

“AUTOMATIC LOW SPEED RECOVERY” – LANGSAMFLUGSCHUTZ FÜR DEN EUROFIGHTER: VOM REGLERENTWURF ZUM FLUGTEST

Dr.-Ing. M. Hanel
EADS Deutschland GmbH
Military Air Systems
81663 München

1	ÜBERSICHT	1
2	ENTWURFSKONZEPT.....	1
	2.1 FLUGMECHANISCHE EIGENSCHAFTEN DES EUROFIGHTER EF2000 IM LANGSAMFLUG	1
	2.2 AUFBAU DES LANGSAMFLUGSCHUTZES.....	3
	2.3 MANÖVERTYPEN.....	3
	2.4 AUSLÖSEN DER LANGSAMFLUGWARNUNG.....	3
	2.5 STEUERÜBERNAHME DURCH DIE ALSR - FUNKTION	4
	2.6 ROBUSTHEIT GEGEN ATMOSPHERISCHE STÖRUNGEN UND FEHLERFÄLLE – STRATEGIEWECHSEL	5
3	FLUGERPROBUNG	5
	3.1 SCHUTZMAßNAHMEN FÜR DEN FLUGTEST.....	5
	3.2 ABLAUF DER FLUGERPROBUNG	5
	3.3 FLUGTESTERGEBNISSE	6
	3.4 BEWERTUNG DURCH DIE PILOTEN	7
4	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	8
5	REFERENZEN	8

1 ÜBERSICHT

Bei konventionellen Kampfflugzeugen liegt das sichere Manövrieren im Bereich kleiner Geschwindigkeiten ($V < 100$ Knoten) einzig in der Verantwortung des Piloten. Da die Steuerkräfte mit der Geschwindigkeit abnehmen, können Fehler sehr schnell zum Flugzeugverlust führen. Dies schlägt sich in der weltweiten Flugzeug - Verlustrate von ca. 1 in 10.000 Flugstunden infolge zu niedriger Geschwindigkeit nieder. Um die Absturzgefahr zu vermeiden und den Piloten in diesem kritischen Flugzustandsbereich zu entlasten, verfügt der Eurofighter EF2000 über ein ausgefeiltes Langsamflugschutzsystem, das erkennt, wenn das Flugzeug sehr stark in Richtung der kleinsten zulässigen Geschwindigkeit V_{\min} ($V_{\min} < 50$ Knoten) verzögert und daraufhin eine akustische Langsamflugwarnung generiert. Reagiert der Pilot nicht auf die Warnung, so übernimmt der Flugregler die Kontrolle und führt

ein Abfangmanöver aus. Durch Erhöhen des Schubs und Änderung der Flugzeuglage wird die Verzögerung abgebaut und das Flugzeug schließlich wieder beschleunigt. Am Ende des Manövers erhält der Pilot die Kontrolle über das Flugzeug zurück.

Die Hauptschwierigkeit bei der Entwicklung des Systems besteht in der automatischen Gefahrenerkennung. Einerseits soll die ALSR - Funktion die Flugzeugsteuerung übernehmen, wenn die Gefahr besteht, daß die Fluggeschwindigkeit unter die Geschwindigkeit V_{\min} absinkt. Eine (akustische) Langsamflugwarnung LSW wird ca. 3 Sekunden vor der Steuerübernahme ausgelöst, um dem Piloten ausreichend Reaktionszeit für ein manuell geflogenes Abfangmanöver zu garantieren. Andererseits sollen Warnung und Übernahme nicht unnötig ausgelöst werden und sinnvolles Manövrieren im Langsamflugbereich nicht behindern.

Der vorliegende Artikel gibt zunächst einen Überblick über das Entwurfskonzept ALSR Funktion. Zweiter Schwerpunkt des Artikels ist die Flugerprobung der ALSR Funktion.

2 ENTWURFSKONZEPT

Das Kampfflugzeug Eurofighter EF2000 verfügt über ein digitales Flugregelungssystem (Ref. 1 u. 2.). Teil dieses Flugreglers ist die ALSR – Funktion, die erkennt, wenn das Flugzeug sehr stark in Richtung der kleinsten zulässigen Geschwindigkeit V_{\min} verzögert und daraufhin eine Audiowarnung generiert. Reagiert der Pilot nicht auf die Warnung, so übernimmt der Flugregler die Kontrolle und führt ein Abfangmanöver aus.

Im folgenden werden zunächst die flugmechanischen Grundlagen des Langsamfluges beschrieben. Anschließend werden mögliche Langsamflug – Abfangmanöver diskutiert. Dann wird auf die Gefahrenerkennung und die Ausgestaltung der Übernahmbedingungen eingegangen.

2.1 Flugmechanische Eigenschaften des Eurofighter EF2000 im Langsamflug

Schub F , Luftwiderstand D und Erdbeschleunigung g bestimmen die Geschwindigkeitsdifferentialgleichung

$$V = \frac{1}{m}(F - D) - g \sin \gamma .$$

Mit zunehmendem positivem Flugwindneigungswinkel γ wirkt die Erdbeschleunigung zusätzlich zum Luftwiderstand verzögernd auf das Flugzeug ein. In größeren Höhen und mit zunehmender Masse m reicht der Schub nicht mehr aus, um diese Verzögerung auszugleichen.

Verzögert das Flugzeug bei Flugwindneigungswinkeln kleiner ca. 30° kann der Auftrieb ab einer bestimmten Geschwindigkeit (abhängig von der Anstellwinkelgrenze und der Flugzeugmasse) die Erdbeschleunigung nicht mehr kompensieren. Der Flugwindneigungswinkel nimmt ab und wird schließlich negativ. In der Folge beschleunigt das Flugzeug durch die Erdbeschleunigung (auch bei Leerlaufschub). Es ergibt sich, je nach Masse und Konfiguration, eine Minimumgeschwindigkeit von 70-90Knoten.

