

# ERFASSUNG VON UMWELTDATEN ZUR VORHERSAGE DER VERFÜGBARKEIT VON AIRCRAFT ELECTRONIC

J. Willkens (Dipl.-Ing. FH)  
Diehl Aerospace GmbH  
88662 Überlingen  
Deutschland

## Zusammenfassung

Umweltdaten von Flugzeugelektronik werden gerätespezifisch erfasst, damit Vorhersagen bezüglich der Zuverlässigkeit elektronischer Geräte und Systeme exakter getroffen werden können.

### 1. AUSLEGUNG VON FLUGZEUGELEKTRONIK

Die Umweltbedingungen, die tatsächlich bei Geräten im Einsatz vorliegen, sind nicht oder nur unzureichend bekannt. Die Entwicklungen der Avionik Baugruppen basieren auf den ungünstigsten Umweltbedingungen als Auslegungsparameter. Diese werden nicht nur für die Auslegung der elektrischen Schaltungen verwendet, sondern auch für Entwicklungstests, Robustness Tests und zur Vorhersage der theoretisch zu erwartenden Zuverlässigkeit der Geräte beim Betrieb. Genauere, gerätespezifische Kenntnisse in Bezug auf die im Betrieb durchschnittlichen und speziellen Umweltbedingungen in Verbindung mit einer Ereignisaufzeichnung (z.B. Fehlerereignisse) könnten in vielen Bereichen der Entwicklung zur Erhöhung der allgemeinen Zuverlässigkeit genutzt werden und zu einer genaueren Vorhersage der theoretisch zu erwartenden Zuverlässigkeit. Die im Zusammenhang mit Fehlerereignissen gespeicherten Umweltbedingungen können auch zur effizienteren Reparatur von Geräten verwendet werden.

### 2. ZUKÜNFTIGES KONZEPT

Detailliertere Informationen über die Umweltbedingungen eines Systems erhält man im laufenden Betrieb nur durch Aufzeichnen und Auswertung unterschiedlicher Messwerte. Für die Erfassung realer Umweltdaten der individuellen Baugruppen sind daher zusätzliche Messschaltungen notwendig.

Zunächst wurde untersucht, welche Umweltparameter im Besonderen für die Belastung der Komponenten verantwortlich sind (siehe BILD 1).

Gegen einige dieser Umwelteinflüsse können wirksame Schutzmaßnahmen getroffen werden, z.B. ist eine Lackierung der Leiterplatte ein wirksamer Schutz gegen Feuchte- und Staubkontamination. Elektromagnetische Störungen lassen sich durch Gehäusematerial (Metall) und Schutzelemente (Suppressordioden) unterdrücken. Andere Einflüsse können nicht oder nur mit unverhältnismäßig aufwändigen Gegenmaßnahmen kompensiert werden. Solche kritischen Einflüsse sind, bedingt durch gegebenenfalls thermisch nicht kontrollierte Einbaorte, die Temperatur bzw. Temperaturänderungen sowie Beschleunigungsereignisse (Vibration / Stoß). Durch unterschiedliche Temperaturkoeffizienten der verschiedenen Materialien in einem Gerät entstehen mechanische Spannungen, die durch Stoßereignisse zu Materialbrüchen oder Kontaktverlusten führen können.

