ab: • AoA >14° (ohne Rollrate) • Rollrate >20°/sec • bei 26° AoA hat man keine Seitenruderkontrolle mehr
CAT III	• Max AoA 16-18° • G command bis 7° AoA (100 Knoten) bis 15° (420 Knoten oder höher) • Kombiniertes G & AoA Command darüber	Liegt bei etwa 40% von CATI. Nimmt weiter ab mit AoA, airspeed, Ruder- und Klappenstellung	Max Gierrate nimmt ab: • AoA >3° (ohne Rollrate) • Rollrate >20°/sec • bei 15° AoA hat man keine Seitenruderkontrolle mehr

In Kürze die Würze:

- In Cruise Gains hält das FLCS ohne Steuereingaben 1G.
- In LG Gains (beim Landen) hält das FLCS die Nase konstant (Pitch) bis AoA 10°. **FPM wandert gleichzeitig mit AoA!**
- Darüber (ab 11° AoA) wird auch der AoA verändert -> Stick muss konstant leicht zurückgezogen werden, um Nase oben zu halten.
- CATI/ III kontrolliert die Rollrate, nicht die G-Last. Dass die G-Last auch begrenzt wird, ist eine Konsequenz aus Rollratenlimitierung und Gewicht.
- MPO schaltet das FLCS nicht aus, sondern nur den negativen G-Limiter.
- Ohne FLCS kann die F-16 überhaupt nicht geflogen werden.

Take-Off

Zum Starten muss nicht viel aus flugdynamischer Sicht gesagt werden. Der **häufigste Fehler** besteht darin, **zu früh** und/ oder **zu stark** nach hinten zu ziehen.

Der Zeitpunkt für die Rotation (das nach hinten ziehen aka Hochziehen) hängt stark vom Gewicht ab. Bei einer leeren F-16 ist das bei 160 Knoten. Realistisch sind Werte bei **180 Knoten**, manchmal bei 200 Knoten.

Standard ist mit Nachbrenner zu starten. Dies ist eine **Sicherheitsmaßnahme**. Dies ist aufgrund der kurzen Startbahnen entstanden. In BMS sind alle Startbahnen lange genug. Theoretisch kann man genauso ohne Nachbrenner starten. **Staffelprozeduren schreiben dennoch ein Starten mit Nachbrenner vor.**

Standardprozedur:

"Stand-by Breaks! Run up Engine 90%! Release Breaks in 3-2-1-Go! Gate in 3-2-1-Go!"

Da in BMS **realistische Bremswerte** eingearbeitet sind, sollte **nicht zu lange das Triebwerk hochlaufen, während man die Bremse betätigt**. Ab ca. **60 Knoten** hat das Seitenruder genug Kraft, um allenfalls notwendige Korrekturen beim Starten auszugleichen, daher muss die **Bugradsteuerung abgeschaltet** werden.

Erreicht man ca. die **180 Knoten zieht man gemütlich am Stick nach hinten** und hält den **Pitch bei 15°**, d.h. das **Gun Cross sollte bei +15°** stehen. Man beobachtet, wie der **FPM langsam nach oben zieht**. Hat man **positive Steigraten** erreicht, **fährt man das Fahrwerk ein** und nimmt **Standardsteigraten von meist 5° ein**, das heißt der **FPM** sollte dort stehen.

Aus **FLCS Sicht wechselt** man beim Fahrwerkeinfahren vom **LG in den Cruise Gain**. Das bedeutet, man kann schneller fliegen und hat auch weniger Auftrieb, weil die hinteren Klappen eingefahren werden. Wenn man beim **Starten noch konstanten Pitch** geflogen ist, wird nun die **G Kraft auf 1G gehalten**. Gibt man keinen Input, wird 1G gehalten - normalisierte Beschleunigung. Wer auf so etwas beim Starten achtet, wird den Übergang deutlich merken.

Zu früh oder zu stark ziehen bewirkt meist, dass der **AoA zu stark ansteigt** (Nase hoch, FPM noch unten). Dadurch kann es einerseits zum **Absturz kommen durch Strömungsabriss**, andererseits können **mechanische Beschädigungen** auftreten, weil Blechteile der F-16 am Boden kratzen. Beides ist selbstverständlich simuliert und wird mit einem **Feuerball** bedankt.

