

# LEBENSDAUERVERLÄNGERUNG FLUGKRITISCHER SYSTEME AM BEISPIEL TORNADO FLUGSTEUERUNG

F. Morgenstern, M. Schönig, Dr. Th. Köhler,  
CASSIDIAN, Rechliner Strasse, D-85077 - Manching, Deutschland

## Zusammenfassung

Im Militärflugzeugbau kann sich der Lebenszyklus eines Flugzeugmusters auf Größenordnungen von ca. 50 Jahren ausdehnen.

Mitunter überschreitet damit die tatsächliche Nutzungsdauer oder Nutzungshäufigkeit die ursprünglich für ein Flugzeugmuster spezifizierte. Um den Weiterbetrieb dennoch zu ermöglichen erfordert dies Maßnahmen, durch die insbesondere die Flugsicherheit auch weiterhin entsprechend aufrecht erhalten wird.

Gerade bei Systemen und Geräten, die die Flugsicherheit betreffen, sind aufgrund der erforderlichen Gründlichkeit bei Anpassungen, Nachweisen sowie Überholungsaktivitäten die Aufwände vergleichsweise hoch. In Zeiten schrumpfender Haushalte für militärische Flugzeuge erfordert dies spezielle Vorgehensweisen, um derartige Aktivitäten in einem verkraftbaren Rahmen zu halten, ohne dass die Flugsicherheit beeinträchtigt wird.

Dieses Dokument stellt am Beispiel der Flugsteuerung des TORNADO eine mögliche gestufte Herangehensweise vor.

## 1. EINLEITUNG

Bereits Mitte der 90er Jahre zeigte sich, dass die Nutzungsdauer des TORNADOs die ursprünglich spezifizierte überschreiten würde. Deshalb wurde trinational ein Programm zur Lebensdauerverlängerung gestartet, dessen Ziel es war, diese einerseits mit geringst möglichem Aufwand zu erreichen, andererseits den Erhalt der Flugsicherheit sicherzustellen. Obwohl dieses Programm inzwischen formal abgeschlossen ist, sind Begleitprozesse für die weitere Nutzung des Flugzeugs um die die Lebensdauer betreffenden Aspekte entsprechend erweitert worden.

In diesem Dokument wird die Vorgehensweise in verallgemeinerter Form dargestellt und in Bezug auf allgemeine Überlegungen aus der 'Reliability' und 'System Safety' gesetzt. Die beschriebene Umsetzung konkreter Maßnahmen lehnt sich an die Erfahrungen mit Computern des TORNADO Flugsteuerungssystems an.

## 2. GRUNDSÄTZLICHE BETRACHTUNGEN

### 2.1. Spezifikation der Anwendungsdauer (Useful Life)

Da die Teile eines Flugzeuges 'altern' wird für ein Flugzeug üblicherweise eine Anwendungsdauer spezifiziert, gemäß der es entwickelt und nachgewiesen wird.

Diese Anwendungsdauer wird meist spezifiziert über eine oder mehrere der folgenden Kriterien:

- Die erforderliche Anzahl der Flugstunden (Flight Hours)
- Die erforderliche Anzahl der Betriebsstunden (Operating Hours)
- Die Anzahl der Kalenderjahren (Calendar-Life)

Unter der Anwendungsdauer (Useful Life) ist die Zeitspanne definiert, nach deren Ablauf eine Betrachtungseinheit aus dem Betrieb genommen werden soll (siehe Ref. [1]).

Innerhalb dieser Zeitspanne muss ein wirtschaftlicher Betrieb möglich sein. Ausfälle und Reparaturen sind während dieser Zeitspanne erlaubt.

Die Anwendungsdauer einzelner Flugzeugteile (Strukturteile, Geräte, Kabel etc.) werden je nach deren Art und Natur über entsprechend geeignete Kriterien (Flugstunden, Betriebsstunden, Kalenderjahre, Lastzyklen etc.) definiert. Die jeweilige Anwendungsdauer dieser Teile wird so spezifiziert, dass die Gesamt-Anwendungsdauer des Flugzeuges erreicht werden kann. Dabei gibt es Teile, die über diese Gesamtdauer im Flugzeug verbleiben sollen (z. B. die Flugzeugzelle), andere, die nach bestimmten Nutzungskriterien ein oder mehrmals ausgetauscht, bzw. überholt werden.