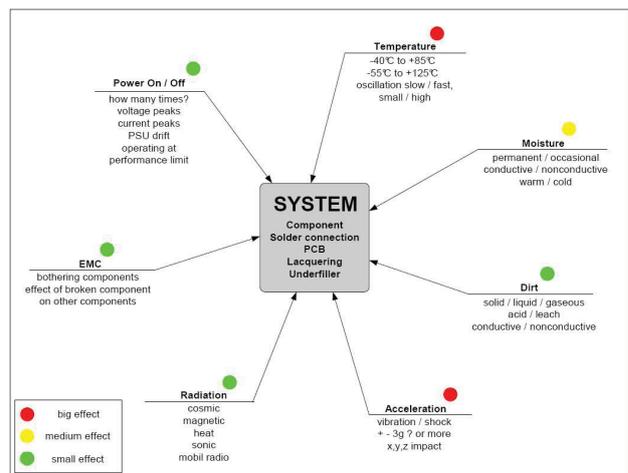


BILD 1: Relevante Umweltparameter

Somit wirken sich diese Ereignisse besonders negativ auf die Haltbarkeit und Betriebssicherheit der Bauelemente aus. Temperatur und Stoßereignisse sind somit Schlüsselindikatoren und sollen qualitativ wie quantitativ durch ein Messsystem registriert werden.

### 3. ÜBERLEGUNGEN ZUR DATENERFASSUNG

Für die Erfassung der Umweltdaten sind zusätzliche elektronische Bauteile nötig, da die bestehenden Baugruppen der Avionik für diese Messaufgaben nicht spezifiziert wurden. Allerdings unterliegt die zusätzliche Messelektronik ebenfalls den gleichen Stressfaktoren und Alterungsprozessen wie die zu untersuchenden Baugruppen, so dass alterungsbedingte Messfehler bei der Auswertung berücksichtigt werden müssen.

Eine weitere Herausforderung stellt die mögliche Beeinträchtigung der Avionik Baugruppe durch die Messeinrichtung selbst dar. Wenn Daten über Bauelemente ermittelt werden sollen, sind Messgrößen (z.B. Spannung, Strom) direkt vom Prüfling abzuleiten. Ein Fehler in der Messeinrichtung darf daher die eigentliche Gerätefunktion nicht beeinflussen oder zu einem Ausfall der gesamten Baugruppe führen.

Eine sinnvolle Ergänzung zu den Messungen in den Avionik Baugruppen können begleitende Untersuchungen äquivalenter elektronischer Schaltungen unter kontrollierten Umweltbedingungen sein. Neben den unterschiedlichen aktiven Bauteilen (Transistoren, IC's, PLD's) können auch alterungsbedingte Änderungen passiver Elemente untersucht werden. Ebenfalls sollten

die Schaltungen der Umweltdatenerfassung mit untersucht werden, um Kompensationsdaten für eventuell notwendige Fehlerkorrekturen zu erhalten. Zur Gewinnung von Referenzdaten für die Messschaltung werden äquivalente Avionik Testschaltungen mit Sensoren versehen. Die Daten werden mit geeichten Messmitteln aufgenommen. Als geeignetes Mittel zur Erzeugung der verschiedenen Umweltbedingungen dienen die Highly Accelerated Stress Screening (HASS) Tests aus dem Produktionsprozess.

#### 4. MESSSYSTEM FÜR AVIONIKBAUGRUPPEN

Wesentliche Eigenschaften eines generischen Messsystems für den Einsatz in einer operativen Baugruppe sind:

- Geringe Hardwarekosten & Gewicht
- Einfache Integration in das Zielsystem
- Einfaches Auslesen der Umweltdaten
- Vernachlässigbare Auswirkung auf die MTBF oder die Funktionalität des Gesamtsystems im Fehlerfall der Messschaltung.

Grundsätzlich werden für die Aufgabe Sensoren benötigt, die die Umweltdaten physikalisch erfassen. Zusätzliche CPU Ressourcen bearbeiten die anfallenden Sensordaten und speichern die Werte in nichtflüchtige Speicherbausteine ab.

##### 4.1 Messmodul Kommunikation

Als weiteres Merkmal stellt das Messsystem neben der Datenerfassung und -Speicherung eine Kommunikationsschnittstelle zur Verfügung. Da die Messdaten nur während der Wartungsphase einer Baugruppe ausgelesen werden und die Datenmengen überschaubare Größen im KBit Bereich haben, bietet sich die Nutzung einer UART / RS-232 Schnittstelle an.

