

AUTOMATIC LOW SPEED RECOVERY (ALSR) FÜR DEN EUROFIGHTER: DER WEG ZUR FLUGFREIGABE (CLEARANCE)

Dr.-Ing. Michael Dinkelmann
EADS Deutschland GmbH
Militärflugzeuge
81663 München

1 EINLEITUNG	1	Richtung der zulässigen Minimalgeschwindigkeit (<50 Knoten) verzögert, und generiert eine Audiowarnung ("Low Speed Warning", LSW). Reagiert der Pilot nicht, zu spät oder falsch auf die Warnung, übernimmt der Flugregler die Kontrolle und veranlasst durch Schuberhöhung und Änderung der Fluglage eine Beschleunigung des Flugzeugs, bis der Pilot schließlich die Kontrolle zurückerhält.
2 BESONDERHEITEN DER CLEARANCE	2	Dies sichert den Bereich, in dem das Flugzeug "Carefree" geflogen werden kann, zu kleinen Geschwindigkeiten hin ab. Für mehr Details hinsichtlich Design und Flugtest siehe Ref. 5.
3 ATMOSPHÄRISCHE STÖRUNGEN	3	Die ALSR-Funktion muss als Teil der Flugzeugfunktionalität für folgende Einsatzszenarien zugelassen werden:
3.1 WINDSCHERUNGEN	3	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Notfallfunktion</u> (Kernaufgabe der ALSR) • <u>Training</u> (absichtliches Auslösen der ALSR zu Trainingszwecken) • <u>Flugtest</u> (absichtliches Auslösen der ALSR zu Testzwecken)
3.1.1 <i>Strahlstrom („Jetstream“)</i>	3	
3.1.2 <i>Grenzschichteffekt</i>	3	
3.2 EINFLUSS AUF DIE ALSR	3	
3.3 MESSUNGEN IM FLUG	3	
3.4 JAHRESZEITLICHE SCHWANKUNGEN	4	
4 CLEARANCE	5	
4.1 EINSATZSzenariEN	5	
4.1.1 <i>Notfallfunktion</i>	5	
4.1.2 <i>Training</i>	5	
4.1.3 <i>Flugtest</i>	5	
4.2 STATISTISCHE BETRACHTUNGSWEISE	6	
4.2.1 <i>Notfallfunktion</i>	6	
4.2.2 <i>Training</i>	6	
4.2.3 <i>Flugtest</i>	6	
4.2.4 <i>Triebwerksausfall</i>	7	
5 VERGLEICH ZUR MANUELLEN LSR	7	
6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	7	
7 REFERENZEN	7	

1 EINLEITUNG

Bei konventionellen Kampfflugzeugen liegt die Verantwortung für das sichere Manövrieren bei niedrigen Geschwindigkeiten beim Piloten. Zur Risikominimierung ist der Eurofighter mit einem Langsamflugschutzsystem („Automatic Low Speed Recovery“, ALSR) ausgestattet (die ALSR-Funktion ist auf allen ausgelieferten Serienflugzeugen aktiviert). Dieses erkennt, wenn das Flugzeug stark in

Die geringe Geschwindigkeit gegenüber der Luft, verbunden mit einer deutlichen Höhenänderung während des Manövers, machen das Flugzeug in diesem Teil der Envelope sehr sensiv auf Änderungen von Windgeschwindigkeit und Windrichtung.

Im Vortrag werden daher nicht nur die Schritte zur Flugfreigabe der verschiedenen Einsatzszenarien detailliert beschrieben (mit besonderem Augenmerk auf der völlig neuartigen Einbeziehung des Einflusses von Windscherungen), sondern auch in dieser Form einzigartige Messungen der auftretenden Windscherungen vorgestellt (s. Abb. 1), die im Rahmen der EF2000-Flugerprobung in Großbritannien und Deutschland durchgeführt wurden.

Der vorliegende Artikel zeigt, dass zum Erreichen der Serienfreigabe der ALSR-Funktionalität nicht nur eine sehr enge Zusammenarbeit in den Bereichen Flugregelung / Flugdynamik / Flugfreigabe / Sicherheit / Luftdatensysteme / Flugtest / Triebwerke erforderlich war, sondern auch eine enge Verknüpfung mit Wetterdaten und der Physik der Atmosphäre.

