

Störungsempfindlichkeit von Ethernet in der Luftfahrt

Thiemo Stadler^{*1)}, Matthias Kreitlow^{*2)}, Robert Keibel^{*1)}, Franziska Nieder^{*1)}, Frank Smailus^{*1)}, Frank Sabath^{*2)}

^{*1)} Airbus, EMC and Lightning Protection, Hamburg, Deutschland

^{*2)} WIS Munster, Electromagnetic Effects and HPEM, Munster, Deutschland

1 Einleitung

In der Luftfahrzeugtechnik wurden früher viele einzelne Signalleitungen als Punkt-zu-Punkt Verbindung verwendet. In der Regel hatten diese Signale eine gemeinsame Referenzmasse. Um die EMV zu verbessern, wurde eine Routentrennung eingeführt: Einzelne Leitungen werden nach Empfindlichkeit und Störpotential zusammengefasst und getrennt verlegt. Routentrennung ist auch außerhalb der Luftfahrt z. B. im Schiffbau eine bewährte EMV Maßnahme zusätzlich zur Gerätequalifikation. Das heißt die separate Führung einzelner Signalleitungen führt nicht systematisch zu einer Lockerung der Spezifikation angeschlossener Geräte.

In modernen Luftfahrzeugen befindet sich eine steigende Anzahl elektronischer Systeme. Diese sind in zunehmend untereinander vernetzt. Mit erhöhter Anzahl und Komplexität der Flugzeugsysteme sind einzelne Signalleitungen nicht mehr Stand der Technik denn der Installationsraum ist begrenzt, und Gewichtsanforderungen sprechen dagegen. Aus diesem Grund werden Datenbusse und Netzwerke verlegt. Aus EMV Sicht hat der Übergang zu modernen Bussystemen den großen Vorteil einer erheblich gesteigerten Störfestigkeit der Signalübertragung. Die gesamte Anzahl der Leitungen in einem modernen Luftfahrzeug ist dennoch sehr hoch. Dementsprechend erfordert eine Routentrennung eine sehr aufwändige Leitungsarchitektur. Angesichts einer möglichst störfesten Auslegung moderner Bussysteme stellt sich die Frage, inwieweit Routentrennung als zur Absicherung der Störfestigkeit von Datenübertragungsleitungen überhaupt noch notwendig ist.

Um zu belegen, dass für ein bestimmtes Übertragungsverfahren keine besondere Routenführung zur Sicherstellung der EMV erforderlich ist, muss gezeigt werden, dass die übertragenen Signale unter dem Einfluss der Flugzeugumgebung und benachbarter Störsignale hinreichend stabil sind und nicht signifikant beeinträchtigt werden. Die Grundlage dafür ist die tatsächliche elektromagnetische Flugzeugumgebung (EM environment). Diese Umgebung ist in der Form standardisierter EMV-Prüfungen und maximaler Störgrößen bekannt. Per Definition arbeitet qualifiziertes Gerät in dieser Umgebung störungsfrei. Wenn Daten in dieser Umgebung ebenfalls störungsfrei übertragen werden, ist eine Routentrennung für dieses Übertragungsverfahren überflüssig. Eine allgemeine Regel zur Routenführung eines gegebenen Standards erfordert die Betrachtung der eingekoppelten Störgrößen im Verhältnis zur Signalgröße.

In diesem Paper wird exemplarisch Fast Ethernet nach dem IEEE 802.3 Standard auf Störfestigkeit gegen Leitungskopplung geprüft und zwar niederfrequentes Nebensprechen und HIRF (high intensity radiated fields). Es zeigt sich, dass die Gerätequalifikation ausreicht, um die Störfestigkeit der Ethernet Verbindung unabhängig von der Route nachzuweisen. In gleicher Weise können alle Bussysteme analysiert werden, um die Kabelverlegung massiv zu vereinfachen.

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf die EMV. Es ist zu beachten, dass es außerhalb der EMV andere Zwänge für die Routentrennung geben kann, z.B. Redundanz.