## 2.2. Grundsätzliche Alterungseffekte

Je nach Art und Einsatz des jeweiligen Materials, aus dem bestimmte Komponenten gefertigt sind, unterliegt dieses unterschiedlichen Alterungseffekten, bspw. durch

- Temperatur,
- Temperaturwechsel,
- Vibration,
- chemische Veränderungen,
- mechanischen Verschleiß,
- Korrosion,
- Interdiffusion,
- Verschmutzung,
- etc.

## 2.3. Zuverlässigkeits- (Reliability) Betrachtungen

Zu unterscheiden sind ein Defekt (Defect) und ein Ausfall (Failure). Bei einem Defekt verliert ein Teil oder Gerät die Konformität mit mindestens einer seiner spezifizierten Eigenschaften, was aber nicht unbedingt zu einem Ausfall führen muss. Bei einem Ausfall hingegen kann ein vorher einwandfreies Teil oder Gerät aufgrund eines Fehlers seine spezifizierte Funktion nicht mehr ausführen. Die folgenden allgemeinen Betrachtungen werden anhand von Ausfallraten (Failure Rates) durchgeführt, gelten jedoch sinngemäß auch für Defektraten (Defect Rates).

Zahlreiche Versuche zeigen, dass im allgemeinen Fall die Ausfallrate  $\lambda(t)$  typischerweise den Verlauf einer sogenannten 'Badewannenkurve' aufweist. Diese setzt sich aus drei charakteristischen Phasen zusammen (siehe BILD 1):

Phase der Frühausfälle:

$\lambda(t)$  nimmt rasch ab. Fehler in dieser Phase lassen sich in der Regel auf Materialschwächen, Qualitätsschwankungen in der Fertigung oder Anwendungsfehler (Dimensionierung, Prüfung oder Bedienung) zurückführen.

Phase der Ausfälle/Fehler mit konstanter Ausfallrate:

$\lambda(t)$  ist näherungsweise konstant und am geringsten. In dieser Phase treten die Fehler meist plötzlich und rein zufällig auf.

Phase der Verschleissausfälle:

$\lambda(t)$  steigt mit zunehmender Betriebszeit immer schneller an. Fehler in dieser Phase sind auf Alterung, Abnutzung oder Ermüdung zurück zu führen.

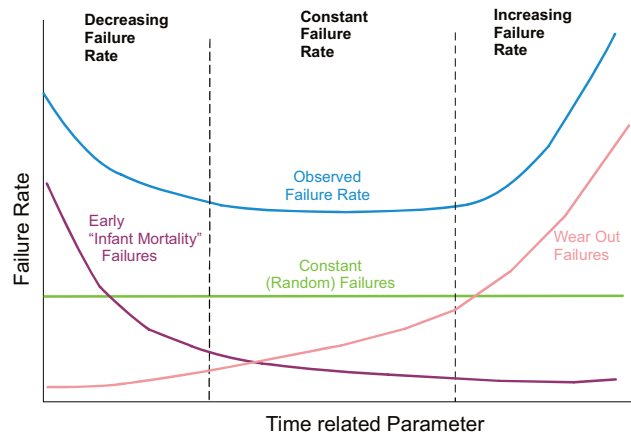


BILD 1. Phasen der Ausfallraten ('Badewannenkurve')

Die Spezifikation der Anwendungsdauer erfolgt im Allgemeinen in Relation zu einer oder mehreren erwarteter 'Badewannenkurven' (siehe BILD 2).

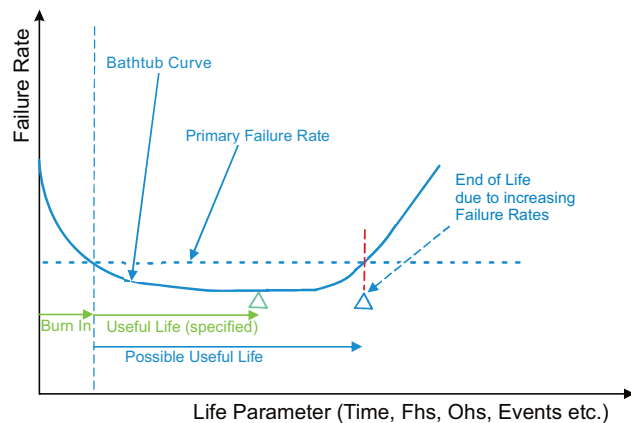


BILD 2. Spezifikation der Anwendungsdauer im Verhältnis zur 'Badewannenkurve'