2 BESONDERHEITEN DER CLEARANCE

Die Flugfreigabe der ALSR-Funktion unterscheidet sich von einer „Standard“-Clearance aus nachfolgend beschriebenen Gründen:

- Es ist das weltweit erste automatische Langsamflugschutzsystem dieser Art, daher kann auf keine Erfahrung aufgebaut werden.
- Ob wohl es eine vollautomatische Funktionalität ist, hängen die Anfangsbedingungen und daher auch die Sicherheitsbetrachtungen hochgradig von der individuellen Pilotenreaktion auf die Langsamflugwarnung (LSW) ab.
- Wie in Bild 1 gezeigt, reduziert sich der Staudruck rapide bei zunehmend niedriger Geschwindigkeit. Der niedrige Staudruck hat folgende Effekte:
 - Geringe aerodynamische Kräfte wirken auf das Flugzeug → der Flug wird mit geringer werdendem Staudruck mehr und mehr ballistisch.
 - Niedrige aerodynamische Kräfte wirken auf die Steuerflächen → reduzierte Steuerbarkeit (EF2000 hat keine Schubvektorsteuerung)
 - Niedrige aerodynamische Kräfte auf das Luftdatensystem → zunehmende Messfehler (z.B. durch zunehmende Abhängigkeit von der Trägheit der Windfahnen und von der Reibung in den Achsen derselben).
 - Hohe Sensitivität auf atmosphärische Störungen (insbesondere auf Böen und Windscherungen), siehe Bild 2.

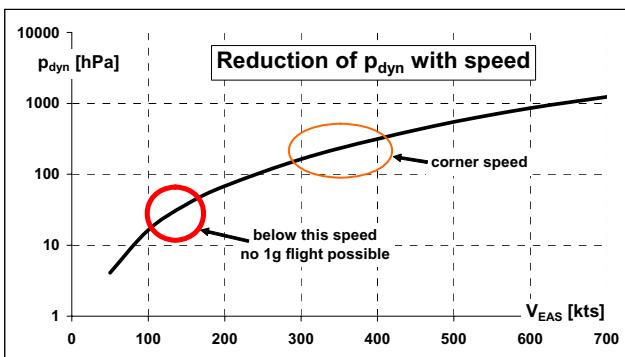


Bild 1 Abhängigkeit von Staudruck und Geschwindigkeit

Die „Corner Speed“ bezeichnet den untersten Geschwindigkeitsbereich, in dem das Flugzeug noch den maximal zulässigen Lastfaktor erreichen kann (die genauen Werte sind abhängig von Flugzeugmasse und Konfiguration).

Ähnlich dazu ist das Flugzeug bei Geschwindigkeiten um $\approx 100\text{-}150$ Knoten gerade noch in der Lage, stationär 1g zu fliegen, d.h. sich rein aerodynamisch ohne Höhen- und Geschwindigkeitsverlust in der Luft zu halten (die genauen Werte sind wiederum abhängig von Flugzeugmasse und Konfiguration). Dieser Bereich kennzeichnet den Beginn der „Low Speed Area“.

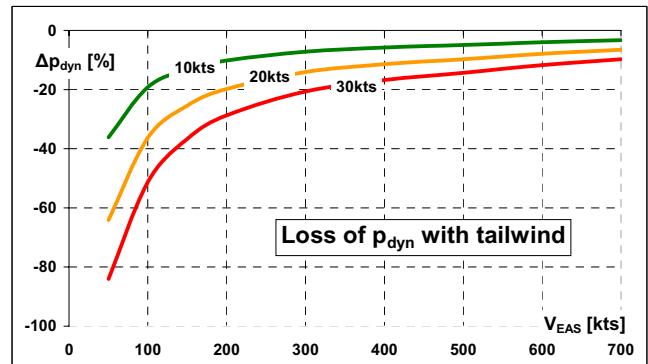


Bild 2 Sensitivität des Staudrucks (und damit aller angreifenden Luftkräfte) auf atmosphärische Störungen

Bild 2 zeigt den dramatischen Anstieg des relativen Staudruckverlustes bei einem plötzlichem Rückenwind von 10, 20 und 30 Knoten als Funktion der Geschwindigkeit: selbst mit einem relativ leichten Rückenwind von 10 Knoten reduziert sich der Staudruck um rund 20% (jeweils bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 100 Knoten). Dieser Wert steigt auf rund 40% bereits bei 20 Knoten Rückenwind an!