2 Testumgebung

2.1 Flugzeug

Der Flugzeugbau ist stark reglementiert. Jedes System oder Gerät, das in ein Verkehrsflugzeug eingebaut wird, ist qualifiziert und zertifiziert. Die Prüfpegel sind abhängig vom Flugzeugtyp und vom Einbauort innerhalb des Flugzeuges. Die Prüfungen werden normalerweise im Labor durchgeführt und sind standardisiert in der RTCA-Norm DO-160 [1]. Für dieses Paper wurden zwei Tests aus dieser Norm angewandt:

2.1.1 DO-160, Kapitel 19.3 "Magnetic fields induced into interconnecting cables"

Dieser Test simuliert induktives Nebensprechen auf Verbindungsleitungen im Frequenzbereich von 350Hz bis 32KHz. Das entspricht der Frequenz des Flugzeugnetzes und ihren Oberwellen. Bild 1 zeigt den Testaufbau. Der Störstrom I wird über einen Leiter geführt, der über eine Länge $L=3\text{m}$ parallel zur Verkabelung des Systems liegt. Der nach Standard höchste Strom ist $I=40\text{A}$ zwischen 350Hz und 800Hz. Zu höheren Frequenzen wird der Strom linear reduziert bis er bei 32kHz auf 5.3A abgesunken ist.

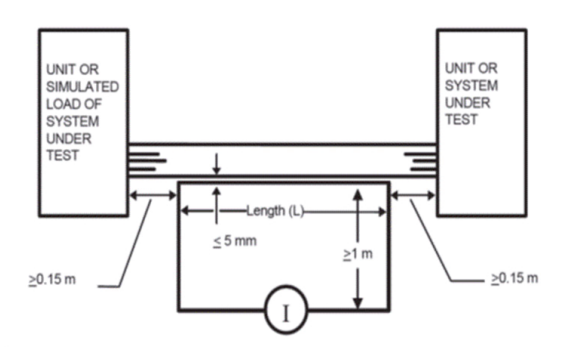


Bild 1: Testaufbau zur Störfestigkeitsprüfung gegen induktives Nebensprechen im niederen Frequenzbereich [1]

2.1.2 DO-160, Kapitel 19.4 "Electric fields induced into interconnecting cables"

Dieser Test simuliert kapazitives Nebensprechen auf Verbindungsleitungen im Frequenzbereich von 350Hz bis 32KHz. Der Aufbau ist ähnlich zu dem der induktiven Kopplung in Bild 1, aber es werden ein offener Leiter und eine Spannungsquelle verwendet. Die nach Standard höchste Spannung ist $U=1800\text{V}$ zwischen 350Hz und

800Hz. Zu höheren Frequenzen wird die Spannung linear reduziert bis sie bei 32kHz einen Wert von 45V erreicht.

2.1.3 DO-160, Kapitel 20 "Radio Frequency Susceptibility"

Mit dieser Prüfung wird die Immunität der Geräte/Systeme gegen hochfrequente Störungen überprüft. Die Störumgebung, der das Flugzeug standhalten muss, ist als sog. "HIRF environment" von den Luftfahrtbehörden vorgegeben. Von dieser Vorgabe werden die Prüfpegel abhängig von den Dämpfungseigenschaften des Flugzeugs abgeleitet. Es gibt je einen Test für gestrahlte und leitungsgekoppelte Störungen. Der im vorliegenden Beitrag angewandte Test benutzt eine induktive Koppelzange als Störquelle. Nach Norm ist die Störgröße definiert als ein Strom, der in eine spezielle Kalibrierleitung induziert wird, die mit 50Ω abgeschlossen ist. Typische Prüfgrößen liegen für diesen Test zwischen 7,5 und 100mA.