##### 4.2 Messmodul CPU, Speicher

Mit einer Erfassungsrate von 1/min für Temperatursensoren und 1/2msec für Beschleunigungssensoren werden Prozessorleistungen im unteren MHz Bereich erwartet. Dadurch können preiswerte 8-16 Bit Microcontroller für industrielle Anwendungen eingesetzt werden.

Ein organisiertes Speichermanagement ist erforderlich, damit unterschiedliche Systemereignisse wie:

- Betriebsstunden der Baugruppe
- Verweilzeiten in definierten Temperaturbereichen
- Dynamische Temperaturänderung
- Beschleunigungsintensität
- Beschleunigungsdauer
- Anzahl mechanischer Stöße
- Intensität mechanischer Stöße

effizient abgelegt werden können.

Eine sequentielle 1 Byte/sec Speicherung würde beispielsweise ein Datenvolumen von ca. 200Mbyte je Sensor über die gesamte Lebenszeit einer Avionik Baugruppe generieren und damit preiswerte Speicherlösungen verhindern. Durch eine matrixorientierte Datenstruktur lassen sich die

Informationen wesentlich platzsparender ablegen.

Der absolute Zeitbezug dieser Daten geht dabei zwar verloren, wichtige Daten wie Anzahl und Intensität von Ereignissen werden aber registriert.

Durch dieses Speichermanagement kann der Speicherbedarf mit < 100kBit angenommen werden. Hier bieten sich preiswerte EEPROM oder FRAM Lösungen an

##### 4.3 Messmodul Sensoren

Geeignete Sensoren beinhalten neben der analogen Datenmessung auch eine Digitalisierung der Messwerte sowie eine etablierte Schnittstelle zur CPU. Hier sind serielle Busse wie SPI oder I2C bevorzugte Lösungen. Temperatursensoren sollten zumindest den operativen Bereich der Avionik Baugruppe umfassen. Die Beschleunigungssensoren sollten eine 3-Achsenmessung sowie die Möglichkeit zur Erfassung von Stoßereignissen bieten. Zusätzliche Mechanismen für eine Selbstdiagnose der Sensoren verbessern die Integrität der Messwerte.

##### 4.4 Speicher Algorithmen

Bedingt durch die geforderte Lebenszeit (>20Jahre) als auch durch die Häufigkeit der Speicherzugriffe müssen Maßnahmen zur Schonung der Speicherzellen getroffen werden. Je nach verwendeter Technik sind Schreibzugriffe zwischen  $1 \times 10^5$  bis  $1 \times 10^6$  zulässig; auch Ferroelectric RAM Zellen sind nur theoretisch unendlich oft beschreibbar:

- Wie kann die Zugriffshäufigkeit reduziert werden?
- Wie können mögliche Datenverluste reduziert werden?

Die Speicherzugriffe können im Vergleich zu dynamischeren Systemen deutlich seltener ausfallen. Betrachtet man beispielsweise eine mögliche Temperaturänderung des Gesamtsystems, so sind hier Änderungen  $< 5^\circ\text{C}/\text{min}$  zu erwarten. Genauso interessieren bei den mechanischen Schockwerten nur die Anzahl der eingetretenen Ereignisse und deren Stärke. Diese Daten können in einem Erfassungszyklus im  $\mu\text{P}$  Register gehalten und beispielsweise alle 10 min gesichert werden. Bezogen auf die gesamte Laufzeit der Baugruppe ist ein eventueller Datenverlust von 10 min vernachlässigbar. Desweiteren kann der Datenspeicher in 2 oder mehrere Blöcke geteilt werden, die dann abwechselnd mit dem kompletten Datensatz beschrieben werden. So wären bei Verlust eines Blockes immer noch die gesamten Daten abzüglich eines Blockzyklus vorhanden.

Bei einer Speicherzeit in 10 min Abstand ergibt sich eine geschätzte Zugriffszahl von ca. 350.000 während der kompletten Lebenszeit der Avionik Baugruppe

Mit einer Aufteilung in 2 Speicherblöcke und einem symmetrischen Wechselzyklus reduzieren sich die Schreibzugriffe auf etwa 175.000 und sind damit in der nutzbaren Größenordnung gängiger Flash oder EEPROM Bausteine inklusive zusätzlicher Sicherheitsreserven.