Besonderes Augenmerk muss daher bei der Flugfreigabe auf die Untersuchungen der Flugzeugreaktion auf atmosphärische Störungen gelegt werden (siehe Kapitel 3). Dies gilt insbesondere für Windscherungen, weil dieses Wetterphänomen das Strömungsfeld um ein Flugzeug nicht nur kurzfristig ändert (im Gegensatz zu einer Böe). Ein ALSR-Manöver, welches daher von den im FCS implementierten Algorithmen ohne Berücksichtigung einer Windscherung vorgeplant wurde, würde daher bei plötzlich auftretender Windscherung unter deutlich anderen Bedingungen geflogen werden als in der „Planung“ vorgesehen.

3 ATMOSPHÄRISCHE STÖRUNGEN

Das Abfangmanöver wird vom FCS selbstverständlich mit einem gewissen Sicherheitsfaktor gegen Störungen geplant – allerdings nur innerhalb gewisser Grenzen, um zu verhindern, dass die Warnungs- und Übernahmegereschwindigkeiten so hoch werden, dass die ALSR von keinem operativen Nutzen mehr ist. Treten daher nach Einleiten des Abfangmanövers deutliche Störungen auf, so kann das Einhalten der Mindestgeschwindigkeit V_{\min} nicht garantiert werden. In diesem Zusammenhang müssen insbesondere Triebwerksausfall sowie Windscherungen (speziell zunehmender Rückwind) betrachtet werden.

3.1 Windscherungen

Eine Windscherung [1,2,3,4] bezeichnet in der Meteorologie eine starke horizontale oder vertikale Änderung der Windstärke – im Extremfall dreht die Windrichtung um 180°. Windscherungen sind eine ganz wesentliche Einflussgröße während eines ALSR-Manövers. Daher wird darauf im folgenden näher eingegangen.

Für die operationelle Flugfreigabe sind 2 Arten von Windscherungen zu berücksichtigen:

3.1.1 Strahlstrom („Jetstream“)

Ein Strahlstrom ist definiert als ein starker, relativ schmaler Windstrom, der mindestens an einer Stelle eine minimale Windgeschwindigkeit von 30 m/s erreicht, wobei Maximalwerte um 60 m/s keine Seltenheit darstellen.

Der Jetstream ist entlang einer nahezu horizontalen Achse in der Troposphäre oder auch in der Stratosphäre konzentriert. Er ist charakterisiert durch starke vertikale und horizontale Windgeschwindigkeits-Gradienten (=Windscherungen). Die Intensität eines Jetstream ist abhängig von der Jahreszeit und vom geographischen Breitengrad.

Während bei Verkehrsflugzeugen für die Freigabe sehr hohe Windscherungen abgedeckt werden müssen (siehe Ref. 3), kann dies im vorliegenden Fall reduziert werden. Dies liegt zum einen darin begründet, dass zur Zulassung von Verkehrsflugzeugen ein gegenüber militärischen Hochleistungsflugzeugen nochmals deutlich höheres Sicherheitsniveau nachgewiesen werden muss – bei höheren Anforderungen an Passagierkomfort und niedrigen Lastfaktoren. Zum anderen nutzen Verkehrsflugzeuge die Strahlströme zum ökonomischen Reiseflug, fliegen aber nur vorsichtig mit einem äußerst geringen Bahnwinkel in den Strahlstrom hinein, so dass die Geschwindigkeitsänderung pro Zeiteinheit auch bei hohen Windscherungen relativ gering ist.

3.1.2 Grenzschichteffekt

Direkt am Boden geht die Windgeschwindigkeit aufgrund von Reibungseffekten in der Grenzschicht gegen Null. Einen starken Sturm vorausgesetzt, kann die maximale Windscherung, die daraus resultiert, durchaus Werte erreichen, die denen in einem Jetstream ähnlich sind.

Allerdings wird sich der Pilot einer solchen Situation sehr wohl bewusst sein und daher kritische Manöver, welche die Geschwindigkeit des Flugzeugs zu sehr verringern, unter solchen atmosphärischen Bedingungen möglichst vermeiden.

3.2 Einfluss auf die ALSR

Die Geschwindigkeit des Flugzeugs gegenüber der Luft (=Airspeed) kann während eines extremen ALSR-Manövers auf Werte von 60-70 kts absinken. Steigt gleichzeitig die rückwärtige Windgeschwindigkeit deutlich an, kann dies zu einem Abfallen der Airspeed auf unter 50kts führen, und eine Departure (d.h. ein vom Steuerungssystem nicht mehr gezielt beeinflussbarer Flugzustand, der zum Verlust des Flugzeugs führen kann) kann nicht ausgeschlossen werden.