2.2 Ethernet (IEEE 802.3)

Ethernet ist als Übertragungsverfahren in IEEE 802.3 [2] standardisiert. Die in Flugzeugen am weitesten verbreitete Variante ist 100BASE-TX ("Fast Ethernet"). Der Ethernet standard definiert u. a. nach dem OSI Modell den sogenannten *Physical Layer* und den sogenannten *Data Link Layer*. 100Base-TX erreicht eine Datenrate von 100Mbit/s, *full-duplex* über zwei verdrehte Leitungspaare (*Twisted Pair*, category 5). Die Daten werden mit ternären rechteckförmigen Signalen übertragen. Die Bandbreite beträgt 31,25 MHz. Die drei Signalpegel ("-", "0", "+") entsprechen Spannungspegeln von -1V, 0V und +1V. Das minimale Signal zu Rausch Verhältnis (SNR) von Fast Ethernet ergibt sich aus der Shannon-Grenze und beträgt 11.8dB bei einer Bitfehlerrate (BER) von 31%. Dieses Signal zu Rausch Verhältnis ergibt einen effektiven Rauschpegel des Differenzsignals von:

$$U_{noise} = \frac{U_{signal}}{10^{\frac{SNR_{limit}/20}} = 0.26 V.$$

3 Methode

Um die Stabilität der Übertragungsstrecke zu bewerten, werden sowohl Signalpegel und Rauschpegel als auch Symmetrieeigenschaften der Signale gegenüber unsymmetrischen Störpegeln sowie typische Fehlerzustände von Ethernet betrachtet.

3.1 Durchsatzreduktion eines Kommunikationskanals

Zur Bewertung von Kommunikationstechnologien ist es sinnvoll, ihr Verhalten in der elektromagnetischen Umgebung, in der sie eingesetzt werden sollen, auszuwerten. Es ist zu beachten, dass die Kommunikationssignale Gegentaktsignale sind, die in Kapitel 2 beschriebenen standardisierten Störpegel aber primär Gleichtaktstörungen sind. Daher müssen sowohl die Signalpegel als auch die Gleichtaktunterdrückungseigenschaften der Übertragungsstrecke betrachtet werden.

Die Störung von Ethernet Signalen ist einfach zu beschreiben, wenn man zugrunde legt, dass das eingekoppelte Störsignal hoch genug sein muss, um die Auswertung des

übertragenen Nutzsignals zu verfälschen. Bei 100Base-TX Ethernet liegt die Entscheidungsschwelle zwischen den logischen Signalen bei 0,25V. Sie liegt damit nicht symmetrisch zwischen +/- 1V und 0V. Der Grund hierfür ist die mögliche Kabeldämpfung. Damit liegt die Störschwelle des Ethernet Signals bei etwa 0,25V. Anders ausgedrückt: Ab 0,25V Störspannung kann die Störung das 100Base-TX Signal über die Entscheidungsschwelle drücken und einen Bitfehler erzeugen. Das Signal zu Rausch Verhältnis der Störschwelle beträgt in diesem Fall:

$$SNR_{thres} = 20 \cdot \log \left(\frac{U_{signal}}{U_{bound}} \right) = 12 \text{ dB}$$

Es ist kaum praktikabel, die differentiellen Ethernet Signale direkt zu messen, ohne die Charakteristik der Empfängerschaltung zu ändern. Es ist daher nicht möglich, zu messen, wann das eingekoppelte Gegentaktstörsignal die Störschwelle übersteigt. Eine effektivere Methode besteht darin, anhand der übertragenen Daten zu ermitteln, ob die Störschwelle erreicht ist. Dies ist im vorliegenden Fall genau dann erreicht, wenn die Bitfehlerrate 50% übersteigt.

Für lineare Systeme ist die Gegentaktspannung (UDM) und die Gleichtaktspannung (UCM) über die Gleichtaktunterdrückung (*common mode rejection ratio*, CMRR) verbunden:

$$U_{noise,DM} = \frac{U_{noise,CM}}{CMRR}$$

Durch Verdrillung der Leiter eines Kabels lässt sich das CMRR einer symmetrischen Leitung erheblich verbessern. Ein übliches ungeschirmtes verdrilltes Leiterpaar erreicht eine typische Gleichtaktunterdrückung von 30 dB [3].