Die real auftretenden Kurven der Ausfallraten lassen sich nicht eindeutig vorherbestimmen, denn sie werden durch viele zusätzliche Einflussfaktoren beeinträchtigt, bspw.:

- Die zugrunde liegenden Methoden für die Vorhersagen der Ausfallraten basieren häufig auf Erfahrungen aus der Vergangenheit. Es ist jedoch nicht gewährleistet, dass diese Erfahrungswerte auch für die Zukunft richtig genutzt werden können. Dies kann bspw. bedingt sein durch sich verändernde Fertigungstechnologien. Durch die rasant fortschreitende technische Entwicklung in der Halbleitertechnologie waren manche der Formeln zur Abschätzung der Anwendungsdauer zum Zeitpunkt der jeweiligen Technologieentwicklung noch nicht ermittelbar. In diesen Fällen war man auf Felddaten der Hersteller zur Erstellung von Anwendungsdauer-Prognosen angewiesen.
- Die vorhergesagten Ausfallraten hängen stark von den realen Betriebsbedingungen ab (z. B. Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Vibrationen, Temperaturschwankungen, Eigenschaften der Stromversorgung etc.). Die tat-

sächlichen Betriebsbedingungen werden i. d. R. mehr oder weniger von den ursprünglich angenommenen abweichen. Zum Zeitpunkt einer Geräteentwicklung müssen diese Einflüsse sorgfältig abgewogen werden ('Best Engineering Judgement').

- Die lebensdauerbestimmenden Parameter vieler Komponenten sind unterschiedlich, wobei allerdings häufig bestimmte dominieren. Z. B. bei Alterung über Zeit und Temperatur werden vermutlich die Betriebsstunden dominieren, wenn die Betriebstemperatur deutlich höher ist, als bspw. die Lagertemperatur. Dennoch wird dieses Bauteil auch durch Lagerung altern, selbst wenn es nicht betrieben wird.
- Die Einführung unterschiedlicher Baulose zu verschiedenen Zeitpunkten, die lange Produktionsphase eines bestimmten Loses, sowie die Mischung von Geräten unterschiedlichen Alters bei den im Betrieb befindlichen Flugzeugen weichen die Badewannencharakteristik über die Gesamtheit aller ausgelieferten Geräte auf.

Die Auslegung der Geräte und Strukturbauteile, die während der Anwendungsdauer des Flugzeuges nicht ausgetauscht werden sollen, erfolgt normalerweise so, dass nach technischem Stand die tatsächlich erreichbare (unbekannte) Anwendungsdauer ('possible useful life') hinreichend weit nach dem Ende der spezifizierten Anwendungsdauer ('useful life specified') liegt (siehe BILD 2). Aus wirtschaftlichen Gründen kann dieser Abstand allerdings nicht beliebig groß gewählt werden.

TORNADO wurde in den 70ern entwickelt, die Serieneinführung begann in den 80ern. Damit gehört er zu den frühen Flugzeugen mit elektronischem 'Flight Control System'.

Zu dieser Zeit waren die Erfahrungen bezüglich Anwendungsdauern von Computern in derartigen Verwendungen noch relativ gering. Daher wurden Anwendungsdauern nicht allein auf Basis der damals noch raren technischen Erkenntnisse spezifiziert, sondern auch unter Abwägung der Risiken, die man vertreten konnte.

Insbesondere bei sicherheitsrelevanten Anwendungen verwendete man zwar, soweit möglich, bewährte Technologien. Um allerdings die geforderte Leistungsfähigkeit zu erreichen war zu einem großen Teil der Einsatz noch relativ junger Technologien erforderlich, über deren Langzeitverhalten in sicherheitskritischen Flugzeug-Anwendungen man noch relativ wenig wusste. Dort legte man entsprechend der Bedeutung und der Auswirkungen eines möglichen Versagens vorsichtige Annahmen der 'minimalen Anwendungsdauer' zugrunde, die sich nachträglich auch als zu pessimistisch erweisen konnten. Je nach Gerät oder Hersteller, sowie Bedeutung des Gerätes für die

Flugsicherheit des TORNADOs konnten sich deshalb die Spezifikations-Anforderungen bei selbst gleichartiger Technologie unterscheiden.