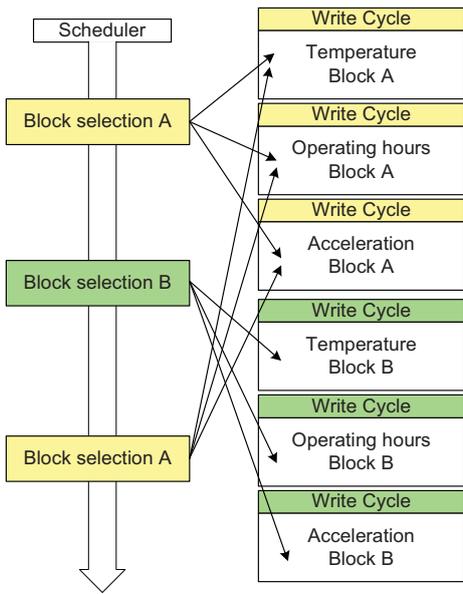


BILD 2: Blockorientierte Datenspeicherung

**5. INTEGRATION DES MESSSYSTEMS**

Für die Integration des Messsystems in die Avionik Baugruppe sind verschiedene Ansätze vorstellbar:

- Als autarke Baugruppe ohne Verbindung zum Prüfling. Alle Elemente der Messelektronik befinden sich in einem eigenen Modul, das als COTS Element in die Avionik Baugruppe eingebunden wird.
- Als semi-integrierte Baugruppe, die zwar autark operiert aber Verbindung zum Prüfling hat (Kommunikation, Verteilung der Sensoren im System).
- Als vollintegrierte Lösung, die vorhandene Strukturen nutzt (CPU, Speicher) und nur die Sensorik und fehlende Elemente ergänzt.

**5.1 Messsystem als autarke Baugruppe**

- Unabhängige Messsystem Plattform
  - + Wiederverwendbare Lösung
  - + Einheitliches Datenauswertungssystem
  - Erhöhter Bauteilaufwand, eigene Leiterplatte

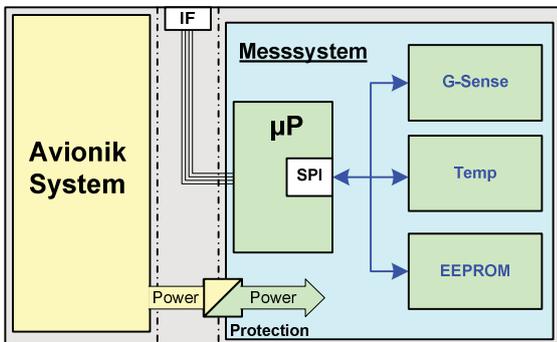


BILD 3: Autarkes Messsystem

**5.2 Messsystem als semi-integrierte Baugruppe**

- Einbinden vordefinierter HW Strukturen ins Zielsystem
  - + Teilweise wiederverwendbare Lösung
  - + Einheitliches Datenauswertungssystem
  - Zusätzlicher Designaufwand im Zielsystem
  - Erhöhter Bauteilaufwand

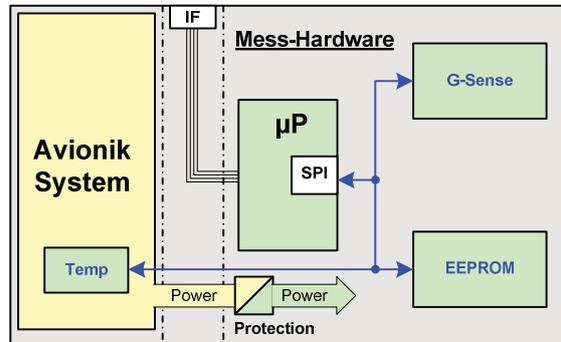


BILD 4: Semi-Integrierte Baugruppe

**5.3 Messsystem als integrierte Baugruppe**

- Nutzung der vorhandenen Ressourcen (CPU, Speicher)
  - + Gute Einbindung in das Maintenance System
  - Einflussnahme ins Avionik System
  - Geringe Wiederverwendbarkeit