Aus diesem Grund wurde die ALSR-Funktion auf Robustheit gegenüber Windänderungen ausgelegt. Windscherungen, die aus Änderungen der Windgeschwindigkeit und/oder der Windrichtung resultieren, wurden berücksichtigt, ebenso wie Böen. Zusätzlich wurde eine umfangreiche Analyse der auftretenden Windscherungen aus mehr als 70 Eurofighter-Flügen durchgeführt (Bilder 7, 8). Für die Freigabe der ALSR-Funktion wurden beide in §3.1 beschriebenen Arten von Windscherungen berücksichtigt (Bild 3).

Das Ergebnis dieser Arbeiten ist, dass das Risiko, während eines ALSR-Manövers durch widrige Windbedingungen in einen kritischen Flugzustand zu kommen, für die Zulassung hinreichend gering ist. Hierbei wurden natürlich auch bestimmte Fehlerfälle sowie der Einfluss weiterer Flugzeugsysteme berücksichtigt.

3.3 Messungen im Flug

Die Ergebnisse der Messungen im Flugtest sind in Bild 3 gezeigt. Es sind Daten über Windscherungen, die in insgesamt 71 Eurofighter-Flügen über der Irischen See und über Süddeutschland gewonnen wurden. Es sind nur Windscherungen für absolute Geschwindigkeitsänderungen >14 kts gezeigt, da niedrigere Werte über die Freigabe für Böen abgedeckt sind.

Die Verteilung der Flüge sowohl hinsichtlich ihrer geographischen Lage als auch hinsichtlich der Jahreszeiten rechtfertigt es, sie als Basis für eine statistische Auswertung zu benutzen, insbesondere da Jetstreams stark von