#### 2.4. Systemsicherheits- ('System Safety') Betrachtungen

Die 'System-Safety'-Analysen analysierten die sicherheitskritische Funktionen mit Hilfe boolescher 'Safety Block Diagrams' unter Verwendung von Ausfall-, bzw. Defektraten. Unter Einbeziehung von geeigneten Betriebszeiträumen (z. B. typische Missionsdauer) wurden daraus Auftretenswahrscheinlichkeiten für Ausfälle berechnet. Aus diesen wurden dann wiederum Wahrscheinlichkeiten für die sogenannten 'Hazards' abgeleitet. Die damalige Methode ist mathematisch weitgehend vergleichbar mit heutigen Fehlerbaumanalysen ('Fault Tree Analyses'). Die Unterschiede liegen hauptsächlich in der grafischen Darstellung.

Je nach ihrem Beitrag zur Gesamt-'Hazard'-Wahrscheinlichkeit wurden entweder Ausfallraten von Geräte-Teilfunktionen (aus DMEAs, 'Defect Mode and Effects Analysis') oder Gesamt-Geräten (konservativer) verwendet.

Die verwendeten Raten entsprechen denen des flachen Teils der 'Badewannenkurven' mit einem gewissen Sicherheitsabstand, d. h. sie basieren auf den 'primary failure rates' in BILD 2. Dies setzt voraus, dass Teile und Geräte zum einen die 'Burn In'-Phase hinter sich haben, zum anderen das Ende ihrer Anwendungsdauer noch nicht erreicht haben.

Da, wie in Abschnitt 2.3 beschrieben die wirklichen 'Badewannenkurven' nicht bekannt sind, ist wegen der daraus resultierenden Rest-Unsicherheiten neben der Einhaltung der spezifizierten Lebensdauern immer noch zusätzlich eine adäquate Überwachung der statistischen Ausfälle ('Reliability Monitoring') im Betrieb erforderlich.

### 3. VORGEHENSWEISE EINER LEBENSDAUERVERLÄNGERUNG ('LIFE EXTENSION') AM BEISPIEL TORNADO

Bei der Lebensdauererweiterung des Gesamtflugzeuges TORNADO wurde bezüglich der Vorgehensweise unterschieden zwischen Flugzeugstruktur, Triebwerken und Systemen/Geräten.

Im Rahmen dieses Dokumentes wird nur die Vorgehensweise für die Systeme und Geräte beleuchtet.

Im Vordergrund standen der Erhalt der Flugsicherheit, sowie die wirtschaftliche Machbarkeit.

Um diese beiden, zunächst gegenläufigen Forder-

ungen erfüllen zu können, war es wichtig, anhand geeigneter Kriterien die Geräte hinsichtlich ihrer Behandlung vorab zu kategorisieren. Deshalb spielen bei der Vorgehensweise die Sicherheitsanalysen eine wesentliche Rolle. Die Kritikalität und Sensitivität der einzelnen Geräte wurde dabei anhand der Systemfunktionalitäten, zu denen sie beitragen, ermittelt, und anhand dessen eine Kategorisierung hinsichtlich ihrer weiteren Behandlung abgeleitet. Anschließend wurden die konkreten Maßnahmen, wo nötig, individuell ausgearbeitet, und schließlich umgesetzt.

Die Vorgehensweise gliedert sich dazu in folgende Phasen.

### **3.1. Phase A: Kategorisierung aller Geräte per Analyse**

Diese Kategorisierung umfasste:

- Geräte, sowie unterstützende Strukturteile
- 'Standardteile' (d. h. Teile, die an mehr als einer Stelle verwendet werden)
- Verkabelung

Für die unterschiedlichen Arten von Verkabelung wurden maßgeschneiderte Bewertungen durchgeführt, auf deren Basis ggf. entsprechende Inspektionen, Tests und weitere Wartungsaktivitäten definiert wurden, die hier nicht weiter detailliert werden.

Für Geräte, sowie unterstützende Strukturteile und für Standardteile wurde eine einheitliche Vorgehensweise definiert.

Zunächst wurden sie hinsichtlich ihrer Kritikalität kategorisiert, sowie auf Vollständigkeit überprüft. Die Ergebnisse wurden in einem entsprechenden Bericht niedergelegt, um die Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten.

Die flugsicherheitsrelevanten Geräte und Teile wurden wiederum verschiedenen Gruppen zugeordnet. Im Wesentlichen umfassen diese Gruppen Geräte, die ausgetauscht werden müssen, solche, bei denen die Anwendungsdauer überzogen werden kann, und schließlich solche, bei denen voraussichtlich durch Nachqualifikation und/oder Überholungsmaßnahmen die Anwendungsdauer verlängert werden kann.