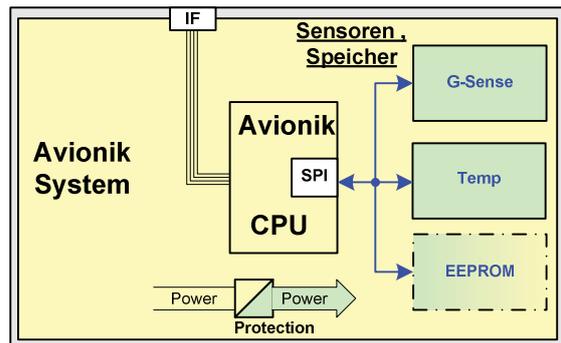


BILD 5: Integrierte Baugruppe

**5.4 Lösung: semi-integrierte Baugruppe**

Die günstigste Lösung ist, das Messsystem als eigenständige Baugruppe zu entwickeln, die dann als Sub Modul mit minimalem Entwicklungsaufwand in die Flugzeugelektronik eingebettet werden kann (BILD 4). Die einzig notwendige Verbindung zum Zielsystem besteht in der Energieversorgung. Daher müssen Sicherungselemente gegen Überlast und Energierückfluss in die Modulversorgung eingebaut werden, um jegliche Rückwirkung des Messsystems auf das Avionik System zu verhindern.

## 6. AUFBAU UND TEST VON MESSSYSTEM PROTOTYPEN

### 6.1 Auswahl der Hardware

Bevor ein generisches Messsystem für Serienprodukte eingeführt wird, sind Voruntersuchungen und Prototypentests als Nachweis für ein sicheres, zuverlässiges und funktionales Design notwendig. Konzeptuntersuchungen, Marktuntersuchungen und Engineering Tests führten zu einem Design mit folgenden Komponenten:

- 16 Bit Mikrocontroller
- 64 KBit FRAM Speicher
- 2 x 3-Achsen Beschleunigungssensoren
- 3 Temperatursensoren  $-55^{\circ}\text{C}$  bis  $+125^{\circ}\text{C}$

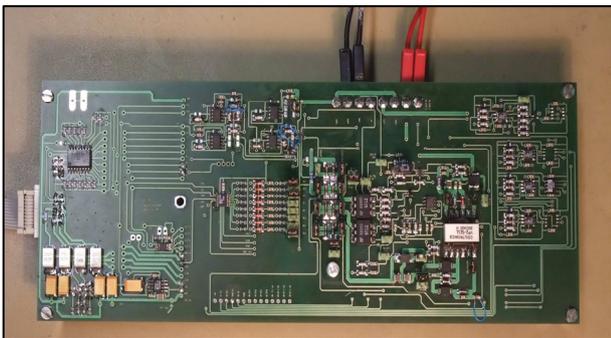


BILD 6: Prototyp eines Messsystems

Zusätzlich wurden Schaltungen und Schaltungsteile operativer Avionik Baugruppen mit auf dem Prototypen-Board aufgebaut, um die Zuverlässigkeit der Messelektronik in Vergleich zu repräsentativer, operativer Hardware zu demonstrieren.

Die Testschaltungen sollten mindestens folgenden Anforderungen genügen:

- Die Testschaltungen entsprechen häufig verwendeten Grundschaltungen aus den Avionik Baugruppen. Dies sind im Wesentlichen Discrete Input/Output Interfaces, Analoge Interfaces und Bussysteme.
- Anzahl und Typen der Bauelemente sind entsprechend der Verwendung in den Avionik Baugruppen auszuwählen. In den Testschaltungen sollten die Bauelemente der Testschaltungen so beansprucht werden wie in den äquivalenten Schaltungsteilen der operativen Hardware.