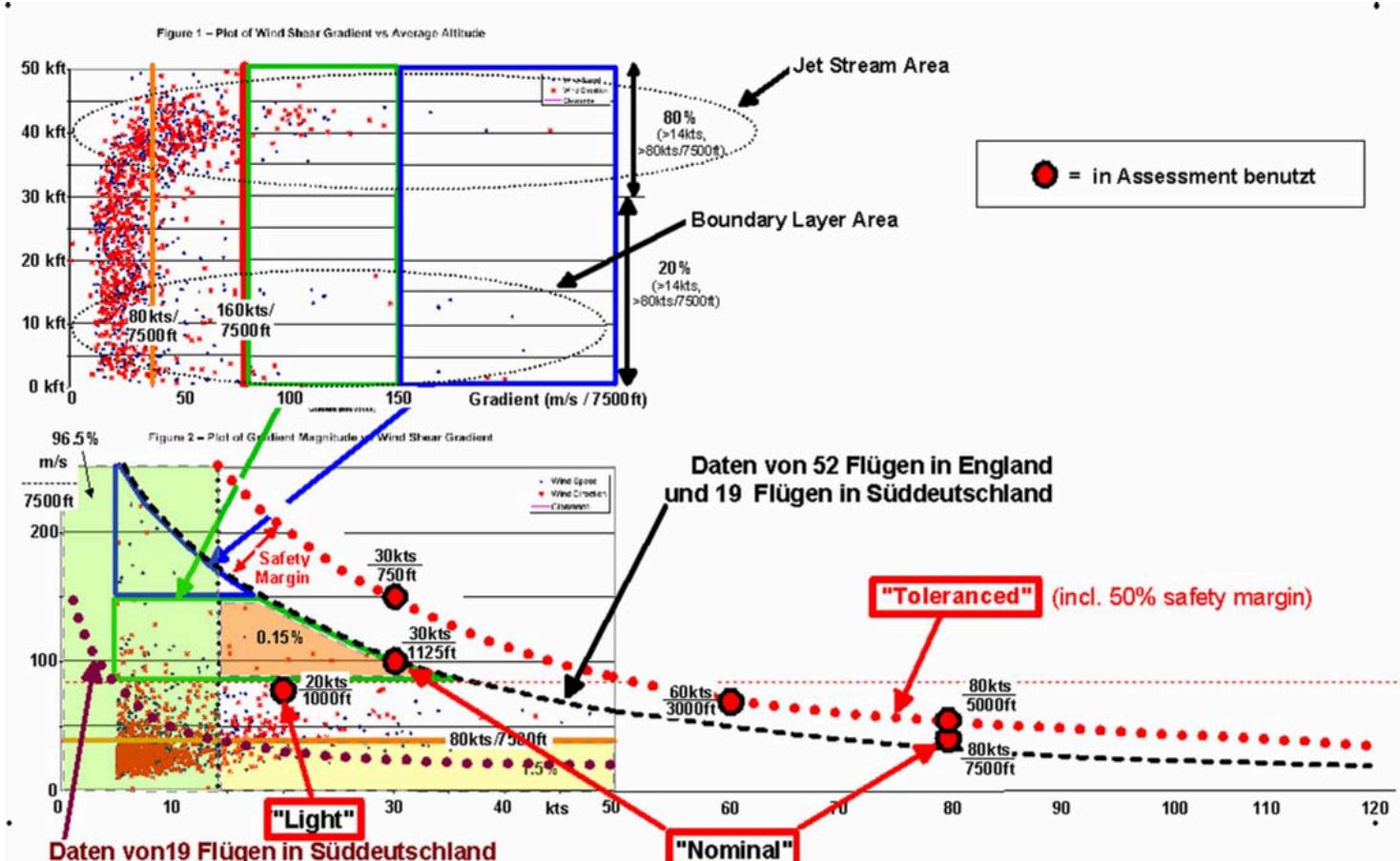


Bild 3: Für die Clearance verwendete Windscherungs-Gradienten [m/s / 7500ft]

der Jahreszeit und dem geographischen Breitengrad abhängen. Erwartungsgemäß zeigte sich, dass die Atmosphäre über Süddeutschland hinsichtlich Windscherungen deutlich ruhiger ist als über der Irischen See.

Bild 3 zeigt auch die zugrunde liegenden physikalischen Phänomene, die prozentuale Verteilung der Messpunkte über den Bereich, sowie die für die vorliegende Aufgabe der Flugfreigabe verwendeten Werte der Windscherung:

- Die Linie der Nominal-Windscherung ist dadurch gekennzeichnet, dass während sämtlicher Messflüge kein einziger Datenpunkt oberhalb dieser Linie lag. Ein Überschreiten dieser Nominal-Windscherung kann daher bereits als relativ unwahrscheinlich angenommen werden, insbesondere unter Berücksichtigung der Tatsache, dass ein Großteil der Daten im Herbst über der Irischen See gewonnen wurden, also in einem Gebiet und zu einer Jahreszeit, wo sehr hohe Windscherungen zu erwarten sind.
- Die Linie der Toleranz-Windscherung ist aus der Linie für Nominal-Windscherung hervorgegangen, indem diese mit dem Faktor 1.5 multipliziert wurde. Dies führt zu sehr hohen Werten, die sicher nur in absoluten Ausnahmefällen überschritten werden, die sich dem Piloten in den allermeisten Fällen be-

reits vorher ankündigen (durch Wettervorhersage, zunehmend unruhige Luft und Erfahrung).

- Eine leichte Windscherung ist für die Clearance-Arbeiten gekennzeichnet durch den Punkt 20kts/1000ft. Sie spiegelt einen Wert wieder, der höher liegt als für rund 99% der gemessenen Datenpunkte.

3.4 Jahreszeitliche Schwankungen

Wie in Ref. 6 beschrieben, haben Häufigkeit und Intensität von Windscherungen nicht nur eine deutliche Höhenabhängigkeit, sondern sind auch stark von jahreszeitlichen Schwankungen geprägt (siehe Tabelle 1). Nach dieser Studie ist die Wahrscheinlichkeit einer Windscherung mit einer Größenordnung von $\Delta V \geq 80$ kts (über ein Höhenband von ± 3.5 kft) ungefähr 3×10^{-3} .

Tabelle 1 zeigt, dass die Jahreszeiten mit den höchsten Windscherungen Frühling und Herbst sind, was sich auch mit der Alltagserfahrung hinsichtlich der besonders windigen Monate deckt. Man wird daher versuchen, Flugtests und insbesondere die turnusmäßig wiederkehrenden ALSR-Trainingsflüge für Piloten in die unkritischeren Monate zu legen.