Die Kategorisierung erfolgte zunächst nach einem groben Schema, und wurde dann in verschiedenen Stufen unter Berücksichtigung der individuellen Gegebenheiten im Detail, wie bspw. Redundanzgrade, Beitrag zum Gesamtwahrscheinlichkeitsbudget, individuelle mildernde oder verschlimmernde Faktoren, verfeinert.

Für jedes sicherheitsrelevante Gerät oder Teil wurde dazu ein Formblatt erstellt, das die notwendigen

Schlüsselinformationen enthielt, wie die Systemzuordnung, Gerätebezeichnungen, -Codes, technische Beschreibung, sowie lebensdauerrelevante Informationen und Empfehlungen.

### **3.2. Phase B: Abgleich mit Operationeller Nutzung und Erfahrung**

Um auch den Anforderungen des operationellen Betriebs gerecht zu werden, wurden für die Entscheidung über den tatsächlichen Umgang mit den Geräten weitere Aspekte mit einbezogen, die sie unabhängig von der sicherheitsbezogenen Kategorisierung in Phase A betroffen hätten. Dabei kamen ökonomische Aspekte, wie bspw. ohnehin geplante Modernisierungen, ökonomische Angemessenheit von Überholungsmaßnahmen, Obsoleszenz usw. mit ins Spiel.

### **3.3. Phase C: Ausarbeitung und Umsetzung der Maßnahmen**

In dieser Phase wurden Maßnahmen für Geräte/Teile ausgearbeitet, die für eine Verlängerung ihrer Anwendungsdauer durch Nachqualifikation und/oder Überholungsmaßnahmen in Frage kamen, sofern der zugehörige Hersteller einen akzeptablen Vorschlag bieten konnte. Andernfalls musste das Gerät entsprechend in Richtung der sicheren Seite noch einmal umgruppiert werden.

Bei einem akzeptablen Herstellervorschlag wurden die Maßnahmen detailliert erarbeitet, eine erweiterte Qualifikation durchgeführt, sowie die DDPs ('Declaration of Design and Performance') mit den neuen Lebensdauerangaben aktualisiert.

### **3.4. Erweiterung der Flugzeug-Zertifizierung**

Die Erweiterung der Gesamt-Flugzeug Zertifizierung geschah mit einem Flugzeug-DDP 'Supplement', das sich auf den Lebensdauererweiterungsprozess, die zugehörigen Berichte, sowie auf eine vollständige Liste mit Lebensdauerinformationen über die Geräte/Teile (s.u.) bezog.

### **3.5. Liste der Geräte/Teile mit Lebensdauerinformationen**

Um einen schnell zugänglichen und vollständigen Überblick über alle Geräte/Teile im Flugzeug und deren Lebensdaueraspekte herzustellen wurde eine Liste erstellt, die alle Geräte, deren Bauzustandsvarianten, Kategorien, Maßnahmen, sowie wichtige technische Zusatzinformationen, Metadaten und Verweise enthielt.

### 3.6. Umgang mit Modifikationen

Um die Vollständigkeit der Lebensdauerbetrachtung über die Zeit sicher zu stellen, müssen neben den Ausgangs-Konfigurationen zu Beginn des Lebensdauer-Verlängerungsprozesses laufende und zukünftige Modifikationen mit berücksichtigt werden. Der Prozess der Lebensdauererweiterung eines Flugzeuges kann mehrere Jahre in Anspruch nehmen. Währenddessen, sowie danach, werden Geräte und Teile des Flugzeugs immer wieder verändert. Entsprechende Vorgehensweisen müssen etabliert werden.

Sinnvollerweise erweitert man die bestehenden Modifikationsprozesse mit entsprechenden Kriterien, Schnittstellen und Zusatzprozessen.

Die Kriterien im Detail hängen von den bestehenden Modifikationsprozessen selbst ab. In der Regel spielen die Modifikationen eine Rolle, bei der sich fliegende Hardware ändert.

Wichtige Aspekte hierbei sind die Anwendungsdauer selbst, Überholzyklen, Einführung neuer Teile, Systemveränderungen oder veränderte Nutzung. Entsprechend muss auch die Vollständigkeit anhand geeigneter Listen und Datensätze am Ende wieder sichergestellt werden.