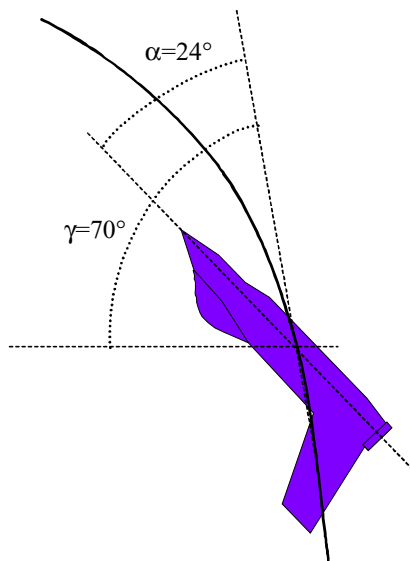


Bild 1: Abfangmanöver durch Ziehen in Rückenlage

Verzögert das Flugzeug bei entsprechend größeren Flugwindneigungswinkeln, dann sinkt die erreichbare Minimumgeschwindigkeit ab bis hin zu Nullgeschwindigkeit und Rückwärtsbeschleunigung.

Aufgrund der instabilen Auslegung des Eurofighter sind hohe Steuerkräfte zur Stabilisierung der Nickachse und zur Bahnsteuerung erforderlich. Die Stellkräfte der aerodynamischen Steuerflächen (Entenklappe, Hinterkantklappe und Seitenruder) sind jedoch proportional zum Staudruck und können Störmomente und -kräfte bei sehr langsamen Geschwindigkeiten ($V < V_{\min}$) nicht mehr ausgleichen.

Zudem sind bei EF2000 die geschwindigkeitssabhängigen Meßgrößen nur oberhalb einer Geschwindigkeit $V_m \approx V_{\min}$ verfügbar.

Um den EF2000 im Langsamflugbereich vor Abstürzen zu schützen, muß daher sichergestellt werden, daß:

- die Fluggeschwindigkeit stets größer V_{\min} bleibt oder
- das Flugzeug nur kurzzeitig im Messerflug auf Geschwindigkeiten kleiner V_{\min} verzögert.

Die ALSR Funktion stellt durch rechtzeitiges Eingreifen sicher, daß diese Bedingungen erfüllt werden. Die zweite Bedingung kommt dabei nur im Fehlerfall (z.B. Triebwerksausfall) zum tragen.

Da das Einhalten der Mindestgeschwindigkeit V_{\min} nicht allein über die Schubsteuerung garantiert werden kann, muß ein Abfangmanöver eingeleitet werden derart, daß die Flugzeugnase Richtung Erde gedreht wird, bis die Erdanziehung beschleunigend wirkt.

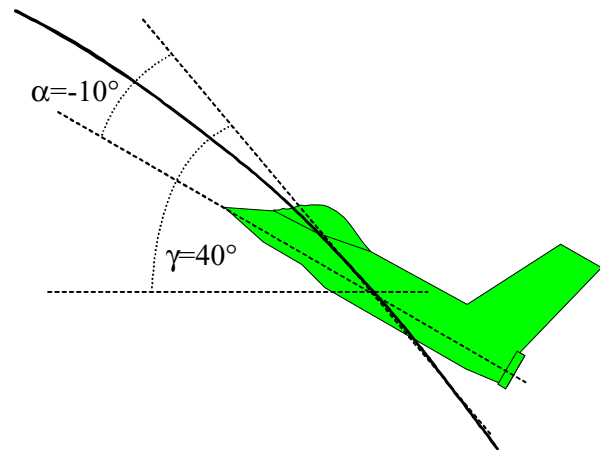


Bild 2: Bahnänderung durch Drücken

Im Rückenflug werden bei maximalem Auftrieb auch im Langsamflug noch ansehnliche Lastfaktoren erzeugt und ein entsprechendes Abfangmanöver kann am schnellsten durchgeführt werden. Allerdings muß die Nickachse der Flugbahn nachgeführt werden. Deshalb sind größere Steuerkräfte erforderlich und die Mindestgeschwindigkeit V_{\min} muß eingehalten werden. Bild 1 zeigt ein Flugzeug in Rückenlage.

Drücken bis zur negativen Anstellwinkelgrenze liefert eine vergleichbare Situation (siehe Bild 2). Die hierbei auftretenden (für den Piloten unangenehmen) negativen Lastfaktoren sind allerdings sehr viel kleiner.

In großen Höhen liegen auch bei kleinen Staudrücken noch ansehnliche Bahngeschwindigkeiten vor. In dieser Situation kann das Flugzeug im Messerflug einer quasi-ballistischen Bahn folgen. Die Bahnsteuerung erfordert im Messerflug nur sehr geringe Steuerkräfte, da am Seitenleitwerk auch bei niedrigen Staudrücken noch ansehnliche stabilisierende Giermomente ($C_{N\beta} < 0$) erzeugt werden. Seiten- und Querruderausschläge sind dann nur zur Störmomentenkompensation erforderlich, Ente und Hinterkantklappen können zur Stabilisierung der Nickachse eingesetzt werden. Bild 3 illustriert die Bahnsteuerung im Messerflug. In dieser Situation ist auch ein kurzzeitiges Unterschreiten von V_{\min} möglich, ohne daß das Flugzeug außer Kontrolle gerät.

Die Vor- und Nachteile der genannten Fluglagen wurden bei der Auswahl der Langsamflug-Abfangmanöver in Abschnitt 2.2 und Abschnitt 2.3 berücksichtigt.

2.2 Aufbau des Langsamflugschutzes

Der Langsamflugschutz für EF 2000 besteht aus

Der Langsamflugwarnung (Low Speed Warning LSW),

einer Prozedur zum Abfangen des Flugzeugs bei Auslösen der Langsamflugwarnung (Low Speed Warning Procedure) und

der automatischen Langsamflugabfangfunktion (Automatic Low Speed Recovery, ALSR).

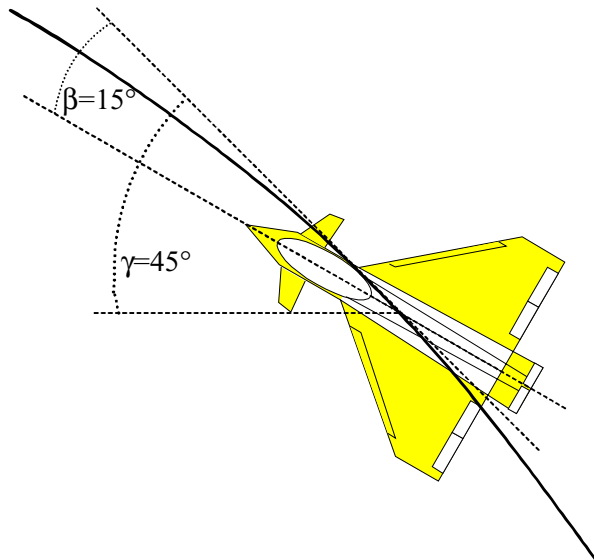


Bild 3: Bahnänderung im Messerflug

Die (akustische) Langsamflugwarnung LSW wird ausgelöst wenn – unter Annahme konstanter Verzögerung – noch ca. 3 Sekunden bis zur Steuerübernahme durch die ALSR Funktion verblieben.