### 6.2 Software Funktionen

Mehrere Aspekte müssen im Software Design des Messsystems berücksichtigt werden:

- Sensorkalibration, Speicherorganisation
- Zyklisches Auswerten der Sensoren und Zuordnung zu Ereignisklassen
- Kommunikation: Auswertung von Steuerbefehlen, Datenausgabe
- Maßnahmen gegen Programm Ablauffehler

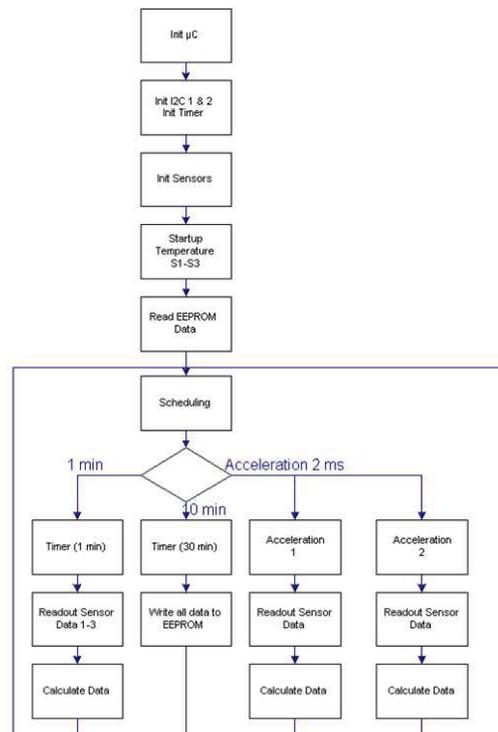


BILD 7: Prinzipielles Flussdiagramm

Der Programmablauf ermöglicht die einmalige Initialisierung des Messsystems.

- Die Bewegungssensoren werden auf eine definierte Lage kalibriert. Dies geschieht z.B. während des ersten Produktionstests. Damit können später registrierte mechanische Ereignisse auf ein festgelegtes Bezugssystem gerechnet werden und haben eine definierte Position im Raum.
- Eine Speicherorganisation beinhaltet die Aufteilung des Speicherraums in 2 identische Blöcke, die abwechselnd beschrieben werden können. Ein Adress-Map definiert die Speicherbereiche entsprechenden den Ereignissen
- Ein Sicherungsmechanismus verhindert das versehentliches Löschen des Speichers (z.B. durch nochmaliges Initialisieren des Messsystems während der Maintenance Aktivitäten)

Die zyklische Auswertung der Sensordaten ist die Voraussetzung für eine zeitbezogene Datenanalyse. Nur mit fest vorgegeben Erfassungszeiten können genaue Zeitspannen den Ereignissen zugeordnet werden:

- Minutenzähler zur Erfassung der Betriebszeiten
  - 10 min Rhythmus für eine gesamte Datensicherung
  - 10 min Rhythmus für einen Speicherblockwechsel
- Somit werden Sensorereignisse quantitativ erfasst und haben einen Bezug zur gesamten Betriebszeit der Avionik Baugruppe.

### 6.3 Verifikation durch Umwelttests

Definierte Testprofile aus den standardisierten Highly Accelerated Life Tests (HALT) des Entwicklungsprozesses werden verwendet, um die Bauelemente zu stressen und die Testzeit zu verkürzen. Besonders belastende Einflüsse sind Temperaturgradienten in Verbindung mit anschließenden mechanischen Stößen, die zufällige Frequenzspektren aufweisen. Hierbei wird über die üblichen Gerätespezifikationsgrenzen hinaus getestet.



BILD 8: Robustness Testprofil

Mit den durchgeführten Umwelttests an den Prototypen des Messsystems wurde das Design der Messelektronik erfolgreich verifiziert.

### 7. WEITERVERARBEITUNG DER DATEN

Die Daten des Messsystems werden in den Maintenance Prozess mit aufgenommen.