## 4. BEISPIEL FÜR DIE LEBENSDAUER-VERLÄNGERUNG EINES FLUGZEUG-COMPUTERS

Die einzelnen Maßnahmen zur Lebensdauererweiterung bestimmter Geräte durch Nachqualifikation oder im Rahmen der Einführung einer Wartungs-/Überholungsstrategie sind stark abhängig vom Design, Verfügbaren Werkzeugen und Hilfsmitteln, bzw. wirtschaftlichen Aspekten.

Das folgende Beispiel orientiert sich an den Maßnahmen zur Lebensdauererweiterung von Computern der TORNADO Flugsteuerung. Es handelt sich um eine Nachqualifikation basierend auf der Anwendung einer Überholungsprozedur.

### 4.1. 'Sampling'

Nicht immer ist der aktuelle Gerätezustand nach Jahren Betrieb dem jeweiligen Gerätehersteller bekannt, insbesondere, wenn Wartung, Pflege und Nachrüstung vom Betreiber selbst, ohne kontinuierliche Einbindung des Herstellers geschehen. In solche Fällen ist die Detailuntersuchung einer Anzahl repräsentativer Geräte mit möglichst schon langer Nutzungsdauer ('Sampling') zu Beginn angebracht. Das 'Sampling' liefert wertvolle Hinweise auf abweichende Trends gegenüber früheren

Annahmen, sowie auf besonders sensible Bereiche.

Neben visuellen Prüfungen auf alle möglichen Arten sichtbarer Alterseinflüsse (auch mikroskopisch), Abweichungen zum aktuellen Soll-Bauzustand, Korrosion und Verschmutzung kommen mechanische, elektrische Tests, sowie unterschiedlichen Materialanalysen zum Tragen. Ein besonderes Augenmerk sollte auch auf Aspekte gelegt werden, die in Konsequenz das Altern von Komponenten fördern. Ein Beispiel hierfür ist die Verschlechterung der Güte von Versorgungsspannungen, die zu stärkerer Erhitzung von Bauteilen, und damit zu schnellerer Alterung führen können.

### 4.2. Analyse der Reparatur-Aufzeichnungen aus dem operationellen Betrieb

Die Reparaturaufzeichnungen ergänzen das aus dem 'Sampling' gewonnene Bild um zusätzliche Inhalte, sowie um Häufigkeitsdaten.

### 4.3. Überholungsprozedur

Basierend auf den Ergebnissen der beiden vorherigen Schritte wurden individuelle Überholungsprozeduren für die Computer erstellt, mit deren Anwendung die jeweilige Anwendungsdauer um eine zusätzliche Zeitspanne bezüglich Betriebsstunden und Kalenderjahren verlängert werden konnte.

Bei diesen Prozeduren kamen Methoden zum tragen, wie sie auch während des 'Samplings' angewandt wurden, jedoch individuell auf die verschiedenen Module und Komponenten maßgeschneidert. Neben den üblichen Acceptance Tests wurden weitere stückbezogene Gesamtgerätestests ergänzt, sowie Kennzeichnungsregeln eingeführt.

## 5. LEBENSDAUERVERLÄNGERUNG UND 'RELIABILITY MONITORING'

Maßnahmen, wie im vorigen Abschnitt beschrieben, sind für die Weiterbetriebsbarkeit eines Gerätes notwendig, jedoch meist allein nicht hinreichend. Da sich, wie in Abschnitt 2.2 gezeigt, die real auftretenden Ausfallkurven ('Badewannenkurven') auch trotz inzwischen verbesserter Vorhersagemöglichkeiten nach wie vor nicht eindeutig bestimmen lassen, ist ein zusätzliches 'Reliability Monitoring' im Betrieb erforderlich. Dies gilt zwar unabhängig von einer eventuellen Lebensdauererweiterung, wird allerdings mit steigendem Gerätealter immer bedeutsamer für den Fall, dass sich die tatsächlich erreichbare Anwendungsdauer letztlich doch als kürzer erweist, als die angenommene.

Für das 'Reliability Monitoring' wird typischerweise ein Schwellwert definiert, der etwas unterhalb der er-

warteten 'Primary Failure Rate' liegt (siehe BILD 3).