Das Abspielen der LSW fordert den Piloten dazu auf, ein Abfangmanöver einzuleiten. Dazu soll

der Schub erhöht - und -

auf dem kürzesten Weg in Rückenlage gerollt und das Flugzeug Richtung Erde gezogen werden.

Reagiert der Pilot nicht auf die Warnung oder gelingt das Abfangmanöver nicht, so übernimmt die ALSR Funktion die Flugsteuerung aus jeder beliebigen Flugzeuglage und leitet ein automatisches Abfangmanöver ein.

Dabei sind drei Manövergrundtypen vorgesehen, die im folgenden beschrieben werden.

2.3 Manövertypen

Zu Beginn aller Manöver wird zunächst die Schubsteuerung vorgenommen. Wird das Triebwerk bereits mit Nachbrenner betrieben, so ändert sich nichts. Andernfalls wird Maximalschub ohne Nachbrenner kommandiert. An-

bzw. Abwahl des Nachbrenners liegt im Ermessen des Piloten.

Das erste Abfangmanöver (Typ I, blau in Bild 6) besteht darin, durch Ziehen im Rückenflug den Flugwindneigungswinkel abzubauen.

Zeigt das Cockpit vor der automatischen Steuerübernahme himmelwärts, muß das Flugzeug zunächst in die Rückenlage gerollt werden, bevor der Anstellwinkel aufgebaut wird (Rollen & Ziehen). Der Manövertyp I wird kommandiert, wenn sich das Flugzeug nahe der Vertikalen oder in Rückenlage befindet.

Das zweite Abfangmanöver (Typ II, gelb in Bild 6) besteht darin, das Flugzeug in den Messerflug zu rollen (90° Hängewinkel, 0° Anstellwinkel, 0°/s Nickrate) und durch Aufbau von Schiebewinkel (Pedalkommando) die Flugzeugnase Richtung Erde zu drehen.

Das dritte Abfangmanöver besteht darin, durch Drücken den Flugwindneigungswinkel abzubauen.

Die Manöver werden ausgeführt, bis die Flugzeugnase den Horizont durchquert hat und die Gravitationskraft das Flugzeug beschleunigt. Dann wird neutrale Knüppel- und Pedalstellung kommandiert und die ALSR Funktion wartet ab, bis das Flugzeug die Steuerrückgabegeschwindigkeit V_{SR} erreicht hat.

Bild 6 zeigt den Ablauf der Langsamflugabfangmanöver. Das blaue Flugzeug steigt senkrecht nach oben und verzögert. Am Punkt W wird die Langsamflugwarnung ausgelöst. Reagiert der Pilot auf die Warnung, folgt das Flugzeug z.B. der gestrichelten Bahn (rotes Flugzeug). Reagiert der Pilot nicht, so übernimmt am Punkt T die ALSR Funktion die Flugzeugsteuerung. Der Schub wird (falls nötig) erhöht und das Flugzeug aus der Vertikalen gezogen (Typ I). Im Fall des gelben Flugzeugs wird zunächst auf den Rücken gerollt und dann gezogen (ebenfalls Typ I). Am Punkt D erhält der Pilot die Kontrolle über das Luftfahrzeug zurück.

2.4 Auslösen der Langsamflugwarnung

Die Langsamflugwarnung (LSW) wird ausgelöst, wenn die Fluggeschwindigkeit unter eine - in Abhängigkeit vom momentanen Flugzustand berechnete - Grenzggeschwindigkeit V_W absinkt.

Bei der Auslegung der Grenzggeschwindigkeiten für die LSW muß insbesondere darauf geachtet werden, daß die Warnung

so frühzeitig ausgelöst wird, daß der Pilot genug Zeit hat, ein manuelles Abfangmanöver einzuleiten, bevor die ALSR Funktion das Steuer übernimmt. Dafür ist ein Zeitraum von ca. 3 Sekunden vorgesehen.

so spät wie möglich ausgelöst wird, um den Pilot nicht im Luftkampf zu behindern und zu unnötigen Abfangmanövern zu zwingen.

Mit dem Auslösen der LSW wird die Luftbremse eingefahren

2.5 Steuerübernahme durch die ALSR - Funktion

Die ALSR Funktion greift ein, wenn die Fluggeschwindigkeit unter eine - in Abhängigkeit vom momentanen Flugzustand berechnete - Grenzgeschwindigkeit V_T absinkt. Die ALSR Funktion soll dabei

- so frühzeitig ausgelöst werden, daß das Abfangmanöver oberhalb der Geschwindigkeit V_{min} durchgeführt werden kann. Dabei sind häufig auftretende Störungen und ungünstige Windverhältnisse mitzubersichtigen.

- so spät wie möglich ausgelöst werden, um den Pilot im Luftkampf nicht zu behindern.

Solange das Flugzeug vom Piloten gesteuert wird, wird ständig die aufgrund des momentanen Flugzustands günstigste Abfangstrategie und die zugehörige Steuerübernahme-Grenzgeschwindigkeit V_T berechnet. Die günstigste Abfangstrategie wird durch Nicklage- (Θ), Rolllage- (Φ) und Flugwindneigungswinkel (γ) festgelegt. Die Geschwindigkeit V_T wird in Abhängigkeit

- der gewählten Abfangstrategie,
- des Flugwindneigungswinkels γ ,
- der zeitlichen Änderung des Flugwindneigungswinkels $\dot{\gamma}$,
- der Verzögerung V und
- von Konfigurationsparametern (Masse etc.)

berechnet. Bild 4 zeigt den grundsätzlichen Verlauf der Grenzgeschwindigkeiten V_W und V_T in Abhängigkeit von γ für eine Beispielkombination von Masse und Schub.

Hat der Pilot nach Auslösen der Langsamflugwarnung ein Abfangmanöver eingeleitet, kann dies anhand von γ beobachtet werden. Diese Information wird dazu verwendet,

- am Entscheidungspunkt zwischen zwei möglichen Abfangmanövern dasjenige auszuwählen, welches das Abfangmanöver des Piloten im wesentlichen fortsetzt.