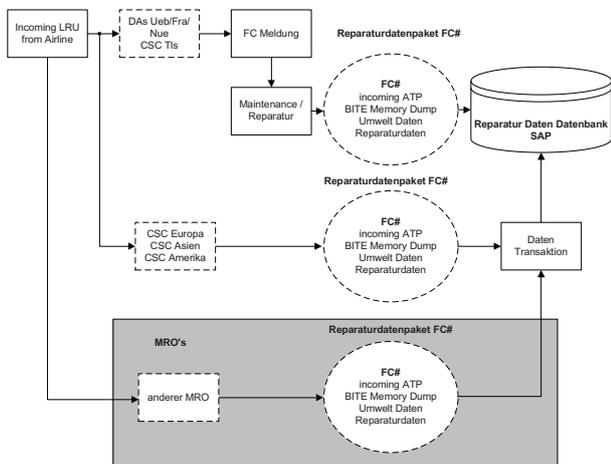


BILD 9: Datenspeicherung Avionik Geräte

Die Gerätedaten werden während den Wartungszyklen ausgelesen und mit zusätzlichen Metadaten versehen:

- Gerätetyp
- Seriennummer
- Einsatzdauer
- Fehlerreport ID's

Die weitere Verarbeitung und Interpretation der Daten erfolgt prinzipiell erst später in den verschiedenen Prozessen der Fachgebiete. Da jedes Fachgebiet andere Verwendungszwecke für diese Informationen hat, werden prozessspezifische Software Applikationen die Rohdaten in die benötigten Anwenderdaten umwandeln.

### 8. NUTZUNG DER UMWELTDATEN

Spezifische Software Anwendungen ermöglichen ein gezieltes Auswerten der Gerätedaten:

- Eingrenzung einer Gerätefehlerursache:  
Die erfassten Umweltdaten können den Ereignisrahmen eines Fehlerbildes deutlich reduzieren. Treten beispielsweise Gerätefehler nur bei ungewöhnlichen Temperaturen oder Temperaturgradienten auf, können diese Ausfälle zunächst nicht während den normalen Geräteeingangsprüfungen gefunden werden. Erst die Auswertung zusätzlicher Umweltdaten erlauben das gezieltere Eingrenzen der Fehlerquellen.
- Abgleich der Produktionstests:  
Die Highly Accelerated Stress Screening Profile einer Geräte Serie werden kontinuierlich optimiert, indem Felddaten mit in die Testprofile einfließen.
- Abgleich gerätespezifischer Designdaten:  
Die Kennwerte für die Zuverlässigkeitsvorhersage einer Avionik Baugruppe werden bisher ausschließlich aus den Kundenanforderungen ermittelt. Real gemessene Felddaten können diese Berechnungsgrundlagen validieren und erlauben eine fundierte und kontinuierliche Verbesserung der Parameter für die Zuverlässigkeitsvorhersage.

### 9. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Kundenanforderungen an Avionik Baugruppen sind aktuell bezüglich der Zuverlässigkeit und Robustheit sehr hoch und werden in der Zukunft noch weiter steigen. Dies erfordert die Entwicklung von langlebigen und wartungsarmen Lösungen.

Die im Feld bei typischem Einsatz beobachtete Zuverlässigkeit und Robustheit der Avionik wird vorrangig durch die Umweltbedingungen in den Betriebsphasen beeinflusst. Die dimensionierenden Umweltbedingungen in Luftfahrzeugen sind vorwiegend Temperatur- und Beschleunigungsereignisse.

Diese Umweltbedingungen werden zukünftig mit einem Messsystem für jede Avionik Baugruppe erfasst, damit Designparameter, Industrieparameter sowie Daten für die Zuverlässigkeitsvorhersage gewonnen werden können.

Die Tests mit dem Prototypenaufbau eines Messsystems zur Umweltdatenerfassung demonstrierten eindeutig die Verwendbarkeit des erarbeiteten Konzeptes für zukünftige Avionik Baugruppen.