Die Störmelde- und Instandsetzungsprozesse dienen häufig nicht allein dem 'Reliability Monitoring', sondern berücksichtigen auch Kriterien, wie die Erfüllung von Verfügbarkeitsanforderungen an das Gesamtflugzeug, sowie wirtschaftliche Aspekte. Daher wird zum Teil bei komplexeren Geräten, wie bspw. Computern häufig eine Fehleranalyse nur bis zu einer bestimmten Tiefe betrieben, und es werden ggf. auch Teile getauscht, die nicht unbedingt fehlerhaft sein müssen. Das erhöht zwar den materiellen Aufwand, stellt jedoch die schnelle Einsatzbereitschaft wieder her, und verringert außerdem den Arbeitsaufwand für detaillierter Fehlersuche. In diesen Fällen kann man anstelle der Ausfallrate Ersatzkriterien verwenden, wie bspw. die Rate von gemeldeten Ereignissen ('Arising-Rate'), die allerdings auch Meldungen enthalten kann, denen kein wirklicher Fehler zugrunde liegt. Wichtig bei derartigen Ersatzkriterien ist, dass diese immer zur sicheren Seite hin tendieren.

### 6. ZUSAMMENFASSUNG

Die beschriebene Methode der Lebensdauererlängerung wurde erfolgreich bei TORNADO durchgeführt. Anstelle eines grundsätzlichen Austauschs aller Geräte und Teile, die ihre spezifizierte Anwendungsdauer erreicht haben, bietet sie die Möglichkeit eines differenzierten, und damit wirtschaftlich günstigeren Vorgehens, ohne dabei die Flugsicherheit negativ zu beeinträchtigen.

### 7. REFERENZEN

- [1] Birolini Alessandro, Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme, Theorie, Praxis, Management, Dritte Auflage, 1991, Springer Verlag
- [2] Reliability Information Analysis Center, RIAC, System Reliability Toolkit, 2005
- [3] DIN EN 62308, Zuverlässigkeit von Geräten – Verfahren zur Zuverlässigkeitsbewertung

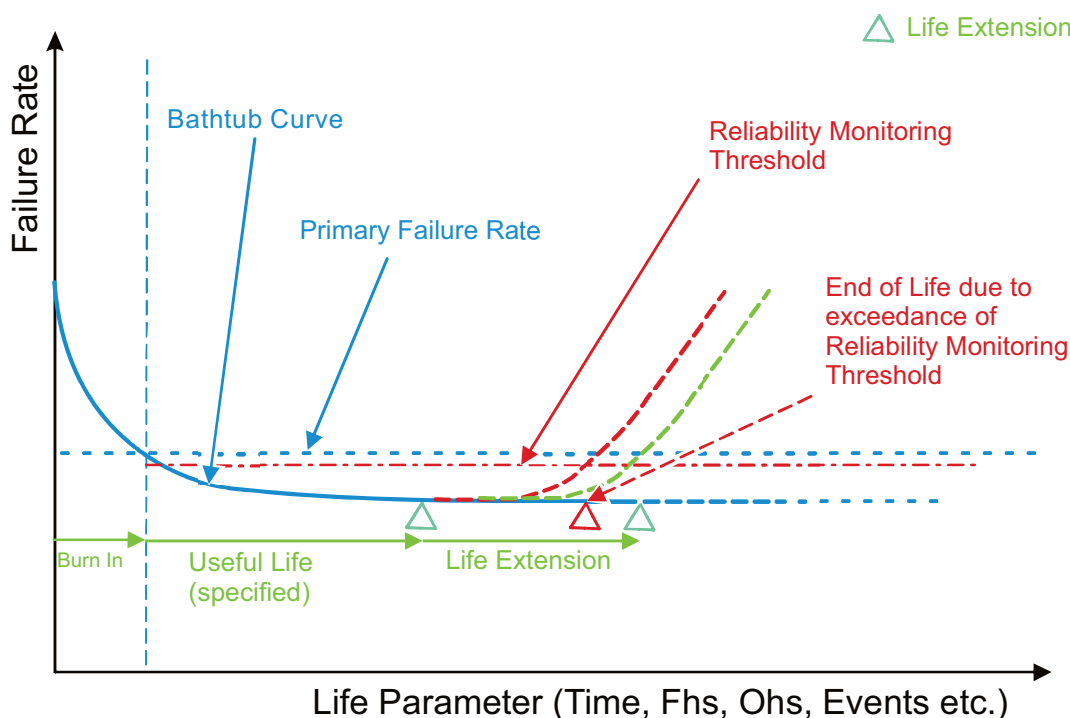


BILD 3. Lebensdauererlängerung und 'Reliability Monitoring' im Kontext der 'Badewannenkurve'