- auf die Steuerübernahme zu verzichten, wenn erkennbar ist, daß das Abfangmanöver erfolgreich

sein wird. Dies geschieht durch Verringerung der Grenzgeschwindigkeit V_T in dieser Situation.

Der Zeitabstand von ca. 3 Sekunden zwischen Langsamflugwarnung und Steuerübernahme gilt also nur, wenn der Pilot nicht auf die Warnung reagiert. Wird ein zielführendes Abfangmanöver eingeleitet, erhält dieses Priorität über das automatische Manöver und der Pilot behält die Kontrolle über das Flugzeug. Bild 5 zeigt, wie die Grenzgeschwindigkeiten durch Schubhöhung oder günstiges γ verringert werden. Das Flugzeug (grüne Trajektorie) löst die Langsamflugwarnung (blaue Grenzkurve) aus und der Pilot leitet ein Abfangmanöver ein. Dadurch werden die Grenzgeschwindigkeiten verringert. Die LSW bleibt aktiviert, aber die ALSR Funktion greift nicht ein.

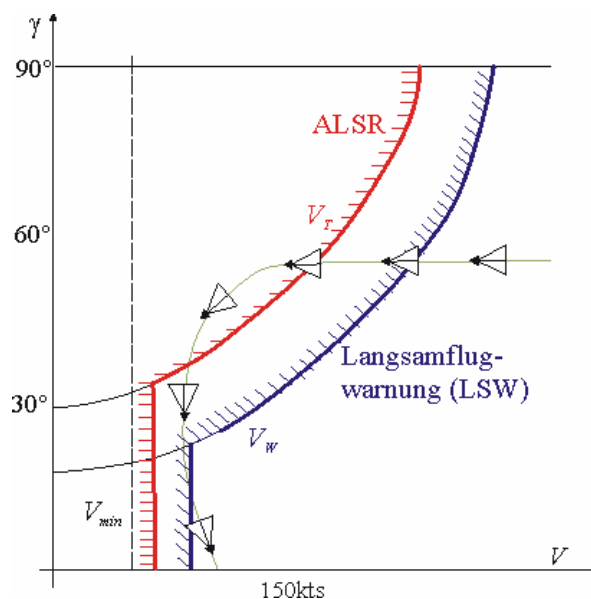


Bild 4: Grundsätzlicher Verlauf der Grenzgeschwindigkeiten V_W und V_T

Bei Steuerübernahme werden die vom Steuerknüppel abgehenden Signale durch die Steuersignale der ALSR-Funktion ersetzt. Der Pilot kann jedoch durch Rollsteuerungen die Roll-Richtung des Abfangmanövers beeinflussen. Sind aufgrund der Fluglage beide Richtungen möglich, folgt das Flugzeug der Steuerknüppel eingabe - andernfalls wird die flugmechanisch günstigere Roll-Richtung kommandiert.

Nach Steuerübernahme durch die ALSR Funktion wird die Abfangstrategie eingefroren. Die Fluggeschwindigkeit wird weiter überwacht. Beschleunigt das Flugzeug und wird eine Fluggeschwindigkeit größer als die Steuerrückgabegeschwindigkeit V_{SR} erreicht, wird die Steuerautorität an den Piloten zurückgegeben.

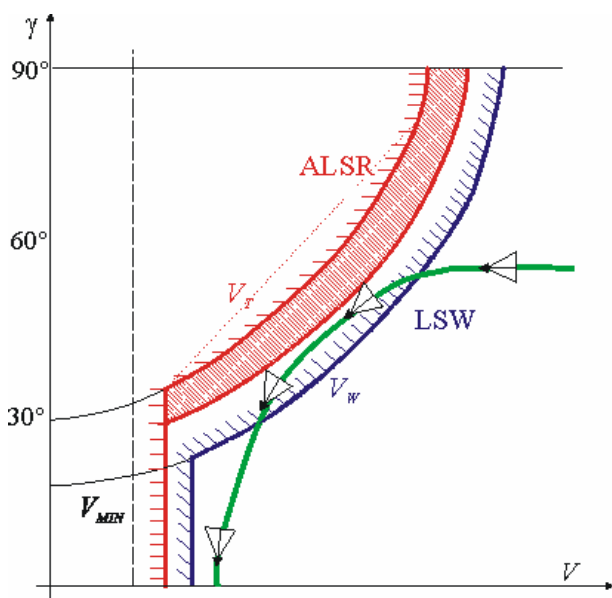


Bild 5: Grenzgeschwindigkeiten bei Pilotenreaktion auf die LSW: Aufbau von γ und Verringerung von V_T .

2.6 Robustheit gegen atmosphärische Störungen und Fehlerfälle - Strategiewechsel

Treten nach Einleiten des Abfangmanövers Störungen auf, so kann das Einhalten der Mindestgeschwindigkeit V_{\min} nicht garantiert werden. In diesem Zusammenhang müssen insbesondere

- Triebwerksausfall und
- Windscherungen (zunehmender Rückwind)

betrachtet werden. Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, ist der Eurofighter im Messerflug vergleichsweise robust gegen Unterschreitung der Mindestgeschwindigkeit. Es ist daher vorteilhaft in den Messerflug (Manövertyp II) überzugehen, wenn sich die Geschwindigkeit an V_{\min} annähert. Wurde zunächst ein anderer Manövertyp gewählt, errechnet die ALSR Funktion aus den aktuellen Flugzustandsdaten bei welcher Geschwindigkeit ein Strategiewechsel notwendig wäre. Sinkt die Fluggeschwindigkeit unter diese Geschwindigkeit, kommandiert die ALSR Funktion den Übergang in den Messerflug. Die neue Abfangstrategie wird eingefroren und nicht mehr gewechselt.

3 FLUGERPROBUNG

Bevor die ALSR Funktion im Serienflugbetrieb eingesetzt werden kann, mußte der Langsamflugschutz im Flugtest nachgewiesen werden. Da bei Fehlfunktion oder Ausfall der ALSR Funktion mit dem Verlust des Flugzeugs gerechnet werden mußte, wurde der Flugtest als "Flugtest mit hohem Risiko / High-Risk-Trial" eingestuft. Zusätzliche Schutzmaßnahmen wurden ergriffen, um das Risiko des Flugtests zu verringern.

3.1 Schutzmaßnahmen für den Flugtest

Für den Fall einer ALSR - Fehlfunktion hatte der Pilot die Möglichkeit, die ALSR - Funktion abzuschalten und ein manuelles Abfangmanöver einzuleiten.