3.2 Fehlertypen von Ethernet

Es gibt drei typische Fehlerarten von Ethernet. Dies sind Bitfehler, Synchronisationsverlust oder Zerstörung der Eingangskomponenten

3.2.1 Bitfehler.

Bitfehler äußern sich in der Erhöhung der Bitfehlerrate (Bit Error Rate, BER):

$$BER = \frac{\text{Bit Fehler}}{\text{Anzahl übertragener Bits}}$$

Bitfehler treten auf, wenn eine Störung dem Signal so überlagert wird, dass ein es am Empfänger nicht mehr richtig interpretiert werden kann. Man bezeichnet das auch als bit-flip [4]. Ein Beispiel für Fehlermechanismen und Anwendungen findet sich in [5].

3.2.2 Verlust der Synchronisierung

Wenn der Empfänger nicht mehr in der Lage ist, die Taktfrequenz des Senders zu erkennen, spricht man vom Verlust der Synchronisierung (*synchronization loss*). Dies führt sofort zum Verlust der Verbindung. Verursacht wird das durch eine sehr starke Störung oder durch nichtlineare Effekte wie z.B. der Sättigung eines Bauteils.

3.2.3 Zerstörung

Dieser Fehler ist unumkehrbar. Wenn es zur physikalischen Zerstörung des Senders oder Empfängers kommt, ist keine Datenübertragung mehr möglich.

4 Versuchsaufbau und Durchführung

Eine Fast Ethernetverbindung wird zwischen zwei Netzwerktestgeräten aufgebaut. Diese Geräte verfügen über Ethernet Empfänger und Sender. Die Geräte wurden auf Fast-Ethernet mit 100Mbit/s konfiguriert. Als Verbindungskabel dient ein nicht geschirmtes CAT 5e Kabel mit verdrehten Aderpaaren. Die Verbindung wird auf maximaler Auslastung gehalten, damit einzelne Bitfehler wird detektiert und angezeigt werden kann.

4.1 Niederfrequentes Übersprechen

Der Aufbau wurde normgerecht nach DO-160 [1] ausgeführt (siehe 2.1.1 und 2.1.2). Der Test wurde mit den höchsten Pegeln aus DO-160 [1] durchgeführt. Wenn keine Fehler auftreten, wird der Abstand zwischen Testkabel und Störkabel auf null reduziert und der Test wiederholt.

4.2 Hochfrequenz Störfestigkeitstest

Auch dieser Aufbau basiert auf DO-160 [1] (siehe 2.1.3). Die Norm verlangt ein langes Verbindungskabel. Dies führt aber zu Stehwellen, die die Genauigkeit und Wiederholbarkeit des Versuchs beeinträchtigen. Deshalb wird für diese Untersuchung die Leitungslänge auf etwa ein Drittel der kürzesten Wellenlänge des Testsignals reduziert. Bei einer maximalen Testfrequenz von 125 MHz beträgt diese Länge 0,75 m.

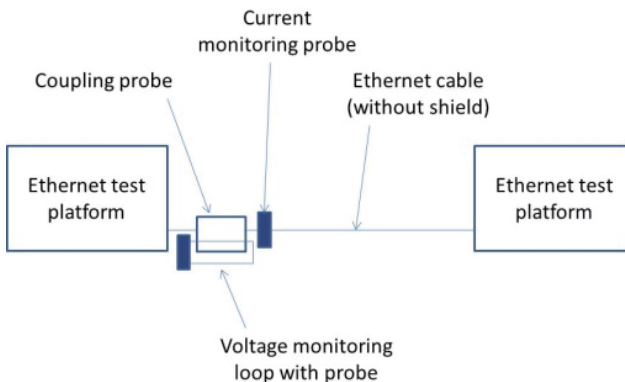


Bild 2: Hochfrequenz Störfestigkeitstest

Die Leitungen Ethernet Anschlüsse der Testgeräte sind gegenüber den Testgeräten galvanisch getrennt. Der Eingangsschaltkreis der Anschlüsse enthält eine Gleichtaktrossel, welche hochfrequente Gleichtakt-Ströme an die Gerätemasse ableitet. Für das eingesetzte Ethernet beträgt die typische Gleichtaktimpedanz am Abschluss 50 Ohm. Daher kann die eingekoppelte Gleichtaktspannung mit einer einfachen Leiterschleife durch die Koppelzange und einem 50 Ohm Tastkopf gemessen werden. Bild 2 und 3 zeigen die Details.