H [kft] (± 3.5 kft)	Windshear occurrences [%]												
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
5	-	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2	0.2	-
10	-	0.2	-	0.2	-	-	-	-	-	0.2	-	-	-
15	-	-	-	1.0	-	0.2	-	-	-	0.5	0.2	0.2	0.2
20	0.6	1.6	3.5	2.4	0.3	0.4	-	-	0.6	2.0	2.6	1.6	1.3
25	0.4	0.4	0.5	0.3	-	0.4	0.2	-	0.4	1.0	0.7	0.5	0.4
30	-	-	0.4	-	-	-	0.2	-	-	-	0.4	-	0.1
35	0.4	0.4	0.6	0.5	0.2	0.4	0.2	-	-	0.2	0.4	0.9	0.3
40	0.8	0.7	0.2	-	0.2	0.6	-	-	0.4	0.2	0.2	0.4	0.3

Tabelle 1 Windscherungen mit $\Delta V \geq 80$ kts (über ein Höhenband von ± 3.5 kft) über Mecklenburg-Vorpommern (Ref. 6)

4 CLEARANCE

Die ALSR-Funktion muss als Teil der Flugzeugfunktionalität auch zugelassen werden. Die geringe Geschwindigkeit gegenüber der Luft, verbunden mit einer deutlichen Höhenänderung während des Manövers, machen das Flugzeug in diesem Teil der Envelope sehr sensiv gegenüber Änderungen von Windgeschwindigkeit und Windrichtung.

4.1 Einsatzszenarien

Die ALSR-Funktion muss für die folgenden 3 Einsatzszenarien zugelassen werden:

4.1.1 Notfallfunktion

Dies ist die Kernaufgabe der ALSR-Funktion. Die Freigabe hierfür erfolgt mit möglichst wenig operationellen Einschränkungen für den Piloten. Die einzigen Einschränkungen sind derart, dass die meisten Piloten sie auch intuitiv richtig durchführen würden:

- Sobald die ALSR-Warnung ausgelöst wird: Schub erhöhen, zum nächsten Horizont rollen und ziehen (für Details siehe Ref. 5).
- Manöver, bei denen absehbar ist, dass sie mit hohem Flugwindneigungswinkel bei niedriger Geschwindigkeit enden, müssen vermieden werden, wenn hohe Windscherungen (z.B. Jetstreams) vorhergesagt sind.

Es wird angenommen, dass der Pilot diese Funktion in weniger als 500 Flugstunden einmal nutzt. Dies erscheint realistisch, da nicht nur der bevorzugte Einsatzbereich für ein derartiges Flugzeug bei höheren Geschwindigkeiten liegt, sondern auch der Pilot bei Annäherung an die untere Geschwindigkeitsgrenze des Flugbereichs eine akustische und optische Warnung erhält und die Funktion nur dann eingreift, wenn die vorgeschriebene Prozedur (siehe oben) vom Piloten falsch oder gar nicht durchgeführt wird.

4.1.2 Training

Das absichtliche Auslösen der ALSR-Funktion im Training muss gesondert freigegeben werden, da die zugrundeliegenden Annahmen, insbesondere hinsichtlich Auslösehäufigkeit und Wetterlage, ganz anders sind als bei der Nutzung als Notfallfunktion.

Um sicherzustellen, dass das bewusste Auslösen der ALSR-Funktion zu Trainingszwecken nicht nur sicher ist, sondern dass auch unterschiedliche ALSR-Manövertypen erfolgen können, wurden einige wenige Manöver sowie die dazugehörigen Limits definiert. Es wurde angenommen, dass der Pilot einmal im Jahr das Auslösen der ALSR-Funktion im Training übt und diese dabei dreimal auslöst (dies entspricht einmal in mehr als 50 Flugstunden).

Diese Manöver müssen, da sie nicht eine Notsituation „entschärfen“, sondern aus einer sicheren Fluglage heraus ausgelöst werden, gemäß den normalen Regeln für „Carefree Flying“ untersucht und freigegeben werden. Zusätzlich wurden verschiedene Windscherungen und Böen analysiert.

4.1.3 Flugtest

Für den Flugtest kann davon ausgegangen werden, dass die Windbedingungen im Testgebiet sehr gut bekannt sind. Dies wird insbesondere dadurch sicher gestellt, dass unmittelbar vor dem ALSR-Flugtest ein Steigflug durch den für den Test relevanten Höhenbereich durchgeführt wird („Wind Profile Climb“) und die aktuellen Winddaten innerhalb kürzester Zeit im Testcenter ausgewertet werden. Dem Piloten wird dann mitgeteilt, ob der ALSR-Testflug durchgeführt werden kann, verbunden mit einer Empfehlung bezüglich der besten Höhe und Richtung.