Um ein langsames Herantasten an den kritischen Langsamflugbereich zu ermöglichen, konnten die Grenzgeschwindigkeiten V_W und V_T für den Flugtest mit konstanten Aufschlägen (Speed Bias) versehen werden. Die LSW und die ALSR Funktion konnten so zunächst bei größeren Geschwindigkeiten ausgelöst werden.

Der ALSR Flugtest wurde zunächst nur bei günstigen Windverhältnissen durchgeführt. Dazu wurden vor Beginn des Tests die Windverhältnisse im Testgebiet in einem Steigflug ausgemessen (siehe auch Referenz 3). Die Testpunkte wurden dann senkrecht zum Wind angefliegen, um das Scherwindrisiko zu minimieren. Mit steigendem Vertrauen in die Robustheit des ALSR Systems konnte auf diese Maßnahme verzichtet werden.

Der ALSR Flugtest wurde auf dem Eurofighter Prototyp DA2 von BAE Systems durchgeführt. Dieses Flugzeug ist mit Hilfsturbine (EPU) und Trudelschirm (Anti-Spin-Gantry) ausgerüstet. Damit ist es sogar bei Triebwerksausfall und Geschwindigkeiten nahe Null möglich, das Flugzeug abzufangen und außer Gefahr zu bringen.

Der Flugtest wurde am Boden von einem zweiten Testpilot (Safety Pilot) begleitet, um den fliegenden Piloten bei derartigen Rettungsmanövern unterstützen zu können.

Mit diesen Maßnahmen konnte das Absturzrisiko für den Fall einer ALSR - Fehlfunktion oder eines Triebwerksausfalls erheblich reduziert werden.

3.2 Ablauf der Flugerprobung

Der ALSR Flugtest wurde in drei Abschnitten durchgeführt:

Modellvalidierung und Flugbereichserweiterung im Langsamflugbereich unter Verwendung des Speed Bias

Funktionalitätsnachweis

Demonstration der Schutzfunktion unter Bedingungen des Serienflugbetriebs.

Um eine genaue Vorhersage der ALSR Manöver zu ermöglichen, wurden die ersten Testpunkte bei konstantem Flugwindneigungswinkel γ (stabilisierter Steigflug) angefliegen. Mit diesem Vorgehen wurden die drei ALSR - Manövergrundtypen validiert und durch Verwendung des Speed Bias der Flugbereich bis zu einer Minimumgeschwindigkeit von 60Knoten erweitert. Durch Variation der Schubhebelstellung beim Anflug konnte das Triebwerksmodell überprüft werden.

Nachdem eine zufriedenstellende Übereinstimmung der Modelldaten mit den Flugtestergebnissen nachgewiesen

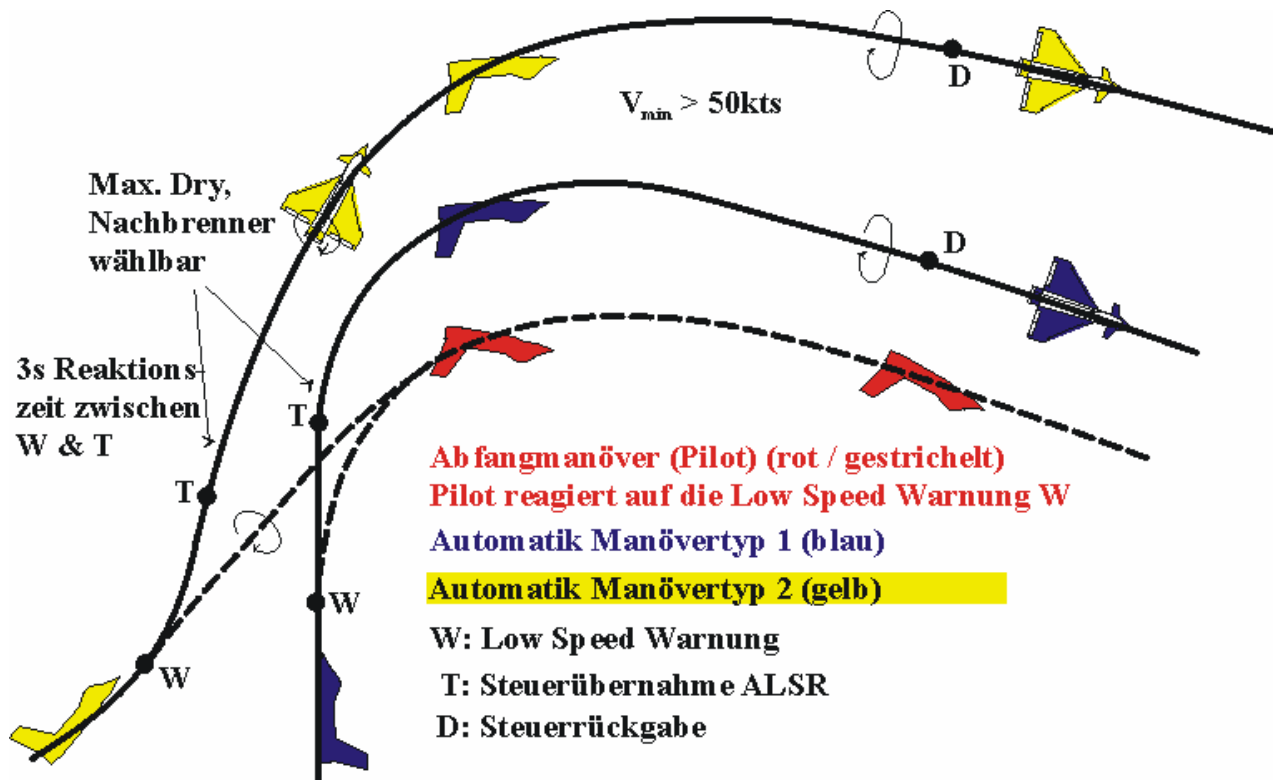


Bild 6: Langsamflug - Abfangmanöver

werden konnte, wurde der ALSR Flugtest mit dem zweiten Abschnitt fortgesetzt. Hier lag der Schwerpunkt auf Testpunkten, bei denen die ALSR Funktion aus dynamischen ($\gamma \neq 0$) Manövern, insbesondere Loopings, heraus ausgelöst wurde. Außerdem wurde die Prozedur zur Langsamflugwarnung getestet, wobei die "Reaktionszeit" des Piloten (1, 2, oder 3 Sekunden) vorgegeben wurde.