Cruise

Wie angemerkt, versucht das FLCS den Piloten dahingehend zu unterstützen, dass immer wieder 1G eingenommen werden. Die Folge ist, dass man konstant am Stick ziehen und drücken muss, wenn man seine Lage verändern will.

Dies ist beispielsweise beim A320 nicht so. Dort gilt immer das konstante Pitch Regime. Stellt man 30° Querneigung und 5° Pitch ein, wird das konstant gehalten. So kann exakt geflogen werden. Aber das sind ja auch stabile Flugzeuge. Die F-16 ist instabil.

Beim Geradeausflug muss man nicht viel sagen. Mit **gut eingestelltem Stick lässt man einfach die Hand los, und die F-16 fliegt geradeaus, steigt nicht und sinkt nicht**. Die Entwickler betonen immer wieder, dass (bei gutem Stick und Force Sensing) nur **lineare Stickprofile** angewendet werden sollten, da ja das FLCS 100% korrekt umgesetzt ist, und daher sowieso schon nichtlineare Korrekturen durchführt werden, um die F-16 zu stabilisieren.

In Kurven wiederum heißt das, der **Pilot ist für Rollen und Steigen verantwortlich**. Kippt man über den Flügel in die Kurve, lässt die **Auftriebskraft nach oben nach und zieht uns zur Seite**. Dadurch muss man **leicht nach hinten ziehen, um konstante Höhe zu halten** - auf **Kosten des Schubs**. Dies wird im Dogfight zum Extremen getrieben, wo wir nach der Drehrate suchen, die uns bei konstanter Geschwindigkeit in der engsten Kurve hält. Dies ist bei 350-440 Knoten der Fall - **corner speed**. Da können wir mit Nachbrenner konstant ca. 6G ziehen! Das brauchen wir natürlich nicht im Cruise!

Für Kurven gelten immer noch **Standardwerte mit 30° oder 45° Querneigung** abzulesen am HUD oder am ADI. Dies sollte ernst genommen werden, denn nur so kann man in **Formation Kurven fliegen**. Achtet der Lead nicht darauf, geht die Formation verloren. Und doch: Vor lauter Querneigung sollte man nicht vergessen, den FPM auf der gewünschten Steigrate zu halten. Tut man da nichts, sinkt die F-16.

Will man Kunststücke wie die Barrel Roll durchführen, muss man das Verhalten des FLCS mit dem Auftrieb in Kombination sehen. Dreht man nur am Stick, bis die Maschine wieder nach oben zeigt, hat man viel Höhe verloren. Während der Rolle muss man folglich negative Gs ausüben, um Höhe zu halten. Vorsicht ist geboten, denn das treibt die F-16 an ihre Grenzen, vor allem in großer Höhe bei niederen Geschwindigkeiten.

Ein aufmerksames Beobachten und feinfühliges Steuern lässt ein viel besser kontrolliertes Fliegen zu. **Wenn man brutal am Stick reißen muss/ will, hat man schon zuvor falsch gehandelt.**

Kommt man (un) absichtlich in einen Strömungsabriss, dann hoffentlich mit der Nase nach unten. Das FLCS versucht, immer die Nase nach unten zu bekommen - erinnern wir uns: Die Physik ohne FLCS würde eigentlich das Heck nach unten ziehen - katastrophal. Wenn die Nase nach unten zeigt, versucht das FLCS die Maschine hochzuziehen. Das gelingt nur nicht, weil die negativen Gs limitiert sind. Daher muss man den **Manual Pitch Override Switch** betätigen. Die negativen G werden zugelassen und man schaukelt mit den Bewegungen der F-16 die Maschine auf, bis sie wieder kontrollierbar wird - dann kann man den MPO Switch wieder ausschalten.

Nochmals zur Erinnerung: Das **CAT System limitiert nicht die Gs, sondern nur die Rollrate**. Das **wirkt sich natürlich auf die Gs aus**, vor allem im Zusammenhang mit dem Gewicht. Bei einem **FLCS Fehler** sollte zunächst versucht werden, ein **Reset** durchzuführen.

Landing

Landen ist wohl das haarigste Kapitel. Wie soll man eine **instabile Maschine** landen, die noch dazu ziemlich bockig reagiert? Es gibt ausreichende Tutorials zu dem Thema, also beschränken wir uns darauf, was aus Sicht des FLCS Sinn macht.