Für die Prüfungen wird der Pegel der Störgröße erhöht, bis die Testgeräte die ersten Fehler anzeigen.

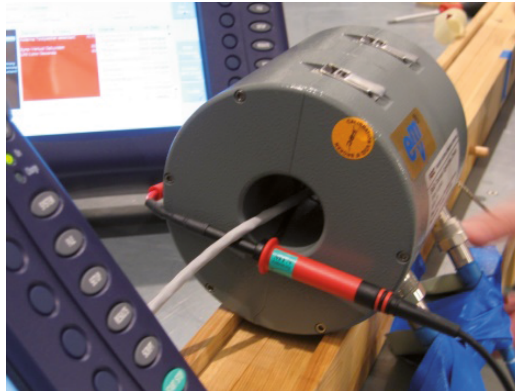


Bild 3: Koppelzange und Messschleife mit Tastkopf

5 Ergebnisse

5.1 Niederfrequentes Übersprechen

Die Tests wurden mit dem doppelten der höchsten Testpegel nach [1] durchgeführt. Das Ethernet Kabel war nicht geschirmt. Zusätzlich wurde der Abstand zwischen Testkabel und Störkabel auf null reduziert. Trotzdem konnte die Verbindung nicht gestört werden. Es gab keine Übertragungsfehler. Daraus lässt sich folgern, dass diese Ethernet Verbindung sich auch im Flugzeug durch niederfrequentes Übersprechen nicht stören lassen kann.

5.2 Hochfrequenz Störfestigkeitstest

Ströme mit Frequenzen zwischen 500kHz und 125MHz wurden als Gleichtaktstörnsignal auf das Ethernet Kabel eingekoppelt. Um die Störschwelle zu ermitteln, wurde das Störsignal bei jeder Testfrequenz zunächst mit geringer Amplitude eingekoppelt und dann der Pegel langsam erhöht bis die Testgeräte Fehler meldeten. Teilweise mussten für diesen Test ungewöhnlich hohe Leistungen aufgebracht werden, um Fehler zu provozieren. Beobachtete Effekte:

- Der häufigste Fehlereffekt war der Verlust der Synchronisierung verbunden mit einem Verbindungsabbruch.

- Die eingekoppelte Gleichtakt-Spannung, die mit Oszilloskop, Tastkopf und Leiterschleife in der Koppelzange gemessen wurde, war sinusförmig solange keine Übertragungsfehler auftraten. In dem Moment, wo die Übertragung abbrach, veränderte sich auch die Wellenform dieser Spannung zu einer verzerrten Sinuskurve.
- Der Geruch verschmorender Elektronik war einmal deutlich wahrnehmbar. Quelle war ein austauschbarer Ethernetschnittstelleneinsatz.
- Die Störschwelle war häufig abhängig von den Testpegeln vorangegangener Tests. In diesem Fall stieg die Störschwelle nach einer Testpause an. Dieses Phänomen kann einer Überhitzung der Ethernet Sender/Empfängerschaltung zugeschrieben werden.

Um das Überhitzen der Elektronik zu vermeiden, wurden die Störsignale pulsmoduliert so dass sich die über die Zeit übertragene Leistung reduziert. Bei einem genügend kleinen Duty-Cycle konnte die Elektronik des Ethernet Testgerätes genügend abkühlen. Der thermisch beschädigte Schnittstelleneinsatz des Ethernet Testgerätes wurde ausgetauscht. Danach traten die beiden letztgenannten Effekte nicht mehr auf.

Bild 4 zeigt die Störschwelle des Ethernet Testgerätes.