Zusammen mit der Überwachung des Fluges durch Telemetrie ergibt sich wiederum ein gesondert zu betrachten-

des Szenario (z.B. hinsichtlich Auslösehäufigkeit, Flugzeugzustand und Wetterlage).

4.2 Statistische Betrachtungsweise

Das diesbezügliche Vorgehen wird hier am Beispiel der Windscherungen verdeutlicht, die eine überragende Bedeutung bei der Clearance der ALSR-Funktion haben.

Wie bei jeder anderen Funktionalität im Flugzeugbau kann auch für die ALSR-Funktion keine 100%-ige Sicherheit gewährleistet werden. Um dennoch sicherzustellen, dass die Funktion auch unter ungünstigen Randbedingungen ausreichend sicher arbeitet, um eine bestimmte „Gesamtsicherheit“ des Flugzeugs nicht zu unterschreiten, wurden daher für jedes Einsatzszenario folgende Wahrscheinlichkeiten kombiniert:

- P_{ALSR} (Wahrscheinlichkeit, dass beim jeweiligen Einsatzszenario die ALSR-Funktion ausgelöst wird)
- P_{Scher} (Wahrscheinlichkeit, dass beim jeweiligen Einsatzszenario die maximal freigegebene Windscherung erreicht wird)
- P_{Krit} (Wahrscheinlichkeit eines kritischen Flugzustandes unter den unter P_{ALSR} und P_{Scher} beschriebenen Ereignissen)

Die sich daraus ergebende Gesamtwahrscheinlichkeit für einen kritischen Flugzustand während eines ALSR-Manövers aufgrund einer Windscherung darf einen bestimmten Wert (10^{-x}) nicht überschreiten:

$$P_{Ges} = P_{ALSR} * P_{Krit} * P_{Scher} < 10^{-x}$$

Dies wird durch folgende Vorgehensweise erreicht:

4.2.1 Notfallfunktion

Die Wahrscheinlichkeit, dass die ALSR-Funktion ausgelöst wird, ist relativ gering:

$$P_{ALSR} < 2*10^{-3} \text{ (siehe §4.1.1)}$$

Hinzu kommt, dass sich Pilot und Flugzeug in so einem Fall bereits in einer kritischen Situation befinden, die durch die ALSR-Funktion fast nur besser werden kann.

Daher kann bei der Freigabe von Windscherungen (siehe Bild 3) wie folgt verfahren werden:

- Bei einer Nominal-Windscherung darf kein kritischer Flugzustand auftreten.
- Bei einer Toleranz-Windscherung dürfen nur selten kritische Flugzustände auftreten ($P_{Krit} < 5*10^{-2}$).

4.2.2 Training

Die Wahrscheinlichkeit, dass die ALSR-Funktion ausgelöst wird, ist um den Faktor 10 höher als im Notfall:

$$P_{ALSR} < 2*10^{-2} \text{ (siehe §4.1.2)}$$

Außerdem wird die ALSR-Funktion hier nicht zum Entschärfen einer bereits kritischen Lage (siehe „Notfallfunktion“) verwendet. Der Pilot darf daher erwarten, dass ihn das bewusst eingeleitete ALSR-Manöver auf keinen Fall in eine gefährliche Situation bringt.

Daher muss bei der Freigabe von Windscherungen (siehe Bild 3) anders verfahren werden:

- Bei einer Toleranz-Windscherung darf kein kritischer Flugzustand auftreten.

Um diese harte Bedingung erfüllen zu können, werden nur ausgewählte Manöver für das Training zugelassen, die den Piloten sicher mit allen Möglichkeiten der ALSR-Funktion vertraut machen. Mit dem vorliegenden ALSR-Entwurf wurden die Trainingsmöglichkeiten bewusst vorläufig eingeschränkt, um ein Höchstmaß an Sicherheit bei der Einführung in den Flugbetrieb bei den Luftstreitkräften der EF2000-Partnernationen zu garantieren.

4.2.3 Flugtest

Die Wahrscheinlichkeit, dass die ALSR-Funktion ausgelöst wird, ist während der ALSR-Erprobung 100%:

$$P_{ALSR} = 1$$

Ähnlich wie im Training wird die ALSR-Funktion hier nicht zum Entschärfen einer bereits kritischen Lage verwendet, und das bewusst eingeleitete ALSR-Manöver darf den Piloten möglichst nicht in eine gefährliche Situation bringen.

Die Freigabe von Windscherungen (siehe Bild 3) läuft wie folgt ab:

- Bei einer Nominal-Windscherung (80kts/7500ft) darf kein kritischer Flugzustand auftreten.