Wir gehen davon aus, dass wir uns **richtig am Final** befinden. Das sollte auf einem **Gleitpfad von ca. 3° passieren** - das heißt, die Landebahnschwelle sollte bei -3° der Pitchladder zu liegen kommen. Das ist **unabhängig von der Fluggeschwindigkeit**, sondern sorgt nur dafür, dass man **nicht zu flach oder zu steil** auf die Landebahn auftrifft.

Wiederum **komplett unabhängig davon** sollte ein **AoA von 13°** eingenommen werden. Hier ist zu beachten, dass das **FLCS anders als im Cruise operiert**. Ist das Fahrwerk einmal ausgefahren, dann sieht man eine **Klammer im HUD**. Platziert man den **FPM darin**, stimmen die 11-15° (11° ganz oben, 15° ganz unten) - das wird auch durch einen **leuchtenden grünen Kreis links vom HUD am Indexer** bestätigt.

Denkt man an die Funktionsweise des FLCS, so sieht man folgenden Unterschied:

- Fliegt man mit **10/11° AoA**, so hat man **100% Pitch Control**. Die **Nase bleibt gleich**, **Veränderungen der Geschwindigkeit lassen den FPM wandern (!)**, und damit **im gleichen Ausmaß auch den AoA**.
- Hat man **mehr als die 11° AoA erreicht**, wird der Pitch und der AoA dahingehend kontrolliert, dass die **Nase ein wenig nach unten gezogen** wird bis wiederum ein AoA von 11° erreicht ist. Will man also die *handbuchverordneten* 13° AoA fliegen, dann muss man **konstant am Stick leicht nach hinten ziehen**.

Was man jetzt **bevorzugt, bleibt Geschmackssache**. Oft sieht man HUD-Aufnahmen von F-16 Piloten, die den **FPM ganz oben an der Klammer** halten. Ich persönlich finde das auch angenehmer. Dann hat man Pitch Control und stellt den Schub ein und setzt den FPM auf die Landebahnschwelle.

Nochmals gesagt: Dadurch, dass das FLCS ab Gear Down nicht mehr die G kontrolliert, sondern den Pitch dort hält, wo man ihn hinsetzt, **kontrolliert man die Landung ganz anders als früher in AF**. **Beispiel?** Wir gehen auf Final, haben 3° Glideslope und müssen nur mehr die AoA anpassen. Früher kontrollierte man mit dem Stick, wo der FPM war, und mit dem Throttle den AoA. Jetzt stimmt das nicht mehr ganz. Ist der AoA bei z.B. 7°, und soll auf 11° erhöht werden, so geht man vom Schub runter. Aber während früher einfach nur die Klammer nach oben gegangen wäre (AoA erhöht, aber auch Pitch erhöht), aber der FPM sitzen geblieben wäre, tut er das nun nicht mehr. Das FLCS hält **konstanten Pitch**. Reduziert man Schub, muss man am Stick ziehen, um die Nase hoch zu nehmen, sonst sinkt der FPM. Sinkender FPM bei gleichem Pitch ist höherer AoA. FLCS hält Pitch konstant - daher muss der FPM sinken, wenn der AoA zunimmt. **Das war eben in AF anders! Bricht** man nun **durch diese 11° Grenze**, wird es ein wenig anders, da **gleichzeitig mit Pitch** auch auf den **AoA Einfluss** genommen wird - **die Nase wird leicht nach unten gezogen**. Hier müsste man **für konstanten AoA** den **Stick ganz leicht nach hinten ziehen**.

Wie auch immer man vorgeht, wenn man es richtig macht, nimmt man **automatisch die richtige Geschwindigkeit** ein. Sie liegt zwischen **140 und 160 Knoten** - je nach Gewicht. Etwa 50-70 Fuß vor dem Aufsetzen sollte man den Schub komplett reduzieren, und den Pitch bei 10-12° halten (**Flare**).