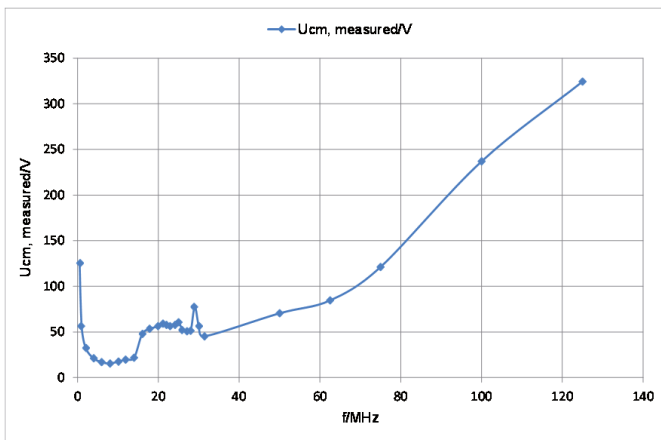


Bild 4: Störschwelle des Ethernet Testgerätes

Alle aufgetretenen Effekte sind offensichtlich nicht-linearer Natur. Ähnliche Effekte wurden auch in [6] beschrieben. Der eingekoppelte Gleichtaktstörstrom verursacht einen plötzlichen Zusammenbruch eines vorher hochohmigen Teils der Sender/Empfängerschaltung des Ethernet Testgerätes. Das erklärt warum statt einzelner Bitfehler sofort ein kompletter Verbindungsabbruch beobachtet werden konnte. Es erklärt auch die Überhitzungseffekte und das Auftreten neuer Frequenzen in der beobachteten Kurvenform der Spannung. Verantwortlich sind vermutlich Schutzelemente z.B. gegen ESD. Generell ist ein nicht-linearer Effekt ein physikalischer Effekt und kein logischer Fehler.

Wichtig ist, dass diese Effekte nur in einem der Testgeräte aufgetreten sein können. Das Kabel selbst verhält sich bei Spannungen und Strömen vollkommen linear. Das bedeutet, dass das Signal nicht auf der Leitung verändert wurde, sondern im Sender oder Empfänger. Die Störfestigkeit der Ethernet Datenübertragung wird also durch das Gerät bestimmt und nicht durch den Datenübertragungsstandard. Wie oben beschrieben sind alle Geräte im Flugzeug qualifiziert, und damit zwingend ausreichend störfest. Das Ergebnis dieser Untersuchung belegt, dass für die hier untersuchten Fälle von Übersprechen und HIRF die Gerätequalifikation ausreicht, um Störfestigkeit der Datenübertragung nachzuweisen.

6 Zusammenfassung

Die Störschwelle zur Störung des differentiellen Ethernetsignals (100Base-Tx) ist deutlich höher als die Störschwelle für physikalische Effekte der untersuchten Ethernet Sender/Empfänger. Die Untersuchung wurde ohne Kabelschirme durchgeführt, was in der Praxis zu noch deutlich höheren Störschwellen von Ethernet Netzwerken führen dürfte.

Für die untersuchten Störquellen ist die Gerätequalifikation ausreichend, um Störfestigkeit der Datenübertragung sicherzustellen. Eine zusätzliche Routentrennung bringt keine weiteren Vorteile. Generell sollte die Notwendigkeit der Routentrennung als Maßnahme der EMV überdacht werden.

7 Referenzen

- [1] EUROCAE ED-14G, RTCA DO-160G: Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment, EUROCAE/RTCA, 2010.
- [2] IEEE Standard for Ethernet, IEEE Std 802.3-2012 SECTION TWO, Clause 25
- [3] Knobloch, A.; Garbe, H.; Karst, J.P., "Shielded or unshielded twisted-pair for high speed data transmission?", Electromagnetic Compatibility, 1998, 1998 IEEE International Symposium on, vol.1, no., pp.112,117 vol.1, 24-28 Aug 1998
- [4] F. Sabath, "Classification of electromagnetic effects at system level", Proceedings of the 2008 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe), pp.1-5, Wroclaw, Poland, 2008
- [5] M. Kreitlow, H. Garbe, F. Sabath, "Influence of Software Effects on the Susceptibility of Ethernet Connections", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC 2014 Symposium, Raleigh, NC, USA, August 2014
- [6] E.B. Joffe, "Assessment of the Robustness of Commercial Data Communication Interferences to a Military EMI Environment, IEEE International Symposium on EMC, 2008