Dies ist nur möglich, wenn zusätzlich folgende Vorkehrungen für einen sicheren Flugverlauf sorgen:

- Die Windbedingungen im Testgebiet sind durch einen unmittelbar vorher durchgeführten „Wind Profile Climb“ sehr gut bekannt (siehe §4.1.3).
- Das Flugzeug ist während der ersten Erprobungsflüge mit einer Notfallvorrichtung (Trudelschirm) versehen.

- Während der Testflüge werden die Flugzeug- und die Windparameter von der Bodenstation aus genauestens überwacht.

4.2.4 Triebwerksausfall

Ein einseitiger Triebwerksausfall während eines ALSR-Manövers kann zu sehr kritischen Situationen führen. Da jedoch die Wahrscheinlichkeit hierfür bereits relativ niedrig ist, muss die zusätzlich zu betrachtende Windscherung auch nur in der typischerweise auftretenden Größenordnung sein:

- Bei einer leichten Windscherung (20kts/1000ft) dürfen nur selten kritische Flugzustände auftreten ($P_{Krit} < 5 \cdot 10^{-2}$).

5 VERGLEICH ZUR MANUELLEN LSR

Eine Alternative zur ALSR ist die "Manual Low Speed Recovery" (MLSR), bei der der Pilot ohne "Backup" durch die ALSR auf die "Low Speed Warning" (LSW) reagieren muss. Dabei würde die LSW durch ähnliche Algorithmen generiert werden wie bei der ALSR.

Diese aus Design-Sicht einfache Alternative ist hinsichtlich der Flugfreigabe ähnlich aufwendig wie bei der ALSR. Zum Einen existiert eben kein "Backup" in Form der ALSR, falls der Pilot falsch auf die Warnung reagiert, und zum Anderen führt die ALSR unter gleichen Flugbedingungen immer die gleichen Manöver aus, während der Pilot beim Durchführen eines MLSR-Manövers eine deutlich höhere Bandbreite an möglichen Steuereingaben haben wird, die alle bei den Clearance-Arbeiten berücksichtigt werden müssen.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Eurofighter EF2000 verfügt über ein Langsamflugschutzsystem (ALSR) als Teilfunktion des Flugregelungssystem (Ref. 5), welches erkennt, wenn das Flugzeug sehr stark in Richtung der zulässigen Minimalgeschwindigkeit verzögert und zunächst eine akustische Warnung generiert. Reagiert der Pilot nicht, zu spät oder falsch auf die Warnung, übernimmt die ALSR-Funktion und führt ein Abfangmanöver durch. Nach Abschluss des Manövers erhält der Pilot die Steuerautorität zurück.

Die ALSR-Funktion wurde durch ein aufwändiges Flugprogramm erprobt und demonstriert. Hierfür waren eine Reihe von Sicherheitsmaßnahmen erforderlich, um das Absturzrisiko im Falle einer möglichen Fehlfunktion zu minimieren. Die ALSR-Funktion ist nach einem fehlerfrei und erfolgreich durchgeführten, aufwändigen Flugtestprogramm 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 liegen aus dem Serienflugbetrieb vor. Die weiter zunehmende Anzahl von Flügen in den nächsten Jahren wird weitere Erkenntnisse erbringen, ob die Balance zwischen der Robustheit gegen atmosphärische Störungen einerseits und dem notwendigen Eingriff in die operative Freiheit des Piloten andererseits optimal ist.

7 REFERENZEN

1. *Untersuchung zum bemannten Dynamischen Segelflug*, Alexander Knoll, ISBN 3-931327-95-7, 1995
2. *UK Air Accidents Investigation Branch*, AAIB Bulletin No. 11/2000, Ref: EW/G1999/12/10 Cat.1.1, 2000
3. *Acceptable Means of Compliance and Interpretations*, JAR-25 Large Aeroplanes, Section 2, Change 14, 1994
4. *Strahlströme - Vorkommen und Entstehung*, www.top-wetter.de, 7.2004
5. *Hanel, M., "Automatic Low Speed Recovery - Langsamflugschutz für den Eurofighter: vom Reglerentwurf zum Flugtest"*, DGLR Jahrestagung 2006, Nov. 2006
6. *Windscherung über Mecklenburg-Vorpommern*, Amt für Geoinformationswesen der Bundeswehr, Az 53-15-42, 11.2003