Im dritten Abschnitt wurde die ALSR Funktion aus solchen Manövern heraus ausgelöst, von denen erwartet wird, daß sie im Serienflugbetrieb (Luftkampf) auftreten. Weiter wurde eine Serie extrem dynamischer Manöver (z. B. verzögernde Pirouetten) geflogen, um die Leistungsfähigkeit der ALSR - Funktion zu zeigen. Diese Demonstration wurde auf den zweisitzigen Serienflugzeugen IPA1 (der Firma BAE Systems) und IPA3 (der Firma EADS) durchgeführt.

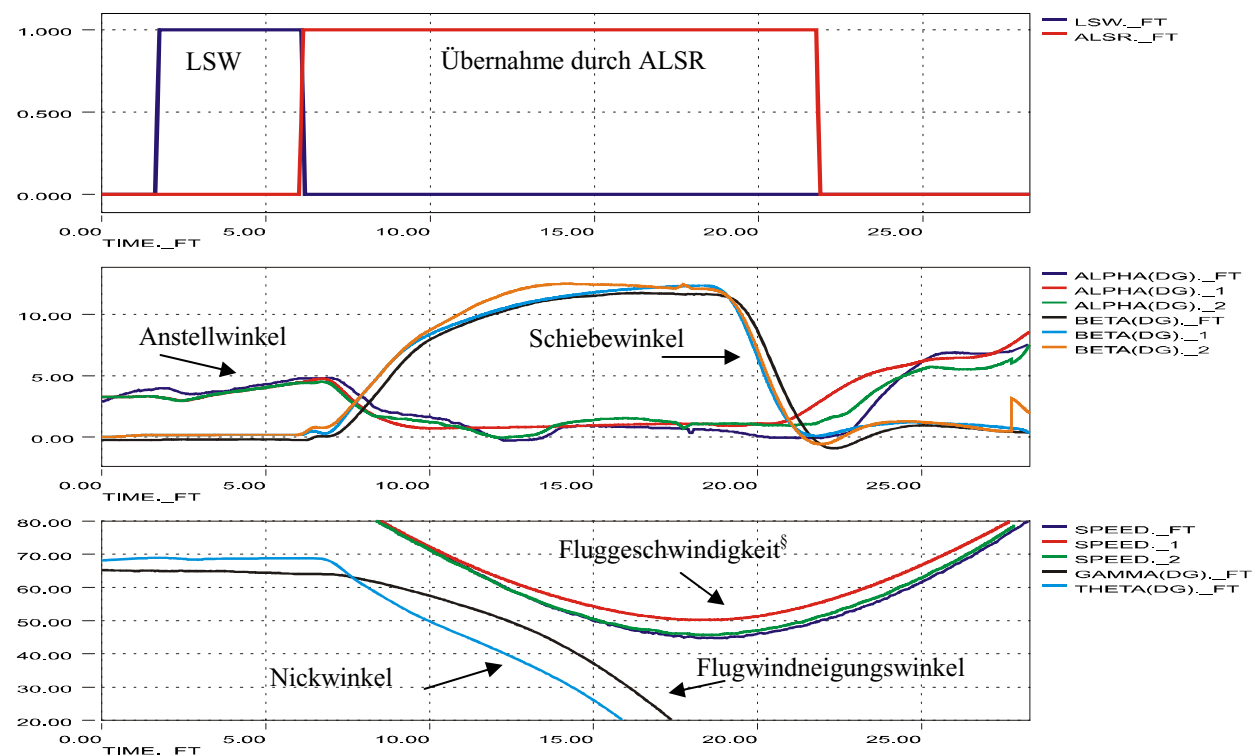
3.3 Flugtestergebnisse

Im ersten Flugtestabschnitt (Modellvalidierung und Flugbereichserweiterung) wurden in 9 Testflügen 56 ALSR Manöver ausgelöst. Die geflogenen Manöver und die erreichten Minimumgeschwindigkeiten stimmen mit den modellbasierten Vorausberechnungen und Nachsimulationen überein. Die Ergebnisse lassen den Schluß zu, daß die Simulationsmodelle die Realität ausreichend genau abbilden. Wichtig für die Nachsimulation der Testmanöver war das Einspielen der im Flug gemessenen Windver-

hältnisse in die Simulation. Bild 7 zeigt Flugtestergebnisse und Nachsimulation mit und ohne Wind.

Im zweiten Flugtestabschnitt konnten in 3 Flügen 58 Testpunkte angeflogen werden. Die hohe Anzahl der Testpunkte pro Flug wurde durch den Einsatz von Luftbetankung erzielt. Es zeigte sich, daß die ALSR Funktion auch in dynamischen Manövern (Loopings etc.) die erwartete Schutzfunktion voll erfüllt. Bild 8 zeigt ein Loopingmanöver das bei zu geringer Geschwindigkeit begonnen wurde und daher durch die ALSR Funktion abgebrochen wurde. Wieder ergab sich eine gute Übereinstimmung der Flugtestergebnisse mit Vorausberechnung und Nachsimulation.

Die Tests der Langsamflugwarnung ergaben, daß dem Piloten bei klinischen Manöverintrittsbedingungen (z.B. stabilisierte Steigflüge) - wie im Entwurf vorgesehen - ca. 3 Sekunden Reaktionszeit zwischen Auslösen der LSW und Übernahme durch die ALSR - Funktion verbleiben. Leitete der Pilot 2 Sekunden nach Auslösen der LSW ein Abfangmanöver ein, übernahm die ALSR Funktion nicht, bei 3 Sekunden Wartezeit griff die ALSR Funktion ein. Bei ALSR - Übernahmen aus sehr dynamischen Manövern hängt die Reaktionszeit sehr stark von dem anliegenden Steuerkommando ab (Rollen auf den Rücken verlängert beispielsweise die Reaktionszeit, Ausrollen in den Horizontalflug verkürzt sie).