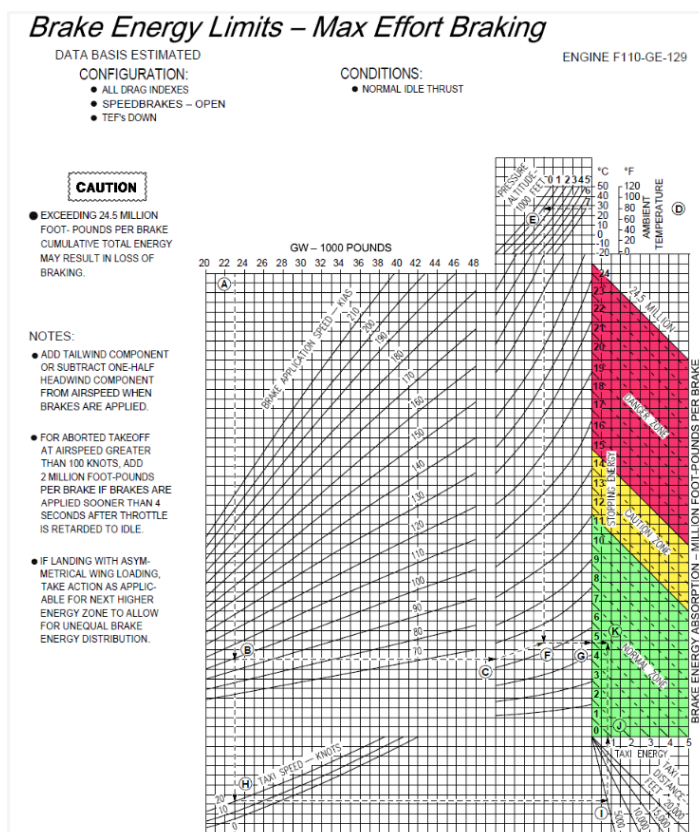
Dann blutet die F-16 aus, und man setzt (3° Gleitpfad vorausgesetzt) sanft und ohne Springen bei 125-135 Knoten auf. Jetzt keinesfalls ein Springen oder bockiges Reagieren der F-16 gegensteuern. Das schaukelt nur auf! Einfach Finger weg vom Stick.

Man hält die Nase oben (!) und lässt die Geschwindigkeit auf ca. 90 Knoten fallen. Ob man erst beim Aufsetzen oder vorher die Bremsklappen ausfährt, bleibt jedem überlassen. Einfacher ist es vorher, weil a) Schubänderungen direkter wirksam werden und b) man schneller abbremst nach dem Aufsetzen. Jedenfalls kann man nach dem Aufsetzen die Bremsklappen noch ein Stück weiter ausfahren - um Schäden beim Aufsetzen zu verhindern, werden die unteren Bremsklappen in der Luft nicht ganz ausgefahren, wenn das Fahrwerk unten ist.

Dann nimmt man sanft die Nase herunter, und bremst mit den Pedalen. Während man bremst, hat das Seitenruder keine Wirkung. Will man die Ausrichtung korrigieren, hört man auf zu bremsen, lenkt, und bremst dann weiter. Erst wenn man die Bugradsteuerung aktiviert hat (bei 60 Knoten), kann man bremsen und lenken.

Noch ein Wort zur Bremse und den Reifen:

Der Kontakt zwischen Reifen und Boden ist auch durchgerechnet und simuliert. In Folge dessen kommt es zu Reifenplatzen wegen zu hohen Belastungen, auch Hitzewirkung wird simuliert, Hydraulikfehler und auch -überbelastung bis hin zum Versagen des kompletten Fahrgestells.



Es braucht zwischen 5 und 9 Minuten (die genaue Zeit ist zufällig), bis die Energie/ Hitze nach dem Bremsen aufgebaut ist - dann kann je nach Bereich ein Fehler vorkommen.

Grüne Zone: Nichts passiert

Gelbe Zone: 30% Chance

Rote Zone: 90% Chance

Weißer Zone darüber: Sofortiger Fehler!

Am besten kurz bremsen, und mit wenig Schub rollen. So wenig wie möglich bremsen während Taxiing.

Beim Landen so spät wie möglich bremsen, nutzt die F-16 selbst als Bremse, sowie Bremsklappen. Einige Modelle der F-16 haben auch

Bremsfallschirme, die sehr rasch abbremsen.

Nochmal in aller Deutlichkeit: Aufgrund des korrekten FLCs sind frühere Landetutorials hinfällig. Es muss schon ein BMS Tutorial sein!