M. Hanel

Bild 7: ALSR Manöver (Typ II), 40Kts Speed Bias, Steigflug bei 65° Flugwindneigungswinkel, Leerlaufschub
Flugtestergebnis (_FT) und Nachsimulation mit (_1) und ohne (_2) Wind; §skalierte Zahlenwerte

Der dritte Flugtestabschnitt wurde auf Serienflugzeugen (IPA, Instrumented Production Aircraft) durchgeführt. Diese verhalten sich flugmechanisch gleich wie der Eurofighter Prototyp DA2, verfügen jedoch nicht über Hilfsturbinen und Trudelschirm. Erneut bewies die ALSR-Funktion ihre Zuverlässigkeit. Auch aus aggressiven Manövern und sehr dynamischen (große Roll- und Nickraten) Übernahmebedingungen heraus wurden die vorgesehenen Abfangmanöver geflogen und die Minimumgeschwindigkeiten während des Manövers erreichten die vorausberechneten Werte. Bild 9 zeigt die Übernahme durch die ALSR-Funktion aus einer Pirouette (schnelle Rolle bei 1g und Verzögerung durch steilen Steigflug). Auch hier kommt Manöver-Typ II (Messerflug) zum Einsatz. Die Nachsimulation dieser Manöver war erheblich komplizierter als die derjenigen aus den Flugtestabschnitten eins und zwei, da kleine Abweichungen in den Anfangsbedingungen über die Simulationsdauer des Manövers zu größeren Abweichungen der Übernahmebedingungen führten. Trotzdem konnte auch hier eine gute Übereinstimmung zwischen Flugtest und Simulationsergebnis gezeigt werden. Dies ist besonders wichtig für den Funktionsnachweis der ALSR-Funktion im Fehlerfall (beispielsweise Triebwerksausfall, beschädigtes Luftdatensystem oder Fehlstellung der Flügelvorderkantenklappe) der ausschließlich durch Simulation und nicht durch Flugtest erbracht wird.

3.4 Bewertung durch die Piloten

Die Funktionsweise der ALSR-Funktion wurde von den Testpiloten durchweg als sicher und vorhersehbar bewertet. Insbesondere wurde bemerkt, dass das aggressiv durchgeführte Abfangmanöver dem Piloten ein klares Bild der Flugzeugbewegung und der Flugzeuglage im Raum vermittelt. Dies ist besonders wichtig für die Steuerübernahme durch den Piloten am Ende des Abfangmanövers. Die Einstellung der Reaktionszeit zwischen dem Auslösen der Langsamflugwarnung einerseits und der Steuerübernahme durch die ALSR-Funktion andererseits wird als gelungen angesehen, auch wenn der Zeitraum von 3 Sekunden nur bei klinischen Manövern (stabilisierte Steigflüge bei konstantem Flugneigungswinkel) exakt erreicht wird. Insbesondere bei Loopings fällt die Reaktionszeit (für unverändertes Pilotenkommando) mitunter kürzer aus (in der ansteigenden Manöverphase werden Verzögerungen von 40Knoten/s und mehr erzielt).

Die Intensivierung des Eurofighter-Flugbetriebs bei den Luftstreitkräften der EF2000 Partnernationen in den nächsten Jahren wird sicher weitere Erkenntnisse erbringen, inwieweit die Balance zwischen Robustheit gegen atmosphärische Störungen einerseits und Eingriffe in die operative Freiheit des Piloten richtig eingestellt ist.

Flight Test Result_FT Reprediction_Sim

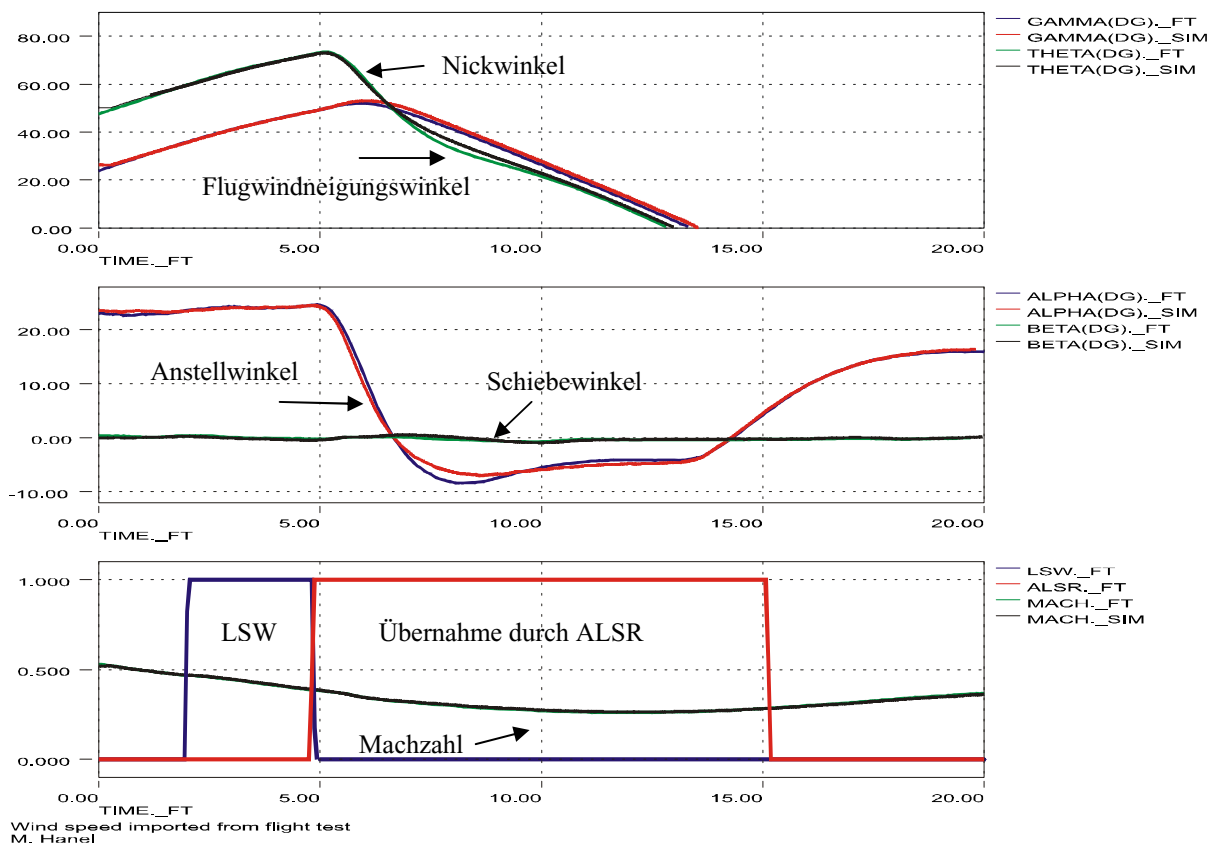


Bild 8: ALSR Manöver (Typ III), 10kts Speed Bias, Übernahme aus begunnenem Looping Manöver; Nachsimulation (Sim) mit Wind und Flugtestergebnis (FT)

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Eurofighter EF2000 verfügt über ein ausgefeiltes Langsamflugschutzsystem als Teilfunktion des Flugregelungssystem. Das System erkennt, wenn das Flugzeug sehr stark in Richtung der zulässigen Minimalgeschwindigkeit verzögert und generiert zunächst eine akustische Warnung. Reagiert der Pilot nicht oder zu spät auf die Warnung, so übernimmt die ALSR – Funktion die Flugsteuerung und führt ein Abfangmanöver durch. Nach Abschluß des Manövers erhält der Pilot die Steuerautorität zurück.

Die ALSR – Funktionalität wurde durch ein aufwändiges Flugprogramm erprobt und demonstriert. Für die Flugerprobung war eine Reihe von Sicherheitsmaßnahmen erforderlich, um das Absturzrisiko im Falle einer möglichen ALSR- Fehlfunktion zu minimieren. Die Flugerprobung verlief fehlerfrei und erfolgreich. Die ALSR – Funktion ist auf den EF2000 Serienflugzeugen aktiviert. Die Flugfreigabe umfaßt außer dem eigentlichen Langsamflugschutz eine Trainingsmöglichkeit bei gemäßigter Windstärke. Dabei darf der Pilot die Reaktion auf die Langsamflugwarnung bewußt verzögern, um die ALSR – Funktion auszulösen.

Erste (positive) Erfahrungen mit der ALSR – Funktion aus dem Serienflugbetrieb liegen vor. Die Intensivierung des Eurofighter-Flugbetriebs in den nächsten Jahren wird sicher weitere Erkenntnisse erbringen, ob die Balance zwischen Robustheit gegen atmosphärische Störungen einerseits und Eingriffe in die operative Freiheit des Piloten richtig eingestellt ist.

5 REFERENZEN

1. McCuish, A., Caldwell, B., "Development and Flight Experience of the Control Laws in the Experimental Aircraft Programme", in Tischler, M.-B. (Ed.), "Advances in Aircraft Flight Control", Taylor & Francis, London 1996, ISBN 0-7484-0479-1
2. Osterhuber, R., "Realization of the Eurofighter 2000 Primary Lateral/Directional Control Laws with Differential PI-Algorithm", AIAA Guidance, Navigation and Control Conference 2004, Providence RI, Proceedings AIAA 2004-4751
3. Dinkelmann, M., „Eurofighter Automatic Low Speed Recovery Function (Flugfreigabe)“, DGLR Jahrestagung 2006, Nov. 2006.

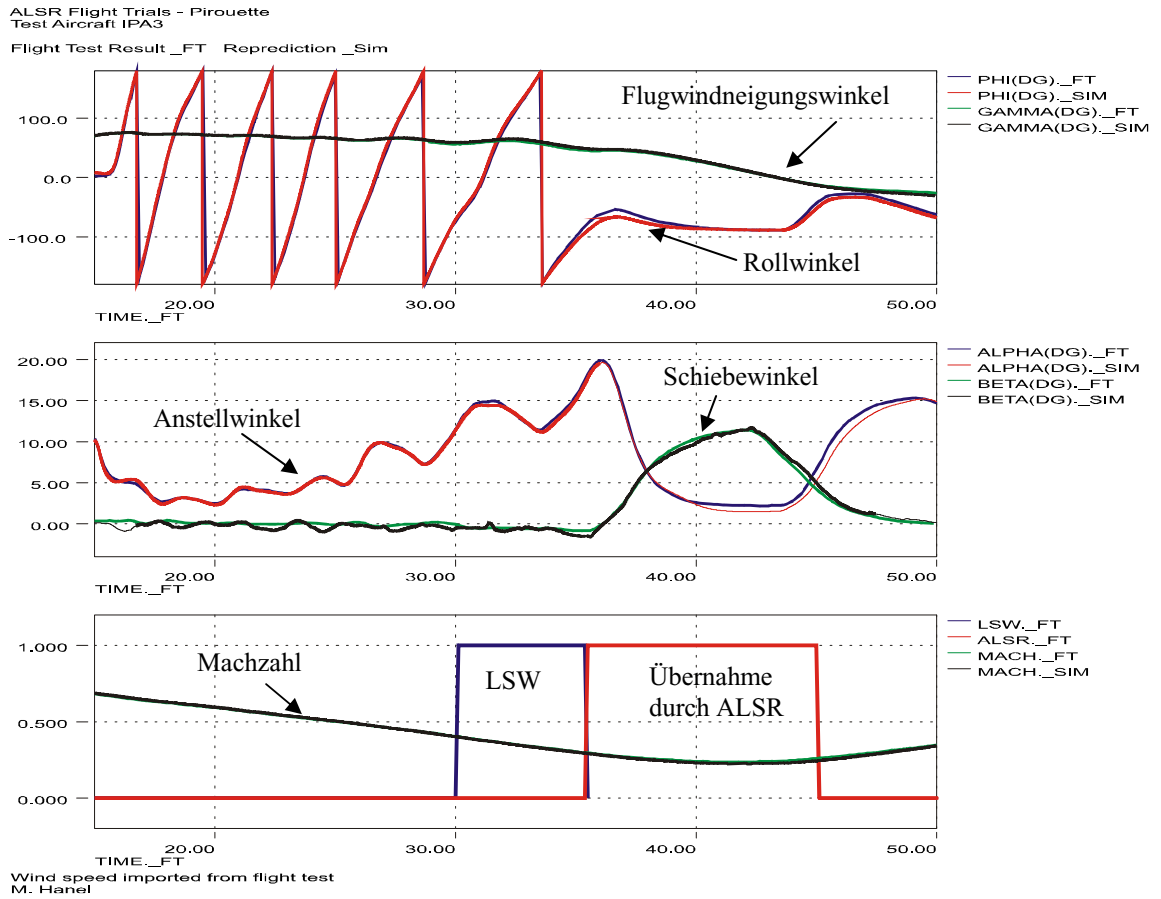


Bild 9: ALSR Manöver (Typ II), Instrumentiertes Serienflugzeug IPA3, Übernahme aus Pirouette Nachsimulation (_Sim) mit Wind und Flugtestergebnis